




# НАУКА, ИННОВАЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ: ОТ ИДЕЙ К ВНЕДРЕНИЮ

Часть 2

Материалы II Международной научно-практической  
конференции молодых ученых  
Комсомольск-на-Амуре, 14-18 ноября 2022 г.



Комсомольск-на-Амуре  
2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

**НАУКА, ИННОВАЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ:  
ОТ ИДЕЙ К ВНЕДРЕНИЮ**

Часть 2

Материалы II Международной научно-практической  
конференции молодых ученых  
Комсомольск-на-Амуре, 14-18 ноября 2022 г.

Комсомольск-на-Амуре  
2022

УДК 001:621  
ББК 95.4+65.9(2)-55  
Н34

*Рецензент* – А. А. Буренин, главный научный сотрудник,  
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор  
(Институт машиноведения и металлургии ХФИЦ ДВО РАН)

*Редакционная коллегия:*

А. В. Космынин, доктор технических наук, профессор, отв. ред.;  
И. А. Трещев, кандидат физико-математических наук, доцент;  
П. А. Саблин, кандидат технических наук, доцент;  
О. А. Красильникова, кандидат технических наук, доцент;  
И. Н. Журбина, кандидат физико-математических наук, доцент  
(г. Комсомольск-на-Амуре, КнАГУ)

**Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению** : материалы  
Н34 II Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, г. Комсомольск-на-  
Амуре, 14-18 ноября 2022 г. / редкол. : А. В. Космынин (отв. ред.)  
[и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – Ч. 2. – 321 с.

ISBN 978-5-7765-1522-4 (Ч. 2)  
ISBN 978-5-7765-1523-1

Материалы сборника освещают научные проблемы инновационного развития современной техники и технологий, объединяя усилия молодых учёных и специалистов для решения актуальных задач науки и техники.

Публикуемые материалы будут полезны преподавателям вузов, руководителям и специалистам предприятий, а также студентам и аспирантам, проявляющим интерес к данной проблематике.

Материалы публикуются в авторской редакции. За содержание и достоверность статей ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов статей. При использовании и заимствовании материалов ссылка на издание обязательна.

*Конференция проведена в рамках гранта в форме субсидий из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования на реализацию мероприятий, направленных на поддержку студенческих научных сообществ.*

УДК 001:621  
ББК 95.4+65.9(2)-55

ISBN 978-5-7765-1522-7 (Ч. 2)  
ISBN 978-5-7765-1523-1

© ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022

## **СЕКЦИЯ СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ**

УДК 544.971

Баклыкова М.А., студент, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Baklykova M.A., student, Tambov State Technical University, Tambov

Старунская В. И., студент, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Starunskaya V.I., student, Tambov State Technical University, Tambov

Шубин И. Н., к.т.н., ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Shubin I.N., Ph.D., ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Попова А.А., менеджер по корпоративной социальной ответственности, ПОА «Прогресс», г. Липецк

Popova A.A., Corporate Social Responsibility Manager, POA «Progress», Lipetsk

### **РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО ЭФФЕКТА ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ПРИ АКТИВАЦИИ УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА**

### **CALCULATION OF THE THERMAL EFFECT OF A CHEMICAL REACTION DURING THE ACTIVATION OF A CARBON MATERIAL**

Аннотация. В рамках данной работы рассчитан тепловой эффект и тепловые затраты химической реакции при протекании процесса активации углеродного материала. Проведенные расчеты показали, что изменение энтальпии и внутренней энергии имеют положительные значения. Это говорит о том, что исходные компоненты смеси имеет энергии меньше, чем продукты реакции и воздействие температуры на процесс активации – минимально.

Abstract. Within the framework of this work, the thermal effect and thermal costs of a chemical reaction are calculated during the process of activation of a carbon material. The calculations performed showed that the change in enthalpy and internal energy have positive values. This suggests that the initial components of the mixture have less energy than the reaction products and the effect of temperature on the activation process is minimal.

Ключевые слова: химическая реакция, тепловой эффект, активация, выделение тепла, поглощение тепла.

Key words: chemical reaction, thermal effect, activation, heat release, heat absorption.

На данном этапе развития промышленности, большую актуальность имеет получение высокопористого углеродного материала, который будет отличаться высокими сорбционными характеристиками, большой удельной поверхностью и высоким объемом микро- и мезопор [1,2]. Такие материалы могут активно применяться в различных областях, таких как энергетика, медицина, машиностроение и ряда других.

Наиболее эффективным способом получения высокопористого углеродного материала является высокотемпературная активация исходного сырья в инертной среде при ступенчатом нагреве, в течение заданного количества времени.

Под активацией понимается интенсификация физико-химических процессов выведением систем из стабильного состояния воздействием на параметры процесса, на физическое или химическое состояние материала.



В процессе реализации высокотемпературной химической активации протекает ряд химических реакций, которые сопровождаются выделением или поглощением тепла [3-5].

Для понимания природы химических процессов, возможности их масштабирования и перехода из лабораторных условий к промышленным, важным является определение такой термодинамической характеристики, как тепловой эффект.

Под тепловым эффектом понимают изменение внутренней энергии в результате проведения химической реакции и получения из исходных веществ продуктов реакции, которые соотносимы с уравнением химической реакции.

При проведении практических и теоретических исследований необходимо учитывать тот фактор, что тепловой эффект не зависит от скорости протекания реакции.

Стандартная теплота образования всех участвующих в реакции реагентов является центральной для расчета теплового эффекта, но для упрощения процесса производят измерения выделяющегося тепла в процессе реакции, как правило, используя калориметры теплового потока [6-8]. Определение теплового эффекта реакции возможно при наличии знаний об общем тепловом балансе, количестве энергии, подаваемой в реактор, при этом важно учитывать поглощается ли она или добавляется при подаче реагентов в смеси. Кроме того, необходимо выяснить что происходит с реакционной смесью и энергией (в целом) при повышении или понижении температуры.

Показателем выделяемого тепла в единицу времени является интенсивность тепловыделения, а интегрирование кривой тепловыделения позволяет найти энтальпию реакции. Важно учесть тот фактор, что каждая составляющая теплового потока оказывает большое влияние на общий тепловой баланс, поэтому они требуют максимальной точности при их определении.

Зависимость теплового эффекта реакции от температуры вычисляется по закону Кирхгофа, который говорит о том, что температурный коэффициент теплового эффекта равен изменению теплоемкости и системы в процессе реакции.

$$\Delta H_{1048}^0 = \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^{1048} \Delta C_p^0(T) dt,$$

где  $H_{298}^0$  - стандартный тепловой эффект реакции при 298 К;

$\Delta C_p^0$  - изменение теплоемкости системы в результате протекания реакции.

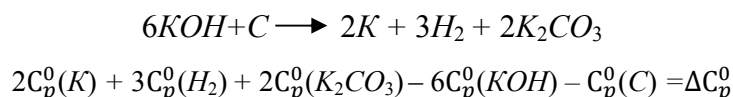
При расчетах необходимо учесть, что при данном температурном диапазоне вещество может находиться в разных агрегатных состояниях и аллотропных модификациях.

При протекании процесса активации углеродного материала давление в системе практически не меняется, что дает право им пренебречь и сделать акцент на изменение энтальпии [9].

Исходные данные для расчета берем из [10].

$$\begin{aligned} C_p^0 &= A + BT + CT^2 + DT^3 + \frac{E}{T^3} \\ \int (A + BT + CT^2 + DT^3 + \frac{E}{T^3}) dt &= \\ &= \int A dt + \int BT dt + \int CT^2 dt + \int DT^3 dt + \int E \frac{1}{T^2} dt = \\ &= AT + B \frac{T^2}{2} + C \frac{T^3}{3} + D \frac{T^4}{4} + E \frac{1}{T} \end{aligned}$$

Найдем разницу между энтальпией продуктов и энтальпией исходных компонентов, учитывая все коэффициенты:



$$C_p^0(\text{KOH}) = \int_{298}^{516} C_p^0(T)dt + \int_{516}^{679} C_p^0(T)dt + \int_{679}^{1048} C_p^0(T)dt = \mathbf{60,61} \text{ (Дж/моль)}$$

$$C_p^0(\text{C}) = \int_{298}^{1048} C_p^0(T)dt = \mathbf{15,65} \text{ (Дж/моль)}$$

$$C_p^0(\text{K}) = \int_{298}^{336,35} C_p^0(T)dt + \int_{336,35}^{1039,54} C_p^0(T)dt + \int_{1039,54}^{1048} C_p^0(T)dt = \mathbf{10,50} \text{ (Дж/моль)}$$

$$C_p^0(\text{H}_2) = \int_{298}^{1000} C_p^0(T)dt + \int_{1000}^{1048} C_p^0(T)dt = \mathbf{22,70} \text{ Дж/моль}$$

$$C_p^0(\text{K}_2\text{CO}_3) = \int_{298}^{1048} C_p^0(T)dt = \mathbf{122,09} \text{ (Дж/моль)}$$

$$\Delta C_p^0 = 2 \cdot 10,50 + 3 \cdot 22,70 + 2 \cdot 122,09 - 6 \cdot 60,61 - 15,65 = \mathbf{-46,03} \text{ Дж}$$

$$= \mathbf{-0,046} \text{ кДж}$$

Полученные данные, в очередной раз, подтверждают тот факт, что теплота химической реакции зависит от количества исходных веществ: чем больше масса исходных компонентов, тем больше тепловой эффект [11-13].

Рассчитаем стандартную энтальпию:

$$\Delta H_{298}^0 = 2 \cdot \Delta H_{298}^0(\text{K}) + 3 \cdot \Delta H_{298}^0(\text{H}_2) + 2 \cdot \Delta H_{298}^0(\text{K}_2\text{CO}_3) - 6 \cdot \Delta H_{298}^0(\text{KOH}) - \Delta H_{298}^0$$

$$= 2 \cdot 0 + 3 \cdot 0 + 2 \cdot (-1146,1) - 6 \cdot (-425,8) - 1 \cdot 0 = 262,6 \text{ (кДж)}$$

$$\Delta H_{1048}^0 = 262,6 + (-0,046) \approx 262,6 \text{ кДж}$$

Проведен расчет теплового эффекта и тепловых затрат на осуществление процесса активации углеродного наноматериала. Установлено, что протекающая реакция является эндотермической ( $\Delta H_{1048}^0 > 0$ ), т. е. происходит поглощение тепла, а температура оказывает минимальное воздействие на тепловой эффект, что позволяет в дальнейшей работе использовать стандартные инженерные методы расчета.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Качалова, Г. С. Определение тепловых эффектов химических процессов [методические указания] / Г. С. Качалова // Тюмень. – Тюмень: Издательский центр БИК ТИУ, 2019. – 15 с.
2. Aksenov, D. A. The Thermal effect of deformation during the ecap processing of the CU-0.6 CR alloy / D. A. Aksenov, R. N. Asfandiyarov, G. I. Raab, M. P. Baryshnikov. 2021. Т. 11. № 1 (41). С. 95-99.
3. Коробейников, Ю. Г. Тепловые эффекты в модельных образцах при акустическом и конвективном воздействиях / Ю.Г. Коробейников, А. П. Петров, Г. А. Трубачев, А. В. Федоров // Инженерно-физический журнал. 2006. Т. 79. № 2. С. 168-173.
4. Niu, J. J. Effect of Temperature on Chemical Activation of Carbon Nanotubes / J. J. Niu, J. N. Wang // Solid State Sciences. – 2008. – Vol. 10, No. 9. – P. 1189 – 1193. doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2007.12.016.
5. Suarez-Garcia, F. Activation of polymer blend carbon nanofibres by alkaline hydroxides and their hydrogen storage performances / 16. F. Suarez-Garcia, E. Vilaplana-Ortego, M. Kunowsky, M. Kimura, A. Oya, A. Linares-Solano. // International journal of hydrogen energy. 2009. Vol. 34. pp. 9141-9150.

6. Попова, А. А. Расчет параметров качества компактированных смесей наноразмерных сорбентов. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2020662594 от 16.10.2020 А. А. Попова, А. Г. Ткачев, А. А. Баранов, И. Н. Шубин.

7. Диагностика свойств нанодисперсных порошков: оборудование и методы их определения [Электронный ресурс, мультимедиа] / Баранов А. А., Попова А. А., Таров Д. В., Шубин И. Н. // Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ». – 2019. Рег.номер №0321903349.

8. Попова, А.А. Анализ погрешностей, возникающих на этапах приготовления компактированного углеродного материала / Шубин И. Н., Попова А. А., Алиев Р. Э. // Заметки ученого. – 2020, № 10. – С. 95-102.

9. Danilchuk Yu. V. Thermal effect of carbohydrate dissolution in aqueous-organic media / Danilchuk Yu. V // Health, Food & Biotechnology. 2020. Т. 2. № 4. С. 49–59.

10. Стась, Н.Ф. Справочник по общей и неорганической химии: учебное пособие / Н. Ф. Стась; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 84 с.

11. Карташов, С.Н. О тепловом эффекте и направленности химических процессов / Карташов С. Н., Климачев Д. А. // Наука, технология, техника: перспективные исследования и разработки. Сборник научных трудов по материалам Междисциплинарного форума speed-up. 2019. С. 68–69.

12. Касаткина, А. А. Расчёт тепловых эффектов химических реакций в синтезе хлоридов / А. А. Касаткина, И. В. Юрченко, Л. В. Фомина // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2019. Т. 1. № 16. С. 70–76.

13. Бельчинская, Л.И. Эффект тепловой и электромагнитной обработок аэрозоля на сорбцию-десорбцию паров формальдегида и воды / Л. И. Бельчинская, Н. А. Ходосова, Л. А. Новикова, К. В. Жужукин // Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов. Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием. 2021. С. 29-31.

УДК: 621.762.2+661.878

Балахонов Денис Игоревич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Физико-химических основ технологии материалов», ФГБУН ХФИЦ Институт Материаловедения ДВО РАН

Balakhonov Denis Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of "Physico-Chemical Fundamentals of Materials Technology", FSBIS KFRC Institute of Materials Science FEB RAS

## **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ БОРИДОВ ВОЛЬФРАМА В СРЕДЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ**

### **DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR OBTAINING TUNGSTEN BORIDES IN A LOW-TEMPERATURE PLASMA ENVIRONMENT**

Аннотация. За последние десятилетия стало очевидно необходимость развития и восстановления производственных мощностей для получения соединений тугоплавких металлов, карбидов, боридов или силицидов, для нужд машиностроительной, химической и других отраслей народного хозяйства. В статье изложены особенности метода получения боридов вольфрама (W-B) в среде низкотемпературной электродуговой плазмы, из минерального сырья. Изложена методика подготовки смеси из минерального концентрата – шеелита и борной кислоты ( $H_3BO_3$ ). Представлена схема прототипа уста-

новки проведения плазмохимического синтеза боридов вольфрама в защитной среде. Получение боридов вольфрама производилось при удельной мощности плазменного потока в 10–100 кВт/см<sup>2</sup>, с применением ВЧ-электромагнитного излучения. Приведены результаты анализа химико-физических свойств боридов вольфрама системы W-B. В ходе лабораторных испытания проб полученного материала, подтверждено наличие боридов вольфрама (W-B) и установлено наличие фаз – WB, WB<sub>2</sub> и W<sub>2</sub>B. Доказана перспективность применения плазменных технологий для формирования тугоплавких и износостойких соединений на основе бора и вольфрама.

Abstract. Over the past decades, it has become obvious that it is necessary to develop and restore production capacities for the production of compounds of refractory metals, carbides, borides or silicides, for the needs of machine-building, chemical and other sectors of the national economy. The article describes the features of the method for obtaining tungsten borides (W-B) in a low-temperature arc plasma medium from mineral raw materials. The procedure for preparing a mixture of mineral concentrate - scheelite and boric acid (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) is described. A scheme of a prototype setup for plasma-chemical synthesis of tungsten borides in a protective environment is presented. The production of tungsten borides was carried out at a specific plasma flow power of 10–100 kW/cm<sup>2</sup>, using RF electromagnetic radiation. The results of the analysis of the chemical and physical properties of tungsten borides of the W-B system are presented. During laboratory testing of samples of the obtained material, the presence of tungsten borides (W-B) was confirmed and the presence of phases - WW, WB<sub>2</sub> and W<sub>2</sub>B was established. The prospects of using plasma technologies for the formation of refractory and wear-resistant compounds based on boron and tungsten have been proved.

Ключевые слова: шеелитовый концентрат, борид вольфрама, плазма, плазмохимический синтез, энергия высокой плотности.

Key words: scheelite concentrate, tungsten boride, plasma, plasma-chemical synthesis, high-density energy.

### **Введение**

На сегодняшний момент времени важно развивать направления и технологию получения соединений карбидов и боридов тугоплавких металлов вольфрама или титана, широко применяемых во множестве отраслей народного хозяйства [1], из минерального оксидосодержащего сырья методами экстрактивной металлургии [2]. Одним из примеров такой технологии является применение низкотемпературной ВЧ-плазмы, позволяющей разрушать сложноструктурированные многокомпонентные минералы до более простых, с последующим синтезом необходимых соединений [3-6]. Плазмохимический синтез позволяет получать соединения с широким спектром физико-химических свойств при высокой скорости производства, однако процесс технологически осложнён требованиями надёжности применяемого оборудования, например, генераторы плазмы, камера синтеза, система подвода и сбора материала, и т.д. Помимо прочего, важным является условие, при котором разрабатываемая или применяемая технология производства, должна отвечать требованиям экологической безопасности и рациональному использованию рудных материалов, добываемых на территории региона.

Целью проводимых исследований является разработка технологии и изучение процессов получения боридов вольфрама системы W-B, методом высокотемпературного синтеза в среде электродуговой ВЧ-плазмы, из многокомпонентного минерального вольфрамсодержащего концентрата.

### **Основная часть**

Изложенные результаты исследований направлены на обоснование возможности получения тугоплавких соединений – боридов вольфрама системы W-B методом плазмохимического синтеза из минерального оксидосодержащего многокомпонентного концентрата – шеелита, добываемого в Дальневосточном регионе (Лермонтовский ГОК), состав которого приведён в таблице 1.

Таблица 1 – Фазовый состав шеелитового концентрата

Химическое соединение								
WO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	FeO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO
42,34	1,9	12,34	3,72	0,18	9,2	0,11	0,12	0,02
SO <sub>3</sub>	CaO	As	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O–	H <sub>2</sub> O+	-
0,1	24,8	0,13	2,21	0,78	0,14	0,54	1,37	-

Фазовый и химический состав концентрата предварительно исследовались, так как по своей природе является неоднородными и могут изменяться не только от одного месторождения к другому, но и в пределах разработки, а содержание триоксида вольфрама WO<sub>3</sub> варьироваться в пределах от 10...80 %.

Состав минерального концентрата неоднородный и многокомпонентный в виду чего, весь процесс получения боридов вольфрама осложняется наличием попутных химических элементов, входящих в состав минерала.

Воздействуя концентрированным потоком плазмы на смесь, состоящую из минерального концентрата и восстановителя, материал смеси нагревается и плавится, при высокой скорости протекания химических реакций, что не позволяет отдельным соединениям образовывать новые, с последующей возгонкой. При достижении температуры кипения происходит процесс деструктуризации соединений на отдельные элементы. Образование зародышевой фазы будущего соединения протекает вдали от равновесия термодинамической и физической системы. Источником такой плазмы в исследовательской работе является высокочастотный магнетрон мощностью 1 кВт и плазмотрон косвенного действия, питающийся от инвертора мощностью 8 кВт.

Для получения смеси взят минеральный концентрат – шеелит (Ш) и борная кислота (В) – H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> в соотношении 1:2. Затем состав усредняли, смешивая с применением мольного оборудования, а получаемая смесь претерпевали процесс частичной механоактивации.

Максимальная температура плазменного потока в присопловой области плазматрона составляет ~10 тыс. К. Средняя температура стенок реакционной камеры составляет порядка 843 К. Температура камеры в присопловой области неоднородна и может достигать 2400 К.

Согласно приведённой схемы установки для проведения плазмохимического синтеза W-B (рисунок 1) подготовленная смесь попадает из бункера в подающее устройство. В качестве транспортирующего газа применяется аргон, подача порошкообразной смеси производится эжекционным устройством по трубопроводу. Материал проходит зону «катода», выполненного в виде токопроводящей толстостенной трубки, затем участок резонанса микроволнового излучения в резонансной камере – волноводе и попадает в концентратор. Концентратор является элементом формирования предварительно разогретой смеси газа с порошком (Ш+В). Разность потенциалов между катодом и анодом позволяет формировать факел плазмы. Поток направлен на специально подготовленную подложку (анод) для сбора материала, однако его формирование протекало и на стенках камеры.

Анализ полученного в ходе синтеза материала проводили с применением стандартизированного оборудования, общепринятыми методами [7]. Спектральный анализ проводили с использованием энергодисперсионного спектрометра «X-Max 80» (Oxford Instruments) сканирующего электронного микроскопа «VEGA 3 LMH» (TESCAN). Анализ позволил получить контрастные изображения (рисунок 2, а), выявить наличие твердых частиц системы W-B (светлая область), соединений бора и попутных химических элементов Fe, Si, Ca и др., или их сплавов, входящих преимущественно в состав шлака (тёмная область). Материал исследуемых образцов на 90 % состоит из боридов W-B по отношению к общему объёму. Образцы не проходили дополнительных этапов обработки или травления, кроме постепенного остывания в камере синтеза перед их изъятием.

Последующие исследования позволили определить, что в зависимости от скорости охлаждения синтезируемого материала в значительной степени меняется размер частиц боридов. Размер частиц, полученных ближе к концентратору, достигает 100–1000 нм.

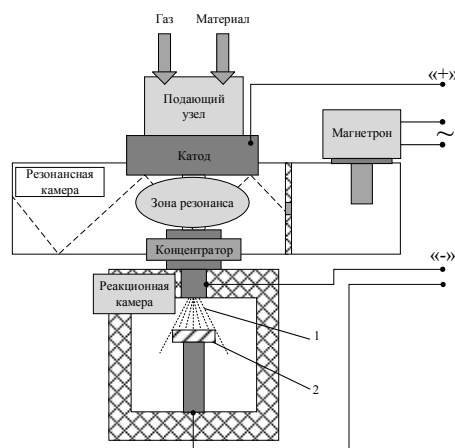


Рисунок 1 – Схема устройства нагрева смеси, подаваемой в камеру синтеза:

1 – факел плазмы; 2 – подложка для сбора материала

Спектральный анализ образцов (рисунок 2, *a*) позволил выявить следующие фазовые состояния  $WB$ ,  $W_2B$  и  $WB_2$ , их наличие показано светлой областью. Дальнейший химический анализ позволил установить, что в соединении  $W_2B$  содержание  $W$  до 92,99 масс.%,  $B$  до 6,19 масс.%,  $WB_2$  с содержанием  $W$  до 91,07 масс.%,  $B$  до 7,44 масс.%. Среднее содержание вольфрама и бора в нескольких образцах схоже, но фазовый состав неоднородный и может отличаться. Содержание бора в структурах неоднородно, по причине разной скорости охлаждения и формирования зародышевой фазы. В присопловой области, где скорость охлаждения протекает медленнее, рост кристаллов преимущественно имеет дендритный характер, длится дольше, а размер полученных структур в среднем составляет 5...20 мкм в поперечном сечении.

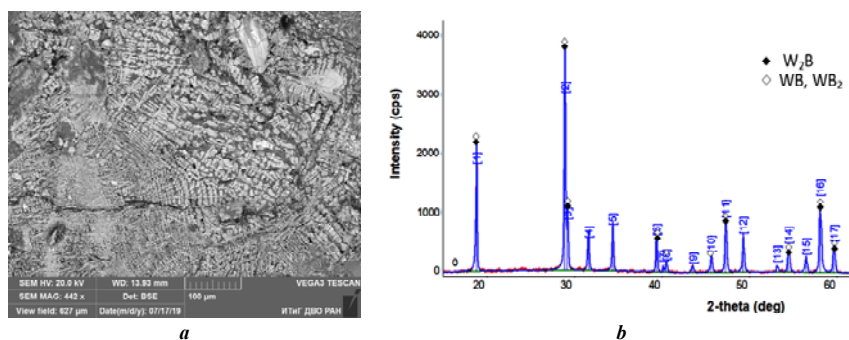


Рисунок 2 – Анализ образцов, полученных в ходе плазмохимического синтеза, где: *a* – спектральный анализ; *b* – рентгенофазовый анализ

Рентгенофазовый анализ образцов (рисунок 2, *b*) показал следующие фазовые состояния  $W_2B$ ,  $WB$  и  $WB_2$ . Содержание боридов системы  $W-B$  в полученном после плазмохимического синтеза материале, после ультразвуковой отчистки шлака составляет в среднем порядка 99,4 масс.%, среднее содержание бора в соединениях 5,98 масс.%.

Результаты работы показывают состоятельность проводимых исследований, плазмохимический синтез боридов вольфрама  $W-B$  позволяет получать мелкодисперсные кристаллы на подложке.

### Заключение

1. Получение результаты показывают состоятельность разрабатываемого метода получения боридов вольфрама системы  $W-B$  с применением низкотемпературной ВЧ-плазмы. Плазмохимический синтез в реакционной камере производится при удельной мощности потока плазмы  $10^4-10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. В ходе проведенных экспериментов получены бориды вольфрама с различным фазовым составом  $WB-WB_2-W_2B$ .

2. Кристаллы боридов вольфрама формируют дендроидные структуры, размер которых значительно отличается и зависит от скорости охлаждения. Кристаллы значительно меньше от 1...100 нм, при условии высокой скорости охлаждения, предположительно в присопловой области.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Жучков В.И., Леонтьев Л.И., Акбердин А.А. Применение бора и его соединений в металлургии. Новосибирск: ИД Академиздат, 2018. 156 с.
2. Гордиенко П.С., Пашнина Е.В., Ярусова С. Б. Комплексная переработка ильменитового концентрата // Химическая технология. 2019. Т. 20. № 14. С. 657–661.
3. Туманов Ю.Н. Плазменные, высокочастотные, микроволновые и лазерные технологии в химико-металлургических процессах. М.: Физматлит, 2010. 968 с.
4. Балахонов Д. И., Макаров И.А. Разработка способа получения боридов вольфрама методом плазмохимического синтеза // Наука. Технологии. инновации: Сб. научных трудов в 9 ч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. С. 218–221.
5. Николенко С.В., Верхотуров А.Д., Гостищев В.В., и др. Получение композиционных материалов на основе W2B5 для электроискровой наплавки. // Материаловедение. 1999. № 6. С. 48-51.
6. Ноздрин И. В. Разработка научных основ и технологии плазмометаллургического производства нанопорошков борида и карбида хрома : дисс. на соискание уч. степ. доктора тех. наук: 05.16.06: защищена 11 февраля 2016 г.: утв. 17.02.2016. Красноярск, 2016. 323 с. Библиогр.: С. 260–295.
7. Благоев А.Е., Васильев А.Л., Дмитриев В.П. Исследование особенностей микроструктуры монокристаллического бора // Кристаллография. 2017. Т. 62. № 5. С. 716–726.

УДК 514.13

Бао Фэньюань, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Baо Fengyuan, Graduate Student of Komsomolsk-na-Amure State University

Люй Лань, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Lyu Lan, Graduate Student of Komsomolsk-na-Amure State University

Башков Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой  
«Материаловедение и технология новых материалов», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Bashkov Oleg Viktorovich, Doctor of Sciences in Technology, Associate Professor, Head of the department “Materials Science and Technology of New Materials”, Komsomolsk-na-Amure State University

Башков Глеб Олегович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Bashkov Gleb Olegovich, Student of Komsomolsk-na-Amure State University

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ АЭ ПРИ ЗАРОЖДЕНИИ И РАСПРОСТРАНЕНИИ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ 1163 С МДО ПОКРЫТИЕМ**

#### **STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF AE SIGNALS DURING THE ORIGIN AND PROPAGATION OF FATIGUE CRACKS IN 1163 ALUMINUM ALLOY WITH MAO COATING**

Аннотация. В данной работе были проведены исследования алюминиевого сплава марки 1163 без покрытия и с покрытием, нанесенным на поверхность образцов методом микродугового оксидирования (МДО). Образцы подвергались циклическому нагруже-

нию с одновременной регистрацией сигналов акустической эмиссии (АЭ). Результаты экспериментальных исследований показали, что поведение усталостное повреждение может быть охарактеризовано параметрами сигналов АЭ. Так же было проведено исследование изменения механизмов усталостного повреждения за счет наличия МДО покрытия и анализ изменений параметров сигналов АЭ. Используя параметр акустической эмиссии  $K_{WD}$ , было выполнено прогнозирование усталостной долговечности алюминиевого сплава без покрытия и с МДО покрытием.

Abstract. In this work, uncoated and coated grade 1163 aluminum alloys were investigated. The coating was prepared on surface of the sample by micro-arc oxidation (MAO) method. The samples were subjected to cyclic loading with simultaneous recording of AE signals. The results of experimental studies have shown that the behavior of fatigue damage can be characterized by the parameters of AE signals. In addition, the changes in fatigue damage mechanism due to the presence of MAO coatings were also investigated and the changes in AE signal parameters were analyzed. Using the acoustic emission parameter  $K_{WD}$ , the fatigue life prediction of the aluminum alloy without coating and with MAO coating was performed.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, акустическая эмиссия, циклическое нагружение, магистральная трещина.

Key words: microarc oxidation, acoustic emission, cyclic loading, main crack.

### **Введение**

подавляющее большинство ключевых элементов, изготавливаемых из алюминиевых сплавов с защитным покрытием, нанесенным на поверхность методом микродугового оксидирования (МДО), применяются в машиностроении (авиационная, судостроительная и другие промышленности). Данные элементы подвергаются различным постоянным и переменным механическим нагрузкам. Одним из наиболее распространенных видов разрушений конструкций является усталостное разрушение, происходящее из-за накопления усталостных повреждений [1].

Наличие покрытия напрямую влияет на механизм зарождения и развития трещин, что усложняет характеризацию усталостного разрушения материала с твердым покрытием по существующим критериям оценки при помощи параметров сигналов акустической эмиссии (АЭ) [2]. Для решения данной проблемы было проведено исследование зарождения и развития усталостных трещин в алюминиевом сплаве 1163 с оксидным покрытием, нанесенным методом МДО в условиях циклического нагружения с регистрацией АЭ во время испытания [3].

### **Методика проведения эксперимента.**

Для проведения исследования использовался сплав дюралюминия марки 1163. Образцы изготавливались из листового материала толщиной 1,6 мм по форме двойной лопатки с размером рабочей части 1,6 мм × 2 мм × 20 мм. Для последующих механических испытаний образцы подвергались микродуговому воздействию в течение 40 минут в растворе электролита состава  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (13,65 г/л) + KOH (1,5 г/л) с одновременной регистрацией температуры электролита [4]. В качестве преобразователя АЭ использовался широкополосный датчик Globaltest GT301. Регистрация АЭ выполнялась на программно-аппаратном комплексе AE-Pro2.0. Циклические испытания проводились на лабораторной установке для определения усталостных характеристик при напряжении цикла 200 МПа.

### **Результаты и их обсуждение**

В данной работе был использован анализ с несколькими разрешениями (Multi-resolution analysis) [5], являющийся теоретической основой для разложения и реконструкции сигналов на основе вейвлета. Логарифм суммы среднеквадратичных отклонений восстановленных сигналов на всех 8 уровнях обозначается как  $K_{WD}$ , который позволяет охарактеризовать зарегистрированный сигнал АЭ по частотному признаку, и в совокупности с параметром энергии АЭ сигнала способен идентифицировать тип источника АЭ.



Сигналы АЭ, зарегистрированные при усталостном нагружении алюминиевого сплава марки 1163, отфильтрованы шумоподавлением домена вейвлета (*wavelet domain denoising*) и классифицированы по группам с использованием корреляции между параметром  $K_{WD}$  и энергией сигналов при предварительном анализе характеристик сигналов АЭ. Корреляция и классификация параметров сигналов АЭ по группам представлены на рисунке 1.

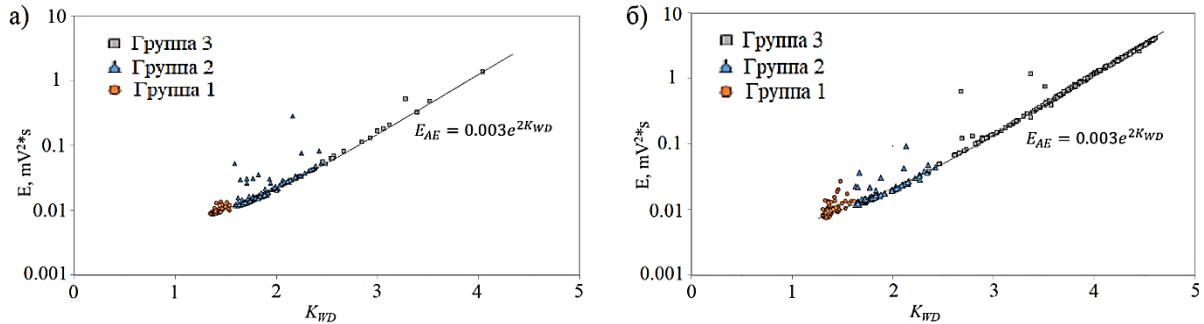


Рисунок 1 – Корреляция между параметром  $K_{WD}$  и энергией сигналов:  
а – без покрытия; б – с МДО покрытием

В соответствии с изменяющимися характеристиками численного значения  $K_{WD}$  весь процесс усталостного испытания в алюминиевом сплаве без покрытия и с МДО покрытием разделен на 3 основные стадии. По закономерности изменения значений параметра  $K_{WD}$  сигналов, и в совокупности с распределением стадий на графике зависимости резонансной частоты циклического нагружения от времени можно детально анализировать механизм повреждения в процессе усталостного разрушения алюминиевого сплава 1163 и влияние на него наличия МДО покрытия (рисунок 2).

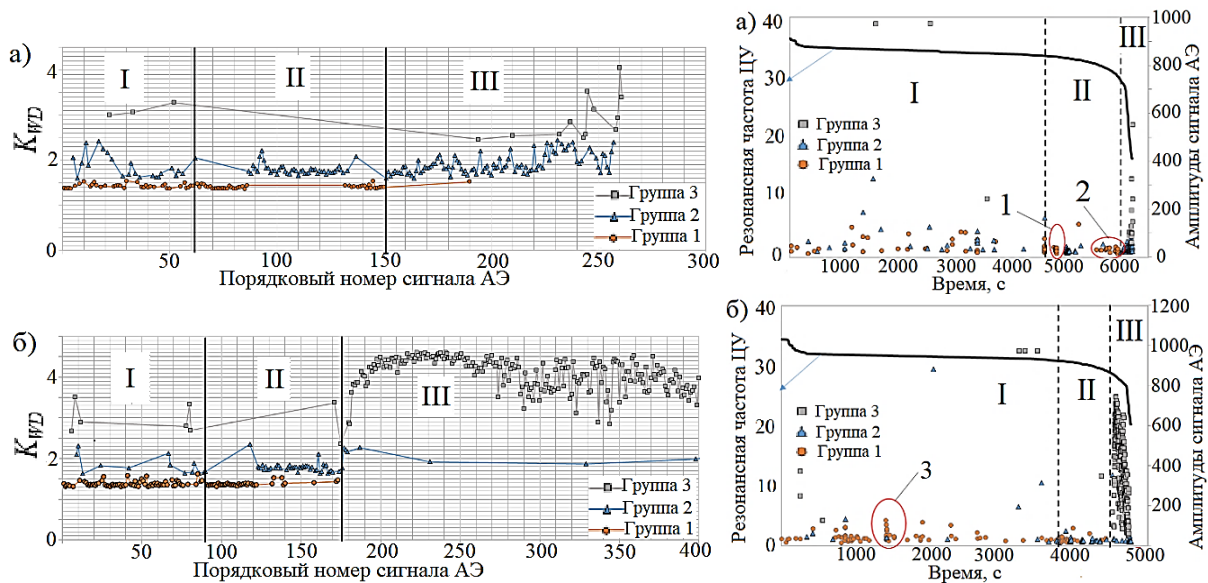


Рисунок 2 – Распределение параметра сигнала  $K_{WD}$  в соответствии с последовательностью сигналов АЭ для каждого образца и распределение амплитуды сигнала акустической эмиссии с резонансной частотой циклического нагружения по времени: а – без покрытия; б – с МДО покрытием

На стадии I циклической упругости в поверхностных слоях образцов с МДО покрытием происходит рост локальных напряжений в местах наибольшей концентрации дефектов МДО покрытия. Данный процесс, ввиду несовместности упругой деформации покрытия и матрицы, вызывает образование сетки квазипериодических трещин, распределенных по всей поверхности МДО покрытия [6]. При испытании алюминиевого сплава

без покрытия, сигналы в группе 1 на стадии II, регистрируются как предвестник развития магистральной трещины на стадии, составляющей 72 % от общей усталостной долговечности. При испытании образцов сплава с МДО покрытием данное явление проявляется немного позже – при достижении 75 % от общей усталостной долговечности.

### **Заключение**

Выполненные исследования показали влияние наличия МДО покрытия на особенности накопления усталостных повреждений алюминиевого сплава 1163 в условиях циклического нагружения.

Из проведенного исследования можно сделать вывод, что начальный процесс усталостного нагружения, ввиду несовместности упругой деформации покрытия и матрицы, вызывает образование сетки квазипериодических трещин. Развитие пластической деформации с высокой скоростью в локальных местах зарождения трещин МДО покрытия приводит к регистрации большого количества сигналов акустической эмиссии за короткий промежуток времени. Данное явление не происходит на начальном процессе усталостного нагружения алюминиевого сплава без покрытия. KWD в качестве параметра сигнала акустической эмиссии позволяет эффективно прогнозировать усталостную долговечность алюминиевых сплавов, анализируя резкое изменение его характеристик.

Была установлена возможность прогнозирования усталостного разрушения алюминиевого сплава с покрытием и без покрытия с помощью предложенного критерия оценки параметров АЭ, заключающегося в определении момента начала регистрации сигналов группы 1 на стадии II, как предвестника развития магистральной трещины.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-452.2022.4)»

### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Stanzl-Tschegg S.E., Mayer H. Fatigue and fatigue crack growth of aluminium alloys at very high numbers of cycles // *International Journal of Fatigue*. 2001. № 23. С. 231-237.
2. Башков О.В., Панин С.В., Семашко Н.А. Петров В.В, Шпак Д.А. Идентификация источников акустической эмиссии при деформации и разрушении стали 12Х18Н10Т // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2009. Т. 75. № 10. С. 51-57.
3. Беспалова Ж.И., Паненко И.Н., Дубовсков В.В., Козаченко П.Н., Кудрявцев Ю.Д. Исследование процесса формирования оптически черных оксидно-керамических покрытий на поверхности алюминиевого сплава 1160. 2012. № 5. С. 63– 66.
4. Bashkov O.V, Bao F., Li X., Bashkova T.I. Investigation of the Influence of Electrical Modes on the Morphology and Properties of Oxide Coatings on Aluminum Alloy 1163, Obtained by the Microarc Oxidation // *Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies*. Springer, Cham. 2021.С. 87-95.
5. Mallat S.G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation // *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 1989. Т. 11. № 7. С. 674-693.
6. Bashkov O.V., Panin S.V., Bashkova T.I., Byakov A.V., Popkova A.A., Shakirov I.V. Acoustic emission features at deformation of aluminum alloys with different strain behavior types // *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC. 2015. Т. 1683. № 1. С. 020023.

Беген Никита Николаевич, студент, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Begen Nikita Nikolayevich, student of Bauman Moscow State Technical University

Каракулов Руслан Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Karakulov Ruslan Alexandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Electronic Technologies in Mechanical Engineering”, Bauman Moscow State Technical University

## **ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ**

### **IMPROVING THE SURFACE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF STAINLESS STEEL**

Аннотация. В данной работе рассмотрены различные методы упрочнения нержавеющей стали AISI 304, 316, 316L и 321. Представлены характеристики образцов после низкотемпературного ионного (плазменного) науглероживания и азотирования, а также после их комбинирования. В результате анализа большого объема исследовательских работ в сфере химико-термической обработки выявлено, что оптимальным способом повышения трибологических характеристик поверхности указанных сталей является плазменная цементация с последующим азотированием при температуре 350 – 500 °С и продолжительностью 2 – 4 часа. Данная операция позволяет добиться высоких показателей твердости и износостойкости, не ухудшив коррозионную стойкость и пластичность сплавов AISI 304, 316, 316L и 321.

Abstract. In this paper, various methods of hardening AISI 304, 316, 316L and 321 stainless steels were considered. The characteristics of samples after low-temperature ionic (plasma) carburizing and nitriding, as well as after their combination, are presented. As a result of the analysis of a large amount of research work in the field of chemical-thermal treatment, it was found that the best way to improve the tribological characteristics of the surface of these steels is plasma carburizing followed by nitriding at a temperature of 350 – 500 °C and a duration of 2 – 4 hours. This operation achieves high hardness and wear resistance without compromising the corrosion resistance and ductility of AISI 304, 316, 316L and 321 alloys.

Ключевые слова: нержавеющая сталь, упрочнение, цементация, азотирование, нитроцементация, слой, износостойкость, коррозионная стойкость, S-фаза.

Key words: stainless steel, hardening, carburizing, nitriding, nitrocarburizing, layer, wear resistance, corrosion resistance, S-phase.

#### **Введение**

В ходе анализа научных работ в области упрочнения нержавеющей стали AISI 304, 316, 316L, 321 выбраны наиболее эффективные методы для улучшения трибологических свойств и повышения прочностных характеристик деталей, изготовленных из данных материалов. Основными способами обработки, позволяющими повысить твердость, прочность и износостойкость поверхностного слоя, сохранив при этом коррозионную стойкость, являются ионная цементация и азотирование, а также их комбинирование.

Указанные методы представляют собой химико-термическую обработку (ХТО), при которой образуется перенасыщенный углеродом или азотом слой аустенита, так называемый расширенный аустенит (S-фаза). S-фаза довольно тонкая (несколько десятков мкм), однако она отличается высокой твердостью, износостойкостью и корро-

зионной стойкостью. Основной упор в дальнейшем анализе делается на способах повышения описанных характеристик упрочненного слоя, а также на определении параметров обработки, от которых они зависят.

### **Основная часть**

**1. Ионная цементация.** Прочностные характеристики поверхности зависят от способа науглероживания. Основными параметрами в данной ситуации служат продолжительность и температура процесса.

От длительности ХТО напрямую зависит качество упрочненного слоя, т.е. чем дольше образец подвергается плазменной цементации (от 1 до 240 часов, т.к. в дальнейшем эффективность операции резко падает), тем толще и тверже получается расширенный аустенит. При ионной обработке нержавеющей сталей также наблюдается прямая взаимосвязь микротвердости и толщины поверхностного слоя от температуры. Для получения наиболее оптимальных трибологических характеристик необходимо проводить науглероживание при 300 – 550 °С, т.к. свыше 550 °С начинает разлагаться S-фаза, что приводит к выделению карбидов ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  и  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ), негативно влияющих на пластичность, ударную вязкость, прочность на растяжение и усталостное сопротивление.

Зависимость твердости и толщины от температуры операции и времени воздействия ХТО можно увидеть на рисунке 1 (b). Стоит отметить, чем плавнее переход по микротвердости от поверхности детали к ее сердцевине, тем пластичнее сталь.

Для оценки стойкости к истиранию упрочненного слоя используются такие показатели, как объем износа (величина, характеризующая общий объем материала, изношенного с поверхности детали) и скорость изнашивания (потеря объема на единицу силы за единицу расстояния, пройденного телом относительно другого тела).

В испытаниях на износостойкость можно увидеть тенденцию: чем больше температура и продолжительность науглероживания, следовательно, толще и тверже поверхностный слой, тем меньше объем и скорость изнашивания (рисунок 2 (b)).

К наглядным методам определения скорости окисления материала относится электрохимическое испытание в агрессивной среде (электролите). Для проверки деталей на коррозионную стойкость электрохимическим методом проводят их анодную поляризацию в потенциостатическом режиме.

После анодной поляризации образцов можно построить поляризационные кривые, показанные на рисунке 3, по которым определяется скорость коррозии, в частности питтингостойкость. Она зависит от электрического потенциала и плотности электрического тока. Питтингостойкость тем выше, чем выше показатели  $\Delta E_{pc}$ ,  $\Delta E_{gp}$ ,  $\Delta E_b$  (ГОСТ 9.912-89). Также о коррозионной стойкости можно судить по анодной плотности тока ( $i_a = I/S$ ), характеризующей скорость питтингования (чем ниже плотность тока, тем ниже этот показатель).

**2. Ионное азотирование.** Как и в случае с плазменным науглероживанием, конечные поверхностные свойства детали при азотировании зависят от температуры и времени. Температурный диапазон лежит в пределах 350 – 500 °С; при превышении максимального значения начинают ухудшаться пластичность, ударная вязкость, прочность на растяжение и усталостное сопротивление. Зависимость твердости изделия от температуры проведения процесса и толщины S-фазы такая же, как и при цементации (рисунок 1(a)).

При оценке износостойкости после плазменного азотирования опираются на объем и скорость изнашивания. Зависимость износа такая же, как и при цементации (рисунок 2 (a)).

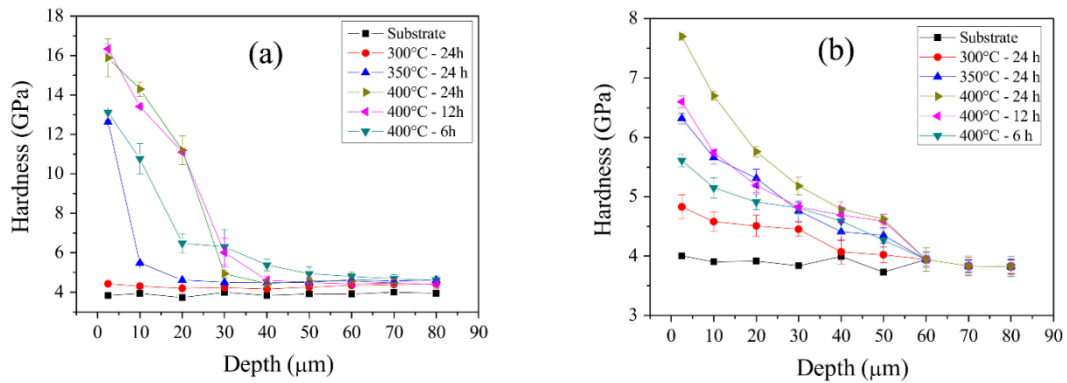


Рисунок 1 – Микротвердость образцов из стали AISI 316 после ионного азотирования (а) и науглероживания (б)

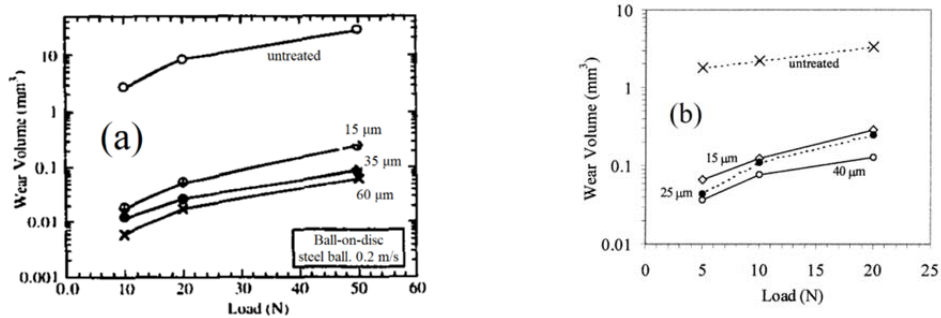


Рисунок 2 – Объем износа азотированных (а) и науглероженных (б) образцов в зависимости от приложенной нагрузки

Азотирование аустенитной стали 316 плазмой тлеющего разряда приводит к повышению стойкости поверхностного слоя к питтинговой коррозии. Азотированный слой имеет более высокое значение плотности тока в пассивном диапазоне (-0,1 – 0,25 В) и более низкое при 0,25 – 1,2 В (рисунок 3), что говорит о большей скорости коррозии упрочненных образцов AISI 316 в начальный момент испытаний и ее замедлении в конце.

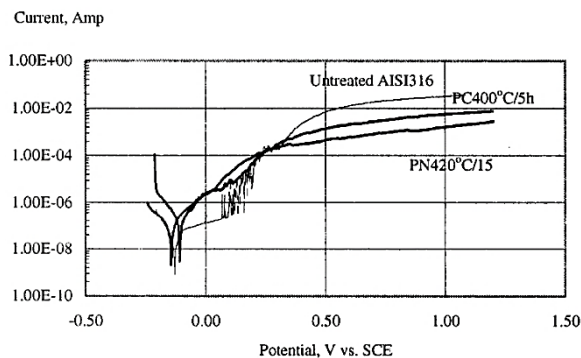


Рисунок 3 – Анодные поляризационные кривые необработанной (Untreated), азотированной (PN) и науглероженной (PC) AISI 316 в 1% растворе NaCl

**3. Комбинированные методы упрочнения и их сравнение.** Сопоставляя ионное азотирование и науглероживание можно заметить, что измененные поверхностные слои при первом методе ХТО обладают более высокой микротвердостью, но становятся тоньше и являются более хрупкими (из-за резкого перепада по твердости между слоями). Цементированные образцы остаются относительно пластичными, но их твердость заметно меньше. Чтобы избавиться от негативных эффектов обоих способов, можно использовать комбинированные методы упрочнения, представляющие собой совмещение вышеописанных процессов.

Выделяют следующие комбинации ХТО: нитроцементация (C + N) и плазменное науглероживание с последующим азотированием (C → N).

Основными показателями в сравнении различных ионных обработок будут считаться толщина S-фазы, твердость поверхности, износостойкость, пластичность и коррозионная стойкость. Данные характеристики сопоставлены на рисунках 4 и 5. Коэффициенты при наименовании ХТО означают продолжительность обработки в часах.

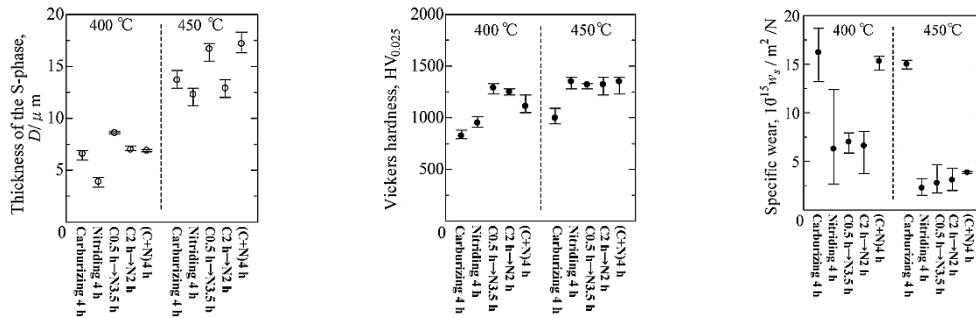


Рисунок 4 – Толщина (а), твердость (б) и удельный износ (с) слоя расширенного аустенита образцов из стали AISI 316L, подвергнутых различным низкотемпературным плазменным ХТО при температурах 400 °С и 450 °С

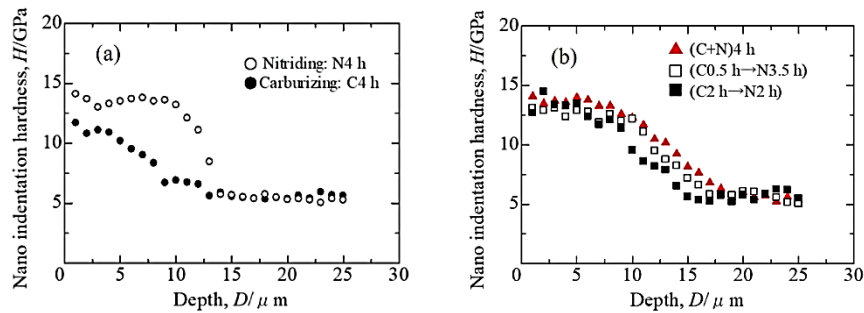


Рисунок 5 – Распределение твердости упрочненной стали AISI 316L по глубине после науглероживания, азотирования (а) и комбинированной ХТО (б)

Из графиков на рисунке 4 видно, что толщина S-фазы деталей с комбинированной обработкой больше толщины при азотировании, однако показатели микротвердости и износа практически не отличаются. Из всех методов наибольшей глубиной расширенного аустенита, наивысшей твердостью и износостойкостью обладает науглероживание с последующим азотированием (C → N). По плавности распределения твердости от поверхности к сердцевине можно судить о пластичности полученных образцов (рисунок 5).

На рисунке 6 представлены анодные поляризационные кривые слоя расширенного аустенита после различных ХТО. Все плотности тока упрочненных образцов при более чем 0,2 В были ниже, чем у необработанной стали, что говорит об их стойкости к воздействию агрессивной среды. Это объясняется тем, что низкотемпературная плазменная обработка поверхности AISI 316L повышает коррозионную стойкость за счет ингибирования точечной коррозии.

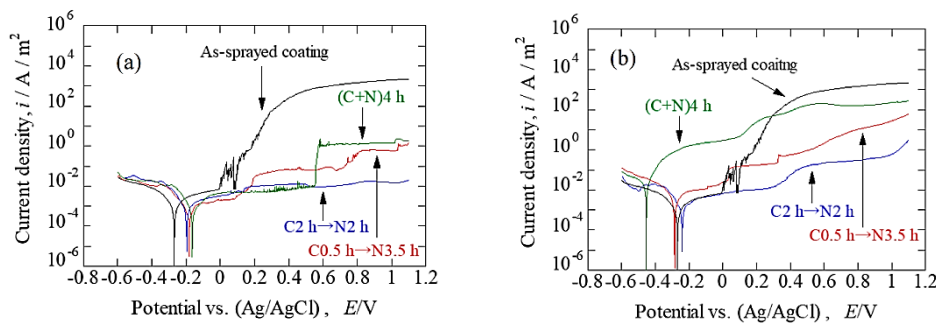


Рисунок 6 – Анодные поляризационные кривые в 3,5 % растворе NaCl слоев S-фазы упрочненного AISI 316L, полученных методами C0,5h→N3,5h, C2h→N2h и (C+N)4h при 400 °С (а) и 450 °С (б)

## **Заключение**

Таким образом, наилучшим вариантом для повышения трибологических характеристик нержавеющей стали AISI 304, 316, 316L, 321 является ионное науглероживание с последующим азотированием ( $C \rightarrow N$ ) при температуре 350 – 500 °С и времени обработки 2 – 4 часа. Сравнение данного метода с плазменной цементацией, азотированием и нитроцементацией показало, что  $C \rightarrow N$  позволяет значительно повысить микротвердость, уменьшить объем износа без ухудшения коррозионной стойкости. Кроме того, данный метод способствует более плавному переходу по твердости от поверхности к центру за счет особого распределения концентрации азота и углерода по толщине изделия, что сохраняет пластические свойства материала.

## **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Y Sun, T. Bell. Dry sliding wear resistance of low temperature plasma carburized austenitic stainless steel //Wear. – 2002. – Volume 253. – Pages 689-693.
2. Y. Sun, T. Bell. Sliding wear characteristics of low temperature plasma nitrided 316 austenitic stainless steel // Wear. – 1998. – Volume 218. – Pages 34-42.
3. S. Thaiwatthana, X. Y. Li, H. Dong, T. Bell. Comparison Studies on Properties of Nitrogen and Carbon S Phase on Low Temperature Plasma Alloyed AISI 316 Stainless Steel // Surface Engineering. – 2002. – Volume 18. – Pages 433-437.
4. Ane C. Rovani, Rogério Breganon, Gismar S. de Souza, Silvio F. Brunatto, Giuseppe Pintaúde. Scratch resistance of low-temperature plasma nitrided and carburized martensitic stainless steel // Wear. – 2017. – Volumes 376–377. – Pages 70-76.
5. Adachi, S.; Ueda, N. Wear and Corrosion Properties of Cold-Sprayed AISI 316L Coatings Treated by Combined Plasma Carburizing and Nitriding at Low Temperature // Coatings – 2018. – Volume 8. – Issue 12.

УДК 620.18

Белова Инна Валерьевна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Belova Inna Valerevna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

Таирова Алена Александровна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Tairova Alena Aleksandrovna, student of Komsomolsk-na-Amure State University

## **ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЧИН НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОВЕДЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ УГЛОВОГО ПРОКАТА**

## **IDENTIFICATION OF THE CAUSES OF UNSATISFACTORY RESULTS OF THE TESTS OF ANGULAR PRODUCTS**

Аннотация. После проведения испытаний на загиб углового проката были получены неудовлетворительные результаты. В статье представлены исследования по выявлению причин, вследствие которых образцы не выдержали испытания. Представлены данные микроструктурного анализа. В выводе дается заключение о совокупности факторов, влияющих на исход испытаний.

Abstract. Unsatisfactory results were obtained after the bending tests of the corner bars. The article presents studies to identify the reasons due to which the samples did not pass the test.

The data of microstructural analysis are presented. The conclusion gives a conclusion about the totality of factors influencing the outcome of the tests.

Ключевые слова: микроструктура, механические свойства, разрушение.

Key words: microstructure, mechanical properties, destruction.

### **Введение**

Проведено микроисследование металла проб углового проката  $\angle 50 \times 50 \times 5$  (сталь Ст3сп), получивших неудовлетворительные результаты после проведённых технологических испытаний на загиб.

### **1 Визуальный осмотр**

На рисунке 1 представлен общий вид образцов

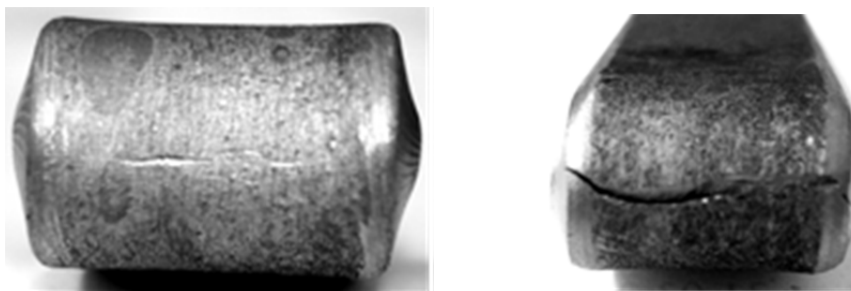


Рисунок 1 – Общий вид образцов

На фото видно, что на поверхности образцов после загибов образовались надрывы и трещины, что свидетельствует о том, что образцы не выдержали испытания и не соответствуют требованиям ГОСТ.

Для проведения микроструктурного анализа из образцов были изготовлены шлифы, содержащие поверхность с несплошностями.

### **2 Микроструктурный анализ**

При микроисследовании металла образцов выявлено следующее:

1 Неметаллические включения соответствуют 4 баллу пятибалльной шкалы ГОСТ 1778, характеризуются как силикаты хрупкие, имеют строчечное расположение и располагаются близко к поверхности на глубине 0,10 мм (рисунок 2);

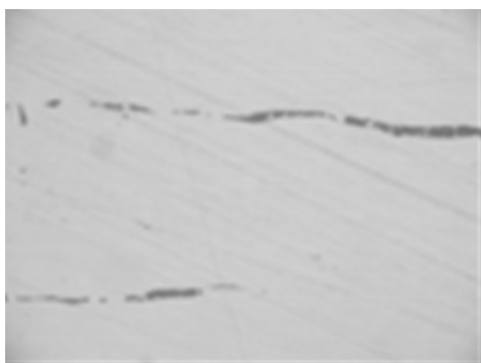


Рисунок 2 – Грубые хрупкие силикаты

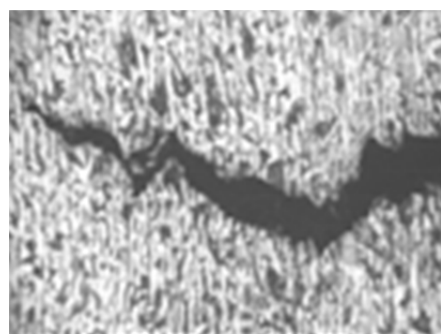


Рисунок 3 – Вид трещины напряжения

2 Транскристаллитные трещины расположены под прямым углом к поверхности с тонкими концами, изменения в структуре, скопления неметаллических включений и ликвации легкоплавких элементов отсутствуют. Дефекты носят напряжённый характер, который усугубляется полученной структурой и близко расположенными к поверхности грубыми и протяженными неметаллическими включениями (рисунок 3);



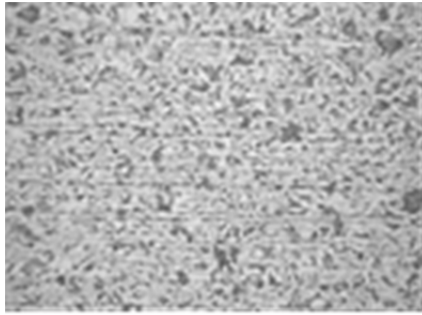


Рисунок 4 – Полосчатость структуры



Рисунок 5 – Блоки крупных зерен

3 Микроструктуру можно считать неудовлетворительной по следующим характерным признакам — полосчатость структуры, соответствующая 4 баллам шкалы ГОСТ 5640; наличие блоков крупного зерна с размером до 5 балла шкалы ГОСТ 5639 при основном размере зерна, соответствующего 9÷7 баллов (рисунки 4 и 5);

4 Видманштеттова структура оценивается в 2,5 балла шкалы ГОСТ 5640, что также свидетельствует о перегреве металла.

#### **Выводы**

Неудовлетворительные результаты, полученные при технологических испытаниях на загиб проб углового проката  $\angle 50 \times 50 \times 5$  из стали СтЗсп объясняются совокупностью факторов:

1) Наличием в металле строччнорасположенных грубых хрупких силикатов, которые имеют незначительную глубину залегания (0,10 мм) и являются концентраторами напряжений;

2) Неудовлетворительной микроструктурой металла, способствующей неоднородности механических свойств, а именно - полученной при прокатке повышенной полосчатостью и соответствующими перегретому состоянию признаками: разнотернистостью и участками с видманштеттовой структурой;

3) Полученная микроструктура металла углового проката свидетельствует о таких нарушениях температурного режима прокатки, как увеличение температуры и времени выдержки заготовки в печи или повышенной температуре конца прокатки.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-452.2022.4)»

#### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Ким В.А., Лиманкин В.В., Марин Б.Н. и др. Количественная оценка зеренной структуры конструкционных сталей при пластической деформации и рекристаллизационном отпуске //Ученые записки КнАГТУ, 2012. № II. С. 83 – 88.

2. Брянский А.А., Башков О.В., Белова И.В., Башкова Т.И. Исследование развивающихся повреждений при изгибном нагружении полимерных композиционных материалов и их идентификация методом акустической эмиссии// Frontier Materials & Technologies. 2022. № 2. С. 7-16.

3. Белова И.В. Количественный анализ деградации структуры змеевика П-1-201 из стали 08X18H10T //Упрочняющие технологии и покрытия, 2022. Т. 18. № 5 (209). С. 195-199.

Божоев Илгиз Чыныбаевич, магистрант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Bozhoev Ilgiz Chynybaevich, Undergraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University

Сапожник Ксения Романовна, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Sapozhnik Ksenia Romanovna, Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University

Башкова Татьяна Игоревна, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Bashkova Tatiana Igorevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University

Башков Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Bashkov Oleg Vktorovich, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University

### **КИНЕТИКА СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СТАЛИ 45 ПРИ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ**

### **KINETICS OF STRYCTURAL CHANGES IN STEEL 45 UNDER SUPER HIGH CYCLE LOADING**

Аннотация. Работа посвящена исследованию структурных изменений и механических свойств стали 45 в условиях объемной ультразвуковой обработки в режиме сверхмногоциклового усталости. Образцы из стали 45 подвергались циклическим испытаниям ультразвуковой установкой, созданной в лаборатории на базе ультразвукового генератора номинальной мощностью 1 кВт. В образцах, изготовленных по расчетной модели, возбуждались стоячие волны ультразвуковой частотой 20 кГц и осуществлялось растяжение-сжатие с максимальной амплитудой 211,5 МПа. Увеличение амплитуды напряжения, вызванного ультразвуковым воздействием, приводит к увеличению микротвердости вблизи зоны максимальных напряжений, но имеет немонотонный характер. Снижение плотности границ зерен в зоне действия максимальных напряжений связано со смещением приграничных дислокаций ближе к границам зерен, что приводило к их уплотнению.

Abstract. The paper is dedicated to the study of structural changes and mechanical properties of steel 45 in conditions of volume ultrasonic processing in the mode of very high cycle fatigue. Specimens of steel 45 were subjected to cyclic tests by an ultrasonic unit created in the laboratory on the basis of an ultrasonic generator with nominal output 1 kW. In the specimens made according to the calculation model stationary waves were excited at an ultrasonic frequency of 20 kHz and tension-compression were carried out with a maximum amplitude of 211.5 MPa. An increase in the stress amplitude caused by ultrasonic action leads to an increase in microhardness near the zone of maximum stresses, but it has a nonmonotonic character. The decrease in the density of grain boundaries in the zone of action of maximum stresses is associated with the displacement of near-boundary dislocations closer to the grain boundaries, which led to their compaction.

**Ключевые слова:** сверхмногоцикловая усталость, микротвердость, упрочнение, плотность границ зерен, ультразвуковая обработка.

**Key words:** very high cycle fatigue test, microhardness, hardening, grain boundary density, ultrasonic treatment

## Введение

Определение природы структурных изменений материала, формируемых в процессе ультразвукового воздействия и при накоплении усталостных повреждений, является одной из актуальных фундаментальных проблем для различных областей приложений, особенно если говорить о сверхмногоцикловой [1-5] усталости в условиях ультразвукового воздействия. Влияние случайных статических или динамических нагрузок на долговечность материалов в условиях ультразвукового воздействия, а также формирования сверхмногоцикловой усталости вызывает в настоящее время большой интерес в авиационном машиностроении в связи с необходимостью оценки ресурса (долговечности), например, лопаток газотурбинных двигателей в условиях эксплуатации, сопровождающихся соударением с твердыми частицами [6-10].

На сегодняшний день наиболее перспективными областями исследований и применения ультразвуковых технологий обработки являются следующие:

- 1) снятие остаточных напряжений посредством ультразвуковой ударной обработки в сварных соединениях [3];
- 2) повышение равновесности структуры в деформированных материалах, а также объемных наноструктурированных материалах, полученных методами интенсивной пластической деформации [4];
- 3) ультразвуковое ударное упрочнение, реализуемое через схему поверхностно-пластического деформирования [5];
- 4) применение ультразвукового воздействия в процессе осуществления усталостных испытаний при сверхмногоцикловом режиме нагружения материалов [6].

Большинство из приведенных методов обработки направлены на изменения в поверхностных и приповерхностных слоях. Несмотря на то, что особенности воздействия на материал при создании в нем мощных ультразвуковых полей достаточно хорошо изучены, тем не менее, характер структурных изменений, происходящих в процессе объемного ультразвукового воздействия в настоящее время раскрыт недостаточно. Представление о совокупности процессов и механизмов их протекания в структуре материала от момента начала ультразвукового нагружения вплоть до разрушения материала может дать изучение поведения материалов в условиях усталостных испытаний в режиме сверхмногоциклового нагружения, в основе которого лежит объемное ультразвуковое воздействие.

## Материалы и методы

В качестве исследуемого материала выбрана нормализованная сталь 45 в состоянии поставки. Все образцы выполнялись из одной партии стального проката. Сталь 45 – широко применяемый конструкционный материал в силу своих эксплуатационных свойств при невысокой стоимости. Высокая обрабатываемость резанием позволяет легко варьировать размеры изготавливаемых образцов. Для проведения обработки была разработана и сконструирована ультразвуковая установка [11]. После предварительных испытаний по подбору напряжения, при котором материал выдержит максимальное количество циклов, соответствующих сверхмногоцикловому диапазону, была проведена обработка образцов при амплитуде напряжения растяжения сжатия в центре образца – 211,5 МПа. При данном напряжении испытанные образцы выдержали  $3,66 \cdot 10^8$  и  $3,98 \cdot 10^8$  циклов, что соответствовало достижению сверхциклового диапазона. Анализ структурных изменений и влияния ультразвукового воздействия на структуру материала образцов выполнялся с использованием параметра плотность границ зерен  $q$  [12-14]. Параметр рассчитывается по формуле:

$$q_i = \frac{P_i}{F_i}, \quad (1)$$

где  $P_{cp}$  – средний периметр по всем зернам;  $F_{cp}$  – средняя площадь по всем зернам, зафиксированным на одной цифровой фотографии микроструктуры.

### Экспериментальный стенд для проведения испытаний на усталость

Для обеспечения возможности выполнения сверхмногоцикловых испытаний образцов в центре коллективного пользования «Новые материалы и технологии» была разработана система для выполнения данных испытаний на базе ультразвукового генератора и излучателя мощностью 1 кВт. В качестве оборудования для реализации испытательного стенда были выбраны: высокочастотный генератор и излучатель, концентратор ультразвуковых колебаний, образцы для выполнения испытаний, а также система регистрации колебаний на лазерном интерферометре (рис.1).



Рисунок 1 – Фото экспериментального стенда для проведения испытаний на усталость

В ходе выполнения научно-исследовательской работы был выполнен расчёт различных ультразвукового концентратора и форм образца [15]. Путём моделирования различных вариантов форм концентраторов было установлено, что оптимальной формой концентратора с максимальным значением амплитуды является катеноидальный концентратор. Оптимальной формой образца был признан образец галтелевидной формы, совмещающий в себе 2 катеноидальные области в центральной части и их цилиндрическое удлинение с обоих краёв (рис. 2). Расчетная рабочая частота для этих форм составила 20660 Гц.

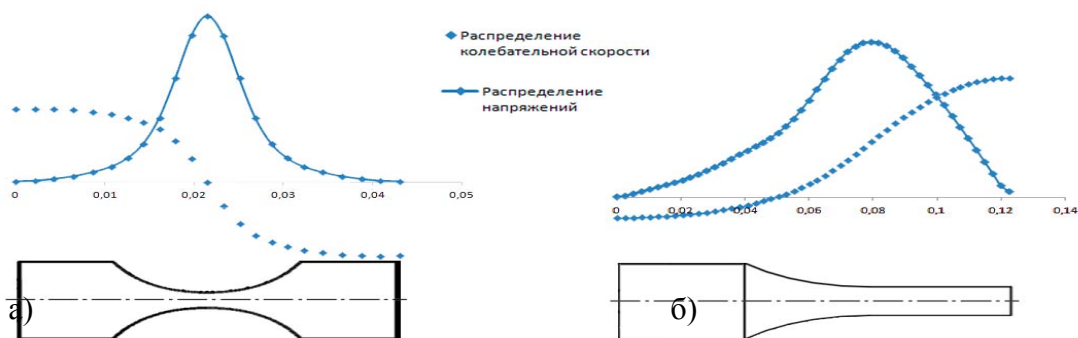


Рисунок 2 – Распределения напряжений и колебательной скорости по длине образца (а) и концентратора (б)

### Результаты исследования

Ультразвук активно воздействует на микроструктуру поликристалла, активно взаимодействуя с дефектами кристаллической решетки, в том числе расположенных по границам зерен. Ультразвуковое воздействие, может способствовать росту вакансионной подвижности и смещению вакансий вглубь кристаллов, увеличению самоорганизации дислокаций, а также увеличению возможности поперечного скольжения [16, 17]. Увеличение уровня циклических напряжений может привести к повышению пластич-

ности материала, связанному с поперечным скольжением, а дальнейшее увеличение напряжения – к снижению пластичности, вызванному повышением плотности дислокаций [19].

Изменение структурного состояния образцов под ультразвуковым воздействием приводит к повышению микротвердости стали 45. Зависимость изменения микротвердости от расстояния, определяемого максимальной амплитудой циклического нагружения, приведена на рис. 3. На диаграмме также приведено распределение напряжений по сечениям образца по мере удаления от зоны максимальных напряжений, то есть от центральной части образца.

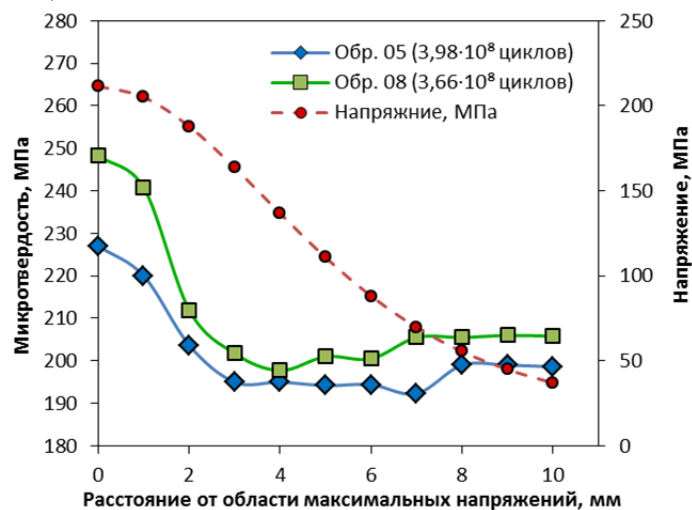


Рисунок 3 – Зависимость микротвердости и распределения напряжения в сечении образцов от расстояния, определяемого максимальной амплитудой циклического нагружения

Выявленная зависимость показывает, что в сечениях образцов, где амплитуда цикла напряжения не превышала 70-90 МПа, наблюдается стабильная твердость образцов на уровне 200-205 МПа. Повышение уровня напряжений в сечениях до 160 МПа приводит к небольшому снижению твердости на 5-7 МПа. Дальнейшее увеличение напряжений до максимальной амплитуды 211,5 МПа в центре образца приводит к значительному росту твердости до 227 МПа в образце, подвергнутом  $3,98 \cdot 10^8$ , и 248 МПа – в образце, подвергнутом  $3,66 \cdot 10^8$  циклов нагружения. Таким образом, можно говорить о нелинейном характере распределения твердости по сечениям образцов, подвергнутых ультразвуковому сверхмногоцикловому нагружению.

Количественный анализ структурных изменений в образцах после ультразвукового воздействия был выполнен по распределению параметра структурной организации  $q$ . Параметр  $q$ , представляет собой расчетное значение плотности границ зерен, график распределения которого строится по группам объектов, выделяемым по методике количественной компьютерной металлографии, описанной в [12]. График представляет собой диаграмму плотности распределения параметра  $q$  в зависимости от значения  $q$ . На рис. 4 представлена диаграмма плотности распределения плотности границ зерен, построенная по цифровым фотографиям микроструктур образца, подвергнутого  $3,98 \cdot 10^8$  циклам ультразвукового воздействия. На графике приведены только два распределения, построенные для сечений, отстоящих от места максимальных напряжений на расстояниях 1 мм и 9 мм, что соответствовало 205 МПа и 45 МПа. Графики для остальных сечений не приведены, чтобы не пересыщать диаграмму.

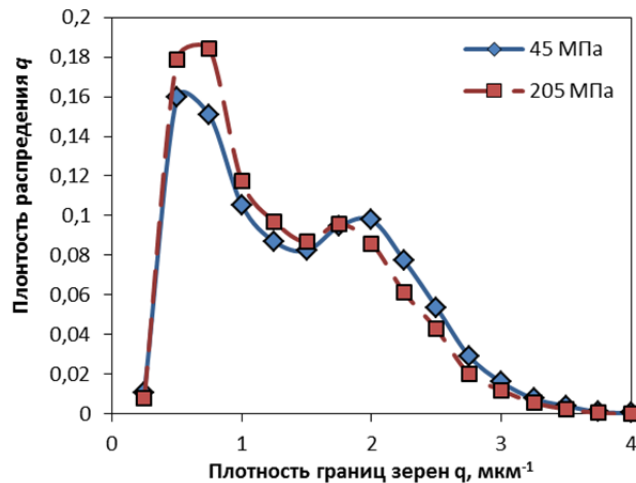


Рисунок 4 – График плотности распределения параметра  $q$  для образца, подвергнутого  $3,98 \cdot 10^8$  циклам ультразвукового воздействия

По графику виден бимодальный характер распределения плотности границ зерен, что характерно для неравновесной структуры. Повышение амплитуды напряжения ультразвуковой обработки приводит к увеличению доли зерен с меньшим значением плотности границ зерен  $q$  и смещению второго малого пика бимодального распределения в сторону меньших значений. Отмеченное на графике свидетельствует о том, что при увеличении амплитуды напряжения плотность границ зерен снижается. По данным математического моделирования, представленным в работе [19], это может быть связано со смещением приграничных и внутризеренных дислокаций ближе к границе зерна. Происходит некоторое «очищение» приграничной области и выравнивание границ зерна при определенном сочетании напряжения цикла ультразвукового воздействия и первичного неравновесного состояния.

#### Заключение

Проведенные исследования показали, что ультразвуковое воздействие, оказываемое на поликристаллическую среднеуглеродистую сталь 45 при сверхмногоцикловом нагружении, приводит к изменению механических свойств и микроструктуры. Твердость материала имеет немонотонную зависимость от амплитуды напряжений и повышается вблизи сечений с максимальным уровнем напряжений. Увеличение амплитуды напряжения, создаваемого ультразвуковым воздействием, способствует снижению плотности границ зерен, вызванному смещению приграничных дислокаций ближе к границе зерен, уплотняя их.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке гранта государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-452.2022.4).

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ботвина Л.Р. Гигацикловая усталость - новая проблема физики и механики разрушения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2004. Т. 70, № 4. С. 41.
2. Масштабная инвариантность роста усталостной трещины при гигацикловом режиме нагружения / В.А. Оборин, М.В. Банников, О.Б. Т. Наймарк, Palin-Luc // Письма в журнал технической физики. 2010. Т. 36. Вып. 22. С. 76-82.
3. Cowles V.A. High cycle fatigue in aircraft gas turbines -an industry perspective // International Journal of Fracture. 1996. V. 80. P. 147-163.
4. Шанявский А.А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергика в авиации. - Уфа: Монография, 2007. - 500 с.

5. Nicholas T. High Cycle Fatigue // A Mechanics of Material Perspective. - Elsevier, 2006. - 641 p.
6. Peters J.O., Ritchie R.O. Influence of foreign object damage on crack initiation and early crack growth during high-cycle fatigue of Ti-6Al-4V // Eng. Fract. Mech. 2000. V. 67. P. 193-207.
7. Spanrad S., Tong J. Characterisation of foreign object damage (FOD) and early fatigue crack growth in laser shock peened Ti-6Al-4V aerofoil specimens // Materials Science and Engineering A. 2011. V. 528. P. 2128-2136.
8. Oakley S.Y., Nowell D. Prediction of the combined high-and low-cycle fatigue performance of gas turbine blades after foreign object damage // International Journal of Fatigue. 2007. V. 29. P. 69-80.
9. Chen Xi Foreign object damage on the leading edge of a thin blade // Mechanics of Materials. 2005. V. 37. P. 447-457.
10. Nowell D., Duo P., Stewart I.F. Prediction of fatigue performance in gas turbine blades after foreign object damage // International Journal of Fatigue. 2003. V. 25. P. 963-969.
11. Сапожник К.Р., Башков О.В. Разработка установки для проведения ультразвуковых усталостных испытаний // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : материалы Международной науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 7-11 февраля 2022 г. / редкол. : Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на- Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – 550 с.
12. Ким, В.А. Основы количественной и компьютерной металлографии : учеб. пособие / В. А. Ким, О. В. Башков, А. А. Попкова – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2013. – 132 с.
13. Ким В.А., Белова И.В., Золотарева С.В. Количественные показатели структурной организации поликристаллических материалов// Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2014. - Т. 80. - № 4. - С. 43-46.
14. Ким В.А., Белова И.В. Структурная организация межзёренных границ при локальном лазерном легировании// Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2019. Т. 1. № 1. С. 61-69.
15. Sapozhnik K.R., Bashkov O.V., Borisenko M.D., Solovov D.B. Modelling of ultrasonic concentrators for processing of volume nanostructured materials// Materials Science Forum. 2020. V. 992. P. 940-946.
16. Dmitriev S.V., Pshenichnyuk A.I., Iskandarov A.M., Nazarova A.A. Resonant interaction of edge dislocations with running acoustic waves// Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 2010. V.10. No 18. P. 025012.
17. Nazarova A.A., Dmitriev S.V., Baimova Yu.A., Mulyukov R.R., Nazarov A.A. Computer simulation of the effect of ultrasound and annealing on the structure of a two-dimensional severely deformed nanocrystalline material // The Physics of Metals and Metallography. 2011. V. 111. No 5. P.513.
18. Самигуллина А.А., Царенко Ю.В., Рубаник В.В., Попов В.А., Даниленко В.Н., Мулюков Р.Р. Влияние ультразвуковой обработки на структуру и механические свойства ультрамелкозернистого никеля, полученного равноканальным угловым прессованием// Письма о материалах. 2012. Т. 2. С. 214-217.
19. Мурзаева Р. Т., Бачурина Д. В., Назарова А. А. Моделирование воздействия ультразвука на дислокационную структуру деформированного поликристалла// Физика металлов и металловедение. 2018. Т. 119. № 10. С. 1050–1060.

Бойко Светлана Андреевна, аспирант, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева

Boiko Svetlana Andreevna, Postgraduate, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

Ковшова Татьяна Сергеевна, кандидат фармацевтических наук, младший научный сотрудник лаборатории систем доставки лекарственных веществ, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева

Kovshova Tatyana Sergeevna, Candidate of Pharmaceutical Sciences, Research Assistant of Laboratory of Drug Delivery Systems, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

Осипова Надежда Сергеевна, старший научный сотрудник лаборатории систем доставки лекарственных веществ, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева

Osipova Nadezhda Sergeevna, Senior Research Officer of Laboratory of Drug Delivery Systems, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

Гельперина Светлана Эммануиловна, доктор химических наук, заведующая лабораторией систем доставки лекарственных веществ, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева

Gelperina Svetlana Emmanuilovna, Doctor of Chemical Sciences, Head of Laboratory of Drug Delivery Systems, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

## **НАНОЧАСТИЦЫ НА ОСНОВЕ АЛЬБУМИНА ДЛЯ СО-ДОСТАВКИ ПАКЛИТАКСЕЛА И ПРОИЗВОДНОГО ЭТОПОЗИДА, СОДЕРЖАЩИЕ ФЛЮОРЕСЦЕНТНУЮ МЕТКУ: ПОЛУЧЕНИЕ И БИОВИЗУАЛИЗАЦИЯ**

### **FLUORESCENT-LABELED ALBUMIN-BASED NANOPARTICLES FOR CO-DELIVERY OF PACLITAXEL AND ETOPOSIDE DERIVATIVE: PREPARATION AND BIOVISUALIZATION**

Аннотация. Получение наносuspензий труднорастворимых лекарственных веществ (ЛВ), стабилизированных альбумином, является подходом к созданию их инъекционных форм. Целью настоящего исследования было получение наночастиц на основе человеческого сывороточного альбумина (ЧСА), содержащих комбинацию противоопухолевых агентов (паклитаксел и 4'-О-бензилоксикарбонильное производное этопозиды в массовом соотношении 1:1) и флуоресцентную метку, с использованием принципов nab™ технологии (от англ. Nanoparticle albumin-bound). Общее содержание ЛВ в суспензии составило ~ 1,6 мг/мл. Частицы обладали средним размером 130-140 нм и отрицательным ζ-потенциалом поверхности. Для визуализации наночастиц с помощью флуоресцентной микроскопии использовали ЧСА, конъюгированный с красителями, в том числе флуоресцеин изотиоцианат (FITC) или родамин В изотиоцианат (RBITC). Показана интернализация флуоресцентно-меченых систем со-доставки в клетки аденокарциномы молочной железы мыши 4T1.

Abstract. Nanosuspensions of sparingly soluble drugs stabilized with albumin is a promising approach to the development of their injectable formulations. The objective of this study was to obtain the fluorescently labeled nanoparticles based on human serum albumin (HSA) containing a combination of antitumor agents (paclitaxel and 4'-O-benzyloxycarbonyl derivative of etoposide in a 1:1 mass ratio) using the principles of nab™ technology (nanoparticle albumin-bound). The total content of drugs in the suspension was ~ 1.6 mg/mL. The particles had an average size of 130–140 nm and a negative surface ζ-potential. For visualization, HSA was conjugated with fluorescein isothiocyanate (FITC) or rhodamine B isothiocyanate (RBITC)



dyes. The intracellular uptake of the fluorescently labeled co-delivery systems was demonstrated using the 4T1 mouse mammary adenocarcinoma cell culture.

Ключевые слова: паклитаксел, пролекарство этопозид, флуоресцентно-меченые наночастицы, человеческий сывороточный альбумин, флуоресцентная микроскопия.

Key words: paclitaxel, etoposide prodrug, fluorescently labeled nanoparticles, human serum albumin, fluorescence microscopy.

## **Введение**

Плохая растворимость фармацевтических субстанций в воде (около 40% принадлежат ко II и IV классам в соответствии с биофармацевтической классификацией, БКС) обуславливает низкую биодоступность при пероральном приеме и является препятствием для парентерального введения [1]. Получение наносuspензий, стабилизированных альбумином, является одним из подходов к созданию инъекционных форм труднорастворимых веществ. Nab<sup>TM</sup> технология (от англ. Nanoparticle albumin-bound), успешно применяемая при получении препарата Abraxane<sup>®</sup> (nab<sup>TM</sup>-paclitaxel, Celgene Corporation), одобренного FDA в 2006 г. для лечения метастатического рака молочной железы (РМЖ) [2, 3], имеет большой потенциал для широкого применения в области доставки противоопухолевых агентов. Наличие в молекуле сывороточного альбумина нескольких сайтов связывания лекарственных веществ (ЛВ) различной природы [4] свидетельствует о возможности применения этой технологии для получения инъекционных форм других противоопухолевых агентов, в частности, доксорубина [5], доцетаксела [6] и пр.

Вследствие этого интересным представляется получение на основе nab<sup>TM</sup> технологии систем одновременной доставки (со-доставки) нескольких ЛВ с различным механизмом действия. Эффективность комбинации паклитаксела и этопозид (II класс БКС) в составе различных наноразмерных носителей, ранее продемонстрирована в экспериментах *in vitro* / *in vivo* [7], однако системы на основе альбумина не были описаны. Кроме того, ЧСА содержит в своём составе большое количество свободных функциональных групп, которые способны реагировать с образованием ковалентных связей, в том числе, с флуоресцентными красителями. Флуоресцентные фрагменты на носителе ЛВ могут позволить наряду с доставкой действующего вещества осуществить визуализацию процесса интернализации частиц *in vitro* или их биораспределения *in vivo* [8]. Таким образом, целью настоящего исследования было получение флуоресцентно-меченых наночастиц на основе человеческого ЧСА, содержащих паклитаксел и гидрофобное 4'-О-бензилоксикарбонильное производное этопозид (ETP-Cbz) с использованием принципов nab<sup>TM</sup> технологии.

## **Материалы**

Паклитаксел (99,81%, Shanghai Jinhe Bio-Technology Co., Ltd, Китай); этопозид (100%, QILI ANTIBIOTICS, Китай); раствор человеческого сывороточного альбумина (ЧСА, 20%, Плазбумин-20<sup>®</sup>, Grifols Therapeutics Inc., США); бензилхлорформиат, триэтиламин (Et<sub>3</sub>N) (Sigma-Aldrich Corporation, США); PBS в таблетках (MP Biomedicals, LLC, США); красители: Fluorescein 5(6) isothiocyanate, (FITC, Sigma-Aldrich, США), Rhodamine B isothiocyanate (RBITC, Thermo Fisher scientific, США). В работе использовали органические растворители и соли категорий «для ВЭЖХ» или «хч». Для отмывки НЧ использовали Sephadex G-25 (Sigma, Германия).

## **Методы**

Получение флуоресцентно-меченного ЧСА. Изотиоцианаты FITC и RBITC селективно взаимодействуют с N-концевыми аминокислотными группами белков. Реакция протекает с атакой нуклеофила на электрофильный атом углерода изотиоцианатной группы [9]. Затем между FITC/RBITC и белком образуется тиомочевинная связь. Для получения ЧСА-FITC 3,6 мг FITC в ДМСО (4 мг/мл) добавляли к раствору ЧСА (30 мг/мл, приго-

товлен путем разведения 20 % раствора альбумина) в свежем карбонатном буфере (0,1 М, рН 9,0) в мольном соотношении 1:1 с последующей инкубацией в течение 1 ч в темноте при комнатной температуре и непрерывном перемешивании, а затем 24 ч при 5 °С. После 1 ч инкубации с хлоридом аммония конъюгат очищали гельпроникающей фильтрацией (Sephadex G-25; элюент: 0,15 М фосфатный буфер с рН 7,4), раствор лиофильно высушивали. Для расчета содержания альбумина и соотношения F/P (dye/protein ratio) измеряли величину поглощения разбавленного раствора при 494 и 280 нм:

$$c(\text{ЧСА}) (M) = \frac{(A_{280} - A_{494}) \times 0.3}{36500} \times \text{разбавление} \quad (1)$$

$$F/P = \frac{A_{494}}{68000 \times c(\text{ЧСА})} \times \text{разбавление} \quad (2)$$

Для получения ЧСА-RBITC 16,1 мг RBITC в ДМСО (1,61 мг/мл) добавляли к раствору ЧСА (2 мг/мл, приготовлен путем разведения 20 % раствора альбумина) в свежем карбонатном буфере (0,1 М, рН 9,0) в мольном соотношении 1:5 с последующей инкубацией в течение 2 ч в темноте при комнатной температуре и непрерывном перемешивании, а затем 24 ч при 5 °С, терминировали реакцию аммония хлоридом, отмывали конъюгат, как описано выше, и лиофильно высушивали. Для оценки F/P определяли оптическую плотность раствора при 280 нм и 558 нм; при расчете по формуле (1) использовали коэффициент коррекции 0,34.

Получение НЧ. Для повышения степени включения ЕТР в НЧ на основе ЧСА синтезировали гидрофобное 4'-О-бензилоксикарбонильное производное ЕТР (4'-O-benzyloxycarbonyl ETP, ETP-cbz), описанное ранее [10], посредством взаимодействия ЕТР с бензилхлорформиатом в ТГФ с последующей очисткой. Для получения НЧ, навеску РТХ (30 мг) и ЕТР-cbz (30 мг) растворяли в смеси 1,1 мл хлороформа и 0,1 мл 96% этанола (органическая фаза, о). Охлажденный до 13-14 °С 1% водный раствор ЧСА с меткой RBITC / FITC (водная фаза, w) объемом 58,8 мл смешивали с органической фазой (соотношение ЛВ и ЧСА составляло 1:10) и гомогенизировали, вначале используя роторный смеситель с высоким усилием сдвига Ultra-Turrax T18 Basic (IKA, Германия) в течение 2 мин при 24000 rpm (15 °С), а затем с помощью гомогенизатора высокого давления Microfluidizer M-110P (Microfluidics, США) при 2068 бар (30000 psi) в течение 3 мин 45 сек при охлаждении (16-17 °С). Далее остаточный органический растворитель удаляли под вакуумом, концентрировали суспензию до объема 20 мл, фильтровали через фильтр 0,2 мкм, разливали во флаконы и лиофилизировали.

Физико-химический анализ НЧ. Средний гидродинамический диаметр частиц (размер), индекс полидисперсности (PDI) и распределение по размерам (Vol, %) определяли методом динамического рассеяния света (ДРС) при разведении НЧ в 0,9% растворе NaCl (0,1 мг/мл по ЛВ), ζ-потенциал поверхности НЧ – методом электрофоретического рассеивания света при разведении НЧ в воде Milli-Q (1 мг/мл по ЕТР-cbz) (Zetasizer NanoZS, Malvern Instruments, Великобритания) (угол 173°, +25 °С, n=3). Концентрацию дезинтеграции частиц определяли методом ДРС по появлению фракции 7-10 нм (Volume) после серийного разведения наносуспензии в 0,9% растворе NaCl при +25 °С. Для определения содержания ЕТР-Cbz и РТХ в НЧ лиофилизат разбавляли метанолом, обрабатывали УЗ, центрифугировали (15000 g; 10 мин) и анализировали супернатант с использованием системы ВЭЖХ Shimadzu (Киото, Япония) с диодно-матричным детектированием (228 нм – РТХ, 285 нм – ЕТР-cbz). Разделение проводили на колонке Partisphere TAC-1 PFP (265 x 4,6 мм, 5 мкм, Whatman™ Nichrom®, Maidstone, UK) в изократическом режиме элюирования смесью подвижных фаз А (вода) и Б (ацетонитрил) в соотношении 55:45 (по объему). Температура колонки – 30 °С; объем инъекции – 10 мкл; содержание определяли по предварительно построенной калибровочной зависимости.

**Визуализация в клетках.** Для визуализации НЧ в клетках, НЧ вносили к клеткам 4T1 в среде RPMI 1640 с добавлением 10% сыворотки (Thermo Fisher Scientific, США) через 24 ч культивирования (7,32 мкг/мл по РТХ; 8,11 мкг/мл по ЕТР-Cbz) и инкубировали в течение 30 мин. Затем клетки отмывали PBS и лизосомы окрашивали с помощью Lysotracker Green DND26 в соответствии с протоколом производителя (ThermoFisher). Изображение получали с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа Nikon A1R MP+ (Nikon Instruments, Япония). В исследовании использовали лазеры с эмиссией 405, 488, 561, 638 нм. Для визуализации контура клеток использовали дифференциальную интерференционную контрастную микроскопию. Полученные изображения анализировали в приложении NIS-Elements AR (Nikon).

### Результаты

Для получения флуоресцентно-меченых частиц на основе ЧСА, содержащих паклитаксел и производное этопозида, был получен флуоресцентно-меченый альбумин. В случае ЧСА-FITC соотношение F/P составило 0,6, в случае ЧСА-RBITC – 0,7. Параметры частиц, содержащих флуоресцентную метку (FITC/RBITC) и комбинацию ЛВ, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-химические параметры флуоресцентно-меченых наночастиц, содержащих паклитаксел и производное этопозида (среднее  $\pm$  sd, n=3)

Флуоресцентная метка	FITC	RBITC
Средний размер, нм	136,3 $\pm$ 2,9	131,3 $\pm$ 0,4
Индекс полидисперсности (PDI)	0,098 $\pm$ 0,007	0,112 $\pm$ 0,032
Распределение по размерам (Vol), нм	139,3 $\pm$ 0,3	137,1 $\pm$ 2,3
$\zeta$ -потенциал, мВ	-14,1 $\pm$ 1,3	-18,1 $\pm$ 1,6
Содержание РТХ, мг/мл	0,73 $\pm$ 0,08	0,81 $\pm$ 0,03
Содержание ЕТР-Cbz, мг/мл	0,81 $\pm$ 0,10	0,82 $\pm$ 0,02

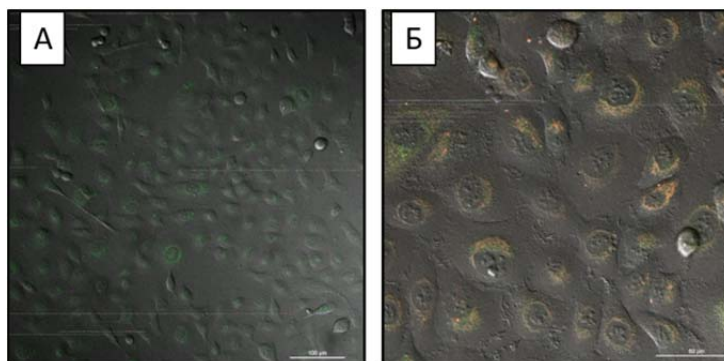


Рисунок 1 – Интернализация наночастиц с флуоресцентными метками FITC (А) и RBITC (В) в клетки 4Т1 (30 мин. экспозиции). Объединённое изображение: наночастицы ЕТР-Cbz-РТХ-ЧСА-FITC (FITC); наночастицы ЕТР-Cbz-РТХ-ЧСА-RBITC (RBITC); лизотрекер (Lysotracker DND-26), контуры клеток (дифференциально-интерференционный контраст, DIC)

В отличие от ЕТР, полученное производное этопозида образовывало с ЧСА стабильную наносуспезию, что может быть связано с большей гидрофобностью ЕТР-Cbz (рассчитанные *in silico* значения log P составили 0,70 и 2,42, соответственно, растворимость в воде снизилась ~ в 70 раз). Полученные формы представляют собой стабилизированные альбумином наносуспезии, содержащие оба ЛВ (соотношение 1:1), со средним размером частиц около 130 нм (при разбавлении ~ в 15 раз), низким индексом полидисперсности (<0,2) и отрицательным  $\zeta$ -потенциалом поверхности. При большем разбавлении частицы диссоциируют с образованием растворимых комплексов

ЛВ – альбумин, при этом концентрация дезинтеграции частиц в 0,9% растворе хлорида натрия составила ~ 8 мкг/мл (разбавление ~ в 190 раз). На рисунке 1 приведены изображения, свидетельствующие об успешной интернализации флуоресцентно-меченых НЧ в клетки культуры аденокарциномы 4Т1.

#### **Заключение**

Таким образом, были получены наночастицы на основе человеческого сывороточного альбумина, содержащие комбинацию двух противоопухолевых агентов – паклитаксела и 4'-О-бензилоксикарбонильного производного этопозиды. Предварительная конъюгация альбумина с изотиоцианатными производными красителей FITC и RBITC не повлияла на его способность связывать данные химиотерапевтические агенты с образованием стабильной наносuspension. Соответствие физико-химических параметров наночастиц немеченым образцам, а также достаточно яркая флуоресценция частиц внутри клеток позволила изучить интернализацию полученных наночастиц в клетки методом флуоресцентной микроскопии.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (проект FSSM-2022-0003).

#### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Deshmukh A. S., Tiwari K. J., Mahajan V. R. Solubility enhancement techniques for poorly water-soluble drugs //Int. J. Pharm. Sci. Nanotechnol. 2017. V.10. №. 8.
2. Fu Q. et al. Nanoparticle albumin-bound (NAB) technology is a promising method for anti-cancer drug delivery //Recent patents on anti-cancer drug discovery. 2009. V. 4. №. 3. P. 262-272.
3. Lluch A. et al. Treatment innovations for metastatic breast cancer: nanoparticle albumin-bound (NAB) technology targeted to tumors //Critical reviews in oncology/hematology. 2014. V. 89. №. 1. P. 62-72.
4. Cho H. et al. Emerging Albumin-Binding Anticancer Drugs for Tumor-Targeted Drug Delivery: Current Understandings and Clinical Translation //Pharmaceutics. 2022. V. 14. №. 4. P. 728.
5. Kinoshita R. et al. The Therapeutic Effect of Human Serum Albumin Dimer-Doxorubicin Complex against Human Pancreatic Tumors //Pharmaceutics. 2021. V.13. №. 8. P. 1209.
6. Desai N. et al. Enhanced efficacy and safety of nanoparticle albumin-bound nab-docetaxel versus taxotere //Cancer Research. 2006. V. 66. №. 8\_Supplement. P. 1277-1278.
7. Maleki H. et al. Effect of Paclitaxel/etoposide co-loaded polymeric nanoparticles on tumor size and survival rate in a rat model of glioblastoma //International journal of pharmaceutics. 2021. V. 604. P. 120722.
8. An F. F., Zhang X. H. Strategies for preparing albumin-based nanoparticles for multifunctional bioimaging and drug delivery //Theranostics. 2017. V.7. №. 15. P. 3667-3669.
9. Yang T. et al. Stability of bovine serum albumin labelled by rhodamine B isothiocyanate // Biomed. Res. 2017. V. 28. №. 9. P. 3851-3854.
10. OHNUMA T. et al. Preparation and Antitumor Activity of 2"-O-, 3"-O-and 2", 3"-Di-O-substituted Derivatives of Etoposide //Chemical and pharmaceutical bulletin. 1992. V. 40. №. 7. P. 1783-1788.

Брянский Антон Александрович, младший научный сотрудник, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Bryansky Anton Aleksandrovich, Junior Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University

Безрук Михаил Николаевич, старший научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН

Bezruk Michael Nikolaevich, Senior Scientific Researcher, Institute of Automation and Control Processes FEB RAS

Ефимов Тимофей Александрович, младший научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН

Efimov Timofey Aleksandrovich, Junior Researcher, Institute of Automation and Control Processes FEB RAS

Бобруйко Денис Александрович, младший научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН

Bobruyko Denis Alexandrovich, Junior Researcher, Institute of Automation and Control Processes FEB RAS

Башков Илья Олегович, младший научный сотрудник, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Bashkov Ilya Olegovich, Junior Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University

## **АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ, РЕГИСТРИРУЕМАЯ С ОПТОВОЛОКОННЫМИ ДАТЧИКАМИ ПРИ ИСПЫТАНИИ РАСТЯЖЕНИЕМ СТЕКЛОПЛАСТИКА**

### **ACOUSTIC EMISSION RECORDED WITH FIBER OPTIC SENSORS DURING TENSILE TESTING OF FIBERGLASS REINFORCED PLASTIC**

Аннотация. Волоконно-оптические интерферометрические датчики характеризуются распределенностью чувствительных элементов, в отличие от широко применяемых локальных пьезоэлектрических преобразователей. Экспериментальные данные акустической эмиссии получены с помощью пьезоэлектрического преобразователя и многомодового оптического волокна, приклеенного к поверхности образца. Испытание образца на статическое растяжение проводили на универсальной испытательной машине SHIMADZU. Образцы были изготовлены методом вакуумной инфузии с использованием связующего Derakane 411-350 и 10 слоев стеклоткани Ст-62004. Сравнительный анализ процесса разрушения проводился по параметрам сигналов акустической эмиссии, таким как пиковые частоты в случае регистрации пьезоэлектрическим преобразователем и уровням изменения энергии вейвлет-разложения в случае волоконно-оптического датчика. Идентифицированы сигналы акустической эмиссии, регистрируемые оптоволоконными датчиками над уровнем помех, и определены границы применения датчиков.

Abstract. The specificity of the fiber-optic interferometric sensors is the distribution of sensitive elements that are located in the structure of the material, in contrast to the widely used local piezoelectric transducers. Experimental acoustic emission data obtained using a piezoelectric transducer and a multimode optical fiber glued to a specimen surface. Static tensile test of a FGRP specimen was done on a SHIMADZU universal testing machine. FGRP specimens were made by vacuum infusion method using Derakane 411-350 binder and 10 layers of 62004 fiberglass. A comparative analysis of the destruction process was performed using parameters of acoustic emission signals, such as peak frequencies in the case of registration by a piezoelectric transducer, and level energy changes of wavelet decomposition in the case of a fiber-optic sensor. Acoustic emission signals recorded by fiber-optic sensors at the level of interference are identified, and the application boundaries of the sensors are determined.

Ключевые слова: интерферометр, волоконно-оптический датчик, акустическая эмиссия, стеклопластик.

Key words: interferometer, fiber-optic sensor, acoustic emission, FGRP.

### **Введение**

В последнее десятилетие активно исследуются волоконно-оптические датчики регистрации акустической эмиссии. Данный тип датчиков имеют миниатюрные размеры, возможности гибкого расположения и интеграции в структуру ПКМ, физическую инертность к электромагнитному излучению. Волоконно-оптические датчики, работающие на основе адаптивного интерферометра, в отличие от сенсоров, работающих по принципу волоконных брэгговских решеток, представляют уникальную возможность использовать всё волокна в качестве сенсора, то есть обеспечивают возможность получения распределенных датчиков. Сигналы АЭ, регистрируемые данным типом датчиков, имеют некоторые особенности, требующие подробных исследований их характеристик и возможностей технической реализации в виде преобразователей АЭ [1].

### **Материалы и методы**

Плита исследуемого стеклопластика была изготовлена по технологии вакуумной инфузии с использованием 10 слоев стеклоткани 62004 и эпоксивинилэфирного связующего Derakane 411-350. Из экспериментальной плиты были изготовлены образцы U-образной формы. Многомодовое оптическое волокно было приклеено на поверхность образца ПКМ при помощи эпоксидного связующего, обеспечивающего высокую адгезионную прочность за счет схожей природы с материалом матрицы образца.

Механические испытания проводили на универсальной испытательной машине SHIMADZU методом статического нагружения. Скорость перемещения захватов машины была выбрана равной 2 мм/мин. Нагружение производили ступенчато с шагом 2500 Н с выдержками по две минуты между шагами статического нагружения.

Сигналы акустической эмиссии записывались на цифровой осциллограф Agilent DSO90404A с частотой дискретизации 2 МГц. Дополнительно на образец был установлен широкополосный пьезоэлектрический преобразователь Globaltest GT301 с диапазоном рабочих частот 50-550 кГц.

Используемый для регистрации акустических колебаний лазерный интерферометр был собран по схеме Маха-Цендера на основе источника лазерного излучения Cobolt Rumba с длиной волны 1064 нм. Для обеспечения стабильности рабочей точки в схеме используемого интерферометра использовался фоторефрактивный кристалл CdTe [2].

Записанная осциллограмма сигнала была разбита на участки по длительности приблизительно 4 мс, что соответствует 8192 точкам дискретизации. Такой подход схож с методикой «скользящего окна», активно применяющегося при анализе непрерывных длительных сигналов.

Так как волоконно-оптические датчики на базе адаптивного интерферометра обладают низкой чувствительностью к сигналам с высокой частотой, была применена вейвлет-декомпозиция сигналов Добеши 14 и выбран 6-й уровень декомпозиции, соответствующий диапазону частот от 15,625 до 31,25 кГц. Для последующего анализа выбирались пары сигналов для ВОД и ПЭП соответственно, у которых совпадали по времени регистрации энергии акустических колебаний.

### **Результаты и обсуждение**

Нагружение выполнялось с 12,5 кН до 15 кН, после чего на стадии выдержки образец разрушился. На рисунке 1 представлены диаграммы изменения RMS записанных сигналов АЭ и буквами А-Г отмечены моменты, когда зарегистрированы сигналы по изменению RMS осциллограммы одновременно для ПЭП и для ВОД.

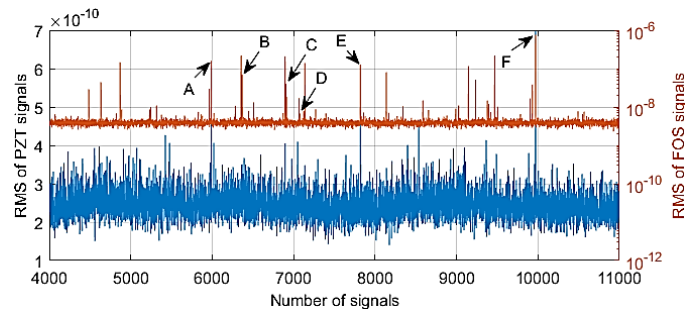


Рисунок 1 – Изменение энергии регистрируемых сигналов в ходе нагружения образца  
Для полученных сигналов рассчитывались спектры Фурье и определялись их пиковые значения, в количестве трех штук.

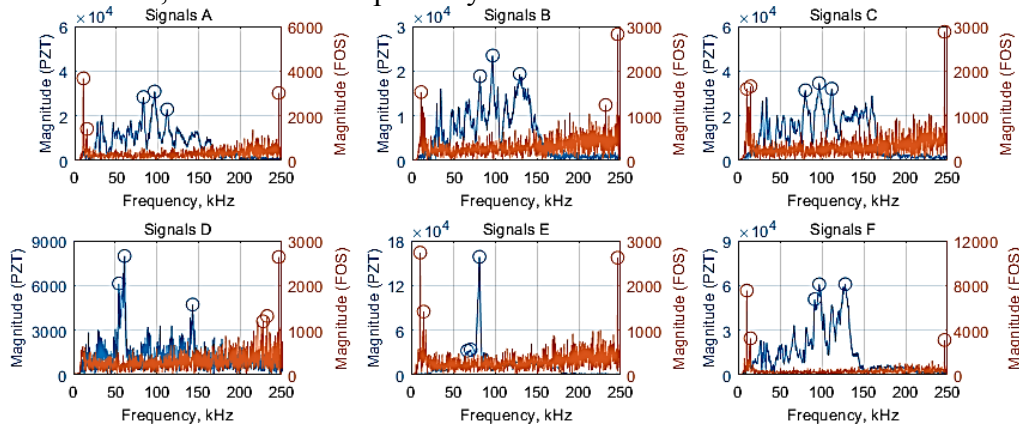


Рисунок 2 – Спектры Фурье сигналов, зарегистрированных ПЭП и ВОД

В результате анализа частотных составляющих зарегистрированных сигналов ПЭП отмечено, что сигналы характеризуются частотами от 54 до 143 кГц, на основании работ [3] данные сигналы можно отнести к группе макромасштабных повреждений матрицы связующего. В случае регистрации ВОД можно выделить две группы: от 10 до 15 кГц и от 227 до 246 кГц. В соответствии с результатами работ [4] данные частоты также можно отнести к макроповреждениям матрицы и межслоевым повреждениям (расслоениям).

### Заключение

Возможным решением проблемы регистрации и установления времени протекания событий АЭ по амплитуде колебаний на записанной осциллограмме с помощью волоконно-оптических датчиков на базе адаптивного интерферометра является оценка изменения RMS во времени.

Сигналы АЭ, произошедшие от одного события и зарегистрированные ПЭП и ВОД имеют различия так же и по их частотному представлению. Однако, события АЭ, характеризующиеся макроповреждениями матрицы, могут быть зарегистрированы как ПЭП, так и ВОД и идентифицированы по частотному диапазону от 10 до 220 кГц.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке гранта государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-452.2022.4) и при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 21-19-00896.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bashkov O. V. et al. Registration of acoustic emission waves in anisotropic composite plates by fiber-optic sensors //Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto-and Microelectronics 2017. – SPIE, 2019. – Т. 11024. – С. 143-147.
2. Rassolov E. A. et al. Coil-Type Fiber Optic Sensors for Acoustic Emission Analysis //Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2022. – Т. 49. – №. 3. – С. 88-91.

3. Li L. et al. Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven glass/epoxy composites //Composite Structures. – 2014. – Т. 116. – С. 286-299.
4. Arumugam V. et al. A global method for the identification of failure modes in fiberglass using acoustic emission //Journal of Testing and Evaluation. – 2011. – Т. 39. – №. 5. – С. 1.

УДК 539.422.52

Брянский Антон Александрович, младший научный сотрудник, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Bryansky Anton Aleksandrovich, Bryansky Anton Aleksandrovich, Junior Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University

Ефимов Тимофей Александрович, научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН

Efimiv Timofei Aleksandrovich, Junior Researcher, Institute of Automation and Control Processes FEB RAS

Башков Илья Олегович, младший научный сотрудник, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Bashkov Ilya Olegovich, Junior Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University

Безрук Михаил Николаевич, старший научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН

Bezruk Mikhail Nikolaevich, Senior Researcher, Institute of Automation and Control Processes FEB RAS

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, РАЗМЕЩЕННЫМИ НА ПЛАСТИНЕ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16**

### **STUDY OF SIGNAL CHARACTERISTICS REGISTERED BY FIBER-OPTIC ACOUSTIC EMISSION SENSORS PLACED ON A ALUMINUM ALLOY D16 PLATE**

Аннотация. Проведены исследования спектральных характеристик сигналов, которые были зарегистрированы волоконно-оптическими датчиками акустической эмиссии на основе адаптивных голографических интерферометров. Оптические волокна датчиков наклеивали на поверхность пластины из алюминиевого сплава Д16 размером 500х600 мм заливкой тонким слоем эпоксидной смолы. Акустические волны возбуждали изломом грифеля карандаша твердостью НВ (источник Су-Нильсена). Сигналы АЭ регистрировали волоконно-оптическим и пьезоэлектрическим датчиками. При измерении волоконно-оптическим датчиком использовали два типа датчиков с различной укладкой оптических волокон.

Отмечено, что при многопроходном способе укладки амплитуда регистрируемых сигналов увеличивается пропорционально числу проходов. При увеличении длины укладки в 4 раза, амплитуда сигналов возрастает в 2,0-2,5 раза.

Abstract. The spectral characteristics of signals recorded by fiber-optic sensors of acoustic emission based on adaptive holographic interferometers have been studied. The optical fibers of the sensors were glued onto the surface of a D16 aluminum alloy plate 500x600 mm in size by pouring a thin layer of epoxy resin. Acoustic waves were excited by breaking the lead of a



pencil with hardness HB (Su-Nielsen source). AE signals were recorded by fiber-optic and piezoelectric sensors. When measuring with a fiber-optic sensor, two types of sensors.

It is noted that with a multi-pass laying method, the amplitude of the recorded signals increases in proportion to the number of passes. With an increase in the laying length by 4 times, the amplitude of the signals increases by 2.0-2.5 times.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, акустическая эмиссия, интерферометр.  
Key words: fiber-optic sensor, interferometer, acoustic emission.

### **Введение**

Оптические волокна нашли применение не только в качестве высокоскоростного канала цифровых данных, но также все более активно используются в качестве различных датчиков [1, 2]. Например, возможность нанесения на оптические волокна дифракционных решеток позволило использовать их в качестве датчиков деформаций. Такие датчики получили название датчиков на решетках Брэгга, а принцип действия основан на регистрации смещения спектра лазерного излучения, пропускаемого через датчик, возникающего в результате деформации последнего. Чувствительность данных датчиков позволяет регистрировать деформации материала в пределах упругости материала, к которому прикреплен датчик, и конечно не может превышать предела упругости кварцевого стекла, из которого изготовлены датчики. Для регистрации акустических волн низкой амплитуды подобные датчики использоваться могут, но малочувствительны ввиду ограниченной локальной зоны, нанесенной на оптическое волокно дифракционной решетки. Для этих целей эффективно могут быть использованы интерференционные измерительные системы, основанные на регистрации изменений фазы лазерного излучения. Изменение фазы возникает в результате изменения оптической плотности при упругой деформации оптического волокна. Чувствительность распределенного волоконно-оптического датчика (ВОД) будет зависеть от длины волокна, на которое действует акустическая волна. Применение адаптивного интерферометра позволяет подавлять низкочастотные температурные и механические шумы [3, 4]. В адаптивном интерферометре на фоторефрактивном кристалле (ФРК) происходит двухлучевое взаимодействие объектного и опорного лазерных лучей. В результате перезаписи динамической голограммы в ФРК, которая выполняется с задержкой, зависящей от типа ФРК, интерферометр работает как фильтр верхних частот (ФВЧ), что позволяет стабилизировать рабочую точку интерферометра. Проведенные ранее исследования показали возможность, регистрации АЭ в полимерном композиционном материале с помощью ВОД, встроенными в его структуру [5, 6, 7].

### **Методика проведения эксперимента.**

Для проведения исследования использовалась пластина алюминиевого сплава Д16 размерами 500 мм x 600 мм x 2 мм (рис. 1). На пластину были наклеены многомодовые оптические волокна диаметром 62,5 мкм без защитной оболочки. Возбуждение АЭ волн выполнялось имитатором Су-Нильсена при разрушении на поверхности грифеля карандаша различной твердости.

Разная твердость излома карандаша имитирует различную твердость разрушаемого материала, поэтому может в общем приближении являться моделью типа источника разрушения, инициировавшего волну и регистрируемый сигнал АЭ.

Для повышения чувствительности ВОД оптические волокна наклеивались на пластину в несколько проходов. Были наклеены участки длиной 100 мм и числом проходов 10 и 20, а также – длиной 400 мм и числом проходов 10.

Кроме того, из пористого материала изопинк был изготовлен каркас, на который было намотано оптическое волокно (рис. 2). Намотка содержала 40 витков мультимодового оптического волокна с сердцевиной 62,5 мкм длиной 3,0 м. Катушка во время испытания прижималась к пластине по наиболее широкой стороне.

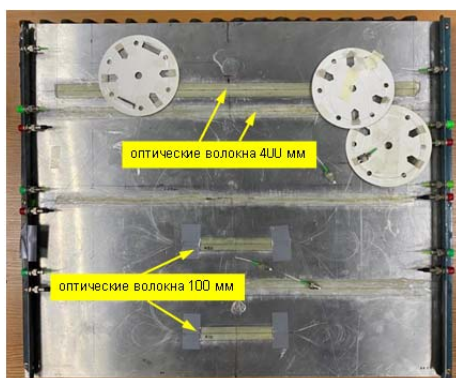


Рисунок 1 - Пластина дюралюминия Д16 с наклеенными на поверхность ВОД

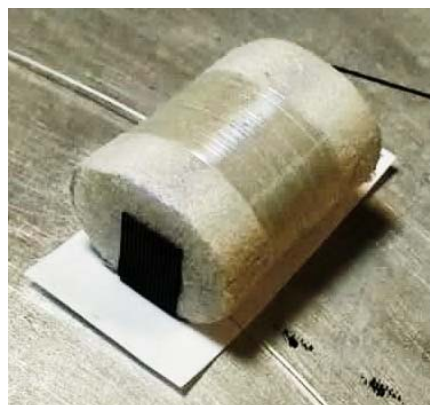
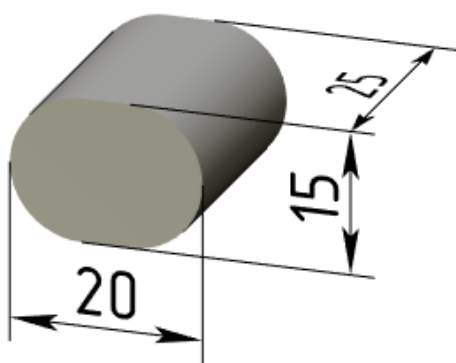


Рисунок 2 - Эскиз (а) и фото (б) катушки ВОД с намотанным оптическим волокном

С целью сравнительного анализа параметров сигналов, регистрируемых ВОД с широко используемыми пьезоэлектрическими преобразователями (ПЭП) и на пластину вблизи ВОД перед возбуждением акустической волны устанавливался ПЭП. В проводимых исследованиях применяли широкополосный ПЭП модели GT301 с диапазоном 50-550 кГц. Это широко распространенный ПЭП, применяемый для регистрации АЭ в исследовательских целях и на объектах диагностики.

### Результаты и их обсуждение

Одним из информативных параметров, выбранных для анализа сигналов АЭ, зарегистрированных ВОД и ПЭП, являлось отношение сигнал-шум (SNR). Это отношение, как правило, определяется в частотном диапазоне аппаратуры. Сигналы АЭ, зарегистрированные различными типами датчиков, при разном числе проходов и длине укладки оптических сенсоров, представлены на рис. 3.

Места возбуждения сигналов различались, однако датчики ВОД и ПЭП в моменты возбуждения находились вблизи друг друга. Поэтому сигналы, зарегистрированные различными типами волокон, могут быть адекватно сравнимы с сигналами, регистрируемыми ПЭП.

Параметры сигналов, зарегистрированных ВОД и ПЭП датчиками, размещенными на поверхности пластины и катушкой, приведены в таблице 1.

Таблица 1 Параметры сигналов АЭ, зарегистрированных ВОД и ПЭП

Тип грифеля	Длина сенсора ВОД, мм	Кол-во проходов сенсора ВОД	SNR <sub>ВОД</sub>	SNR <sub>ПЭП</sub>	Отношение SNR <sub>ВОД</sub> / SNR <sub>ПЭП</sub>
НВ	100	10	10,3	42,6	0,242
		20	11,7	41,8	0,28
	400	10	12,3	42,4	0,29
2В	Катушка	40	4,4	26,7	0,16
НВ			6,85	35,8	0,19
2Н			8,4	48,5	0,17

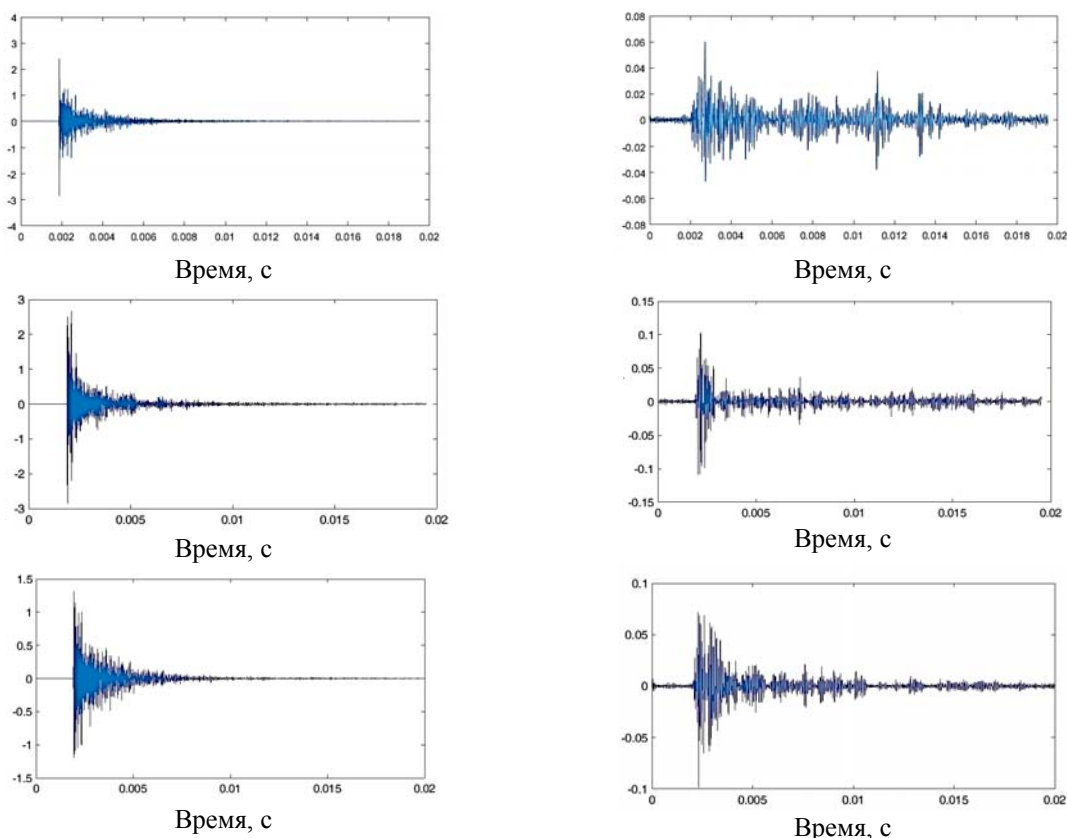


Рисунок 3 - Сигналы АЭ, зарегистрированные одновременно на пластине ПЭП (а, в, д) и ВОД (б, г, е) при 10 проходной укладке 100 мм волокна (а, б), 20 проходной укладке 100 мм волокна (в, г), 10 проходной укладке 400 мм волокна (д, е)

По результатам анализа численных параметров сигналов было установлено, что при увеличении числа походов сенсора с 10 до 20 амплитуда сигналов увеличилась в два раза, отношение сигнал-шум (SNR) в частотном диапазоне до 150 кГц увеличилось на 14 % пиковое значение магнитуды спектра на частоте 11 кГц увеличилось в 1,6 раза. При увеличении длины укладки сенсора от 100 до 400 мм при 10-кратном числе проходов амплитуда АЭ сигнала возросла в 2,5 раза, пиковое значение магнитуды спектра на частоте 11 кГц увеличилось в 2 раза, SNR в частотном диапазоне до 150 кГц увеличилось на 20 %.

При анализе параметров сигналов, регистрируемых катушкой, намотанной на каркас из пористого материала, можно отметить различие в амплитуде и величине SNR в связи с тем, что сигналы регистрировались от излома карандашей различного типа разной твердости. График изменения отношения сигнал-шум SNR сигналов, зарегистрированных катушкой и ПЭП, установленными на одинаковом расстоянии от источника (излома карандаша) на пластине, приведен на рис. 4.

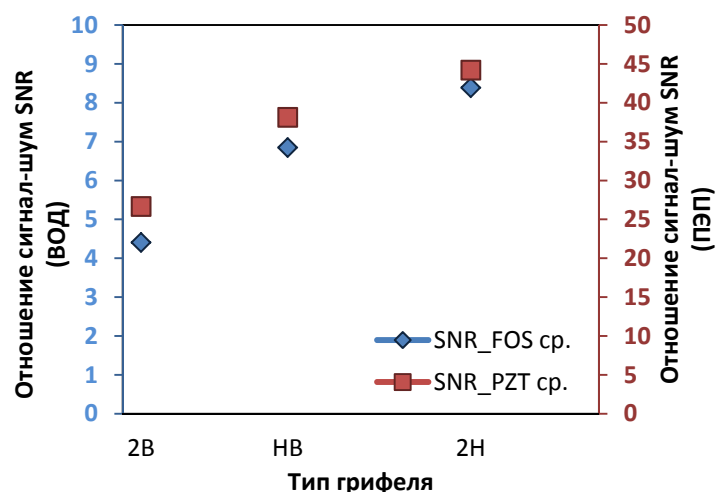


Рисунок 4 - Диаграмма изменения значений отношения сигнал-шум SNR для сигналов, зарегистрированных катушкой и ПЭП, прижатых к пластине

Очевидно, что графики имеют монотонно возрастающую зависимость при увеличении твердости источника разрушения. При этом определенной закономерности по изменению отношения величин, рассчитанных для ВОД и ПЭП ( $SNR_{\text{ВОД}} / SNR_{\text{ПЭП}}$ ), не отмечено.

#### Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что чувствительность датчиков на оптических волокнах зависит от способа укладки и может быть увеличена путем увеличения числа проходов. Зависимости от типа источника при регистрации акустических волн с помощью ВОД, сохраняется. Однако способы и характер укладки для повышения эффективности работы ВОД еще требуют дальнейших исследований.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-452.2022.4).

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ginu Rajan, B. Gangadhara Prusty, Eds. Structural Health Monitoring of Composite Structures Using Fiber Optic Methods / CRC Press. 2017. – 491 p.
2. Speckmann H. Structural Health Monitoring: a contribution to the intelligent aircraft structure/ H. Speckmann, H. Roesner // Proc. 9th European NDT Confer. (ECNDT). 25-29 Sept., 2006, Berlin, Germany
3. Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Yu.N. Adaptive interferometry with photorefractive crystals // J. Appl. Phys. 2009. –V. 105. – P. 031101
4. Romashko, R. V.; Bezruk, M. N.; Kamshilin, A. A.; Kulchin, Y. N. Six-channel adaptive fibre-optic interferometer // Quantum Electronics. 2012 – V.42. – No.6. – P. 551
5. Bashkov, O.V., Romashko, R.V., Zaikov, V.I., Panin, S.V., Bezruk, M.N., Khun, K., Bashkov, I.O. Detecting acoustic-emission signals with fiber-optic interference transducers // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. – V.53. – No.6. – P. 415-421
6. Bashkov O.V., Romashko R.V., Khon H., Bezruk M.N., Zaikov V.I., Bashkov I.O. Registration of acoustic emission waves in anisotropic composite plates by fiber-optic sensors // Proc. SPIE 11024, Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics. 2017. 110240O (4 January 2019);
7. Bashkov, O.V., Romashko, R.V., Bashkov, I.O., Zaikov, V.I., Khon, H., Solovey, D.B. Sensitivity Analysis of Adaptive Holographic Fiber-Optic Acoustic Emission Sensors during the Registration of Acoustic Waves in a Plate // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. – V.459. – No.6. – P. 062104

Ваулин Владимир Иванович, кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры «Общетеоретические дисциплины», Филиал ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Vaulin Vladimir Ivanovich, candidate of pedagogical sciences, associate professor, associate professor of the Department "General theoretical disciplines", Branch of the Samara state technical University

Сингеев Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Общетеоретические дисциплины», Филиал ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Singeev Sergey Aleksandrovich, the candidate of technical Sciences, associate Professor, associate Professor of the Department "General theoretical disciplines", branch of the "Samara state technical University"

Скачкова Надежда Александровна, студент, Филиал ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Skachkova Nadezhda Alexandrovna, student, Branch of the Samara State Technical University

Янина Анастасия Валерьевна, студент, Филиал ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Yanina Anastasia Valeryevna, student, Branch of the Samara State Technical University

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЗАВОДА МОЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ**

### **IMPROVING CLEANING EFFICIENCY TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF THE DAIRY PRODUCTION PLANT**

Аннотация. Мойка и дезинфекция молочного оборудования – это комплекс операций по очистке оборудования от остатков продукта. Проблема заключается в опасности токсичных веществ, используемых для очистки оборудования на пищевом предприятии и оказывающих вредное воздействие на окружающую среду. Актуальность данной проблемы обусловлена классом опасности веществ азотная кислота и едкий натр и их влиянием на окружающую среду и человека. Целью исследования явилось осуществить поиск технологического решения, которое обеспечивает эффективность санобработки оборудования на заводе молочной отрасли. Объектом исследования стало загрязнение и очистка молочного оборудования молочного завода. Предметом исследования был определен поиск инновационных технологий санитарной обработки оборудования завода молочной продукции. Инновационная технология санобработки оборудования с применением поверхностно-активных веществ (ПАВ), является эффективной для применения по очистке молочного оборудования, от основных источников очистки от бактериального загрязнения молока. Парообразования кислоты азотной, приводят к ожогам в тяжелой форме, раздражают верхние дыхательные пути, влияет на роговицу глаз и образует конъюнктивит. Реализация новой технологии, обеспечит условия безопасности и эффективности моющих средств, также снизить пагубного влияния на человека и окружающую среду.

Abstract. Washing and disinfection of dairy equipment is a complex of operations for cleaning equipment from product residues. The problem lies in the danger of toxic substances used for cleaning equipment at a food processing plant and having a harmful effect on the environment. The urgency of this problem is due to the hazard class of substances nitric acid and caustic soda and their impact on the environment and humans. The purpose of the study was to search for a technological solution that ensures the efficiency of equipment sanitation at the dairy industry plant. The object of the study was contamination and cleaning of dairy equipment of a dairy

plant. The subject of the study was the search for innovative technologies for sanitary treatment of dairy plant equipment. The innovative technology of equipment sanitation with the use of surfactants (surfactants) is effective for use in cleaning dairy equipment, from the main sources of purification from bacterial contamination of milk. Vaporization of nitric acid, lead to severe burns, irritate the upper respiratory tract, affects the cornea of the eyes and forms conjunctivitis. The implementation of the new technology will ensure the safety and effectiveness of detergents, as well as reduce the harmful effects on humans and the environment.

Ключевые слова: загрязнения технологического оборудования, мойка и дезинфекция молочного оборудования, моющие средства, азотная кислота, едкий натр, поверхностно-активные вещества, технология санобработки оборудования с применением ПАВ.

Key words: contamination of technological equipment, washing and disinfection of dairy equipment, detergents, nitric acid, caustic soda, surfactants, technology of sanitation of equipment using surfactants.

### **Введение**

Заводы по производству молочной продукции должны соответствовать нормам СанПиН, однако в процессе производства оборудование загрязняется и становится источником бактерий. Для выпуска безопасной и качественной продукции требуется эффективная очистка оборудования техническими и химическими средствами [4]. Проблема заключается в опасности токсичных веществ, используемых для очистки оборудования на пищевом предприятии и оказывающих вредное воздействие на окружающую среду. Актуальность данной проблемы обусловлена также классом опасности данных веществ (азотная кислота и едкий натр) и их влиянием на окружающую среду и человека.

### **Основная часть**

Для решения данной проблемы целесообразно осуществить поиск технологического решения, которое обеспечивает эффективность санобработки оборудования на заводе молочной отрасли [2]. В процессе производства происходят загрязнения технологического оборудования, в котором остаются элементы продукта: камень молочный, молочный пригар, биопленка [6]. Рассматривая технологию очистки технологических оборудования АО «Данон Россия» филиал «МК Саранский», следует отметить, что для поддержания высокого уровня санитарии на производственных участках разработана процедура регулярной мойки оборудования, которая включает в себя использование щелочного и кислотного моющего раствора рабочей концентрации [1]. В качестве щелочного средства, моющего используется едкий натр с концентрацией 1,5%, в качестве кислотного – азотная кислота 1,2%. Данные растворы производятся на моющих станциях из концентрированного сырья (50% едкого натра и 58% азотной кислоты). Средний расход концентратов в сутки составляет 340 кг щелочи и 150 кг кислоты.

В соответствии с ГОСТом 12.1.005-76 натрий едкий является вредным веществом 2 класса опасности. Поэтому мы считаем, что данное вещество нужно исключить из состава моющих средств, т.к. оно при воздействии на кожу, оболочку слизистой глаза образует химический ожог. При воздействии на глаза натрий едкий влияет на зрительные нервы и приводит к их атрофии и потере зрения.

Кислота азотная является концентрированной  $\text{HNO}_3$  – негорючей жидкостью, но пожароопасной, в соответствии с ГОСТ 12.1.044, относится к сильному окислителю. В случае попадания на материалы приводит к самовозгоранию, при образовании дыма, интенсивном выделении оксида азота и парообразования кислоты азотной, которая растворяется в воде и создает туман. Относится к 3 классу опасного вещества. Так как парообразования кислоты азотной тяжелее воздуха в 2,2 раза, то попадая на кожу в концентрированном виде кислота азотная создает ожоги в тяжелой форме. Также кислота азотная раздражает верхние дыхательные пути, влияет на роговицу глаз и образует конъюнктивит.

В процессе производства, после подогрева молочной продукции и ее пастеризации при 75-80<sup>0</sup>С остаются мягкие загрязнения в виде денатурированного белка и фосфатов кальция, при более высоких температурах более 80<sup>0</sup>С появляется твердый осадок [5].

Анализ моющих средств позволяет принять решение, что в целях повышения качества дезинфекции оборудования молочного завода целесообразно использовать сложные смеси с применением поверхностно-активных веществ (ПАВ). Применение отдельных веществ, таких, как сода, щелочи, кислоты, не дают высокого эффекта. Так сода каустическая и кальцинированная имеют низкую моющую способность. При использовании каустика омыляются нейтральные жиры, при использовании кальцинированной соды образуются мыла, по строению представляют собой натриевые соли органических жирных кислот.

ПАВы принадлежат к менее опасному четвертому классу химического вещества и несут меньшую угрозу и вред человеку в соответствии с ГОСТом 12.1.007-76, по предельно-допустимой концентрации с уровнем выше 10 делений и коэффициент возможности ингаляционного отравления менее 0,3 ПАВ могут быть водорастворимыми и малорастворимыми, ионогенными и неионогенными (рисунок 1).

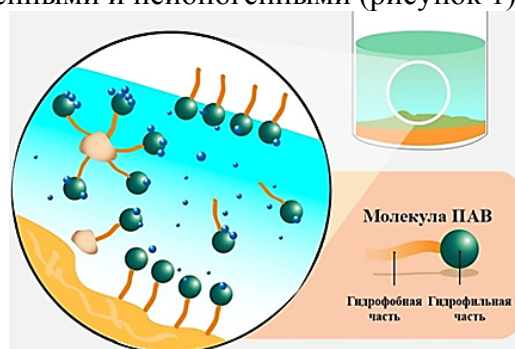


Рисунок 1 – Молекулярная структура поверхностно-активных веществ

Для удаления свежееобразовавшегося на оборудовании камня молочного, при функционировании его в условиях более высоких температур при обработке вакуум-аппаратов, пастеризаторов, бутылкомоечных машин, варочных колов, в воду в процессе ополаскивания целесообразно включать умягчающие средства воды, т.к. в ней содержатся минеральные соли в большом количестве. Молочный камень, имеющий свойство застаревать, может удаляться достаточно эффективно кислотным и щелочным раствором моющего средства, в составе которого имеются ПАВ и умягчители воды [1]. Механизм удаления сложных белково-жировых отложений с применением ПАВ показан на рисунке 2.

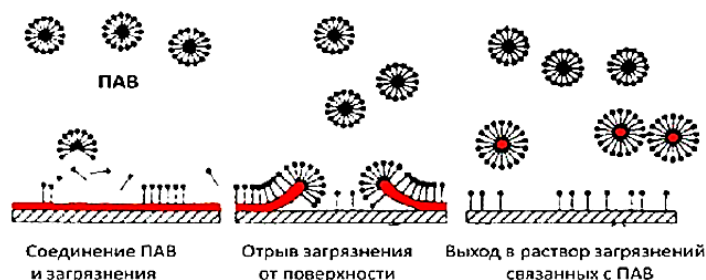


Рисунок 2 – Механизм удаления сложных белково-жировых отложений с применением ПАВ

Санобработку оборудования линии осуществляют в два этапа. Сначала производится мойка раствором моющего средства, далее проводится ополаскивание водой, в последующем осуществляют обработку средствами дезинфекции. Эти процессы могут проводиться одновременно, если в состав моющего раствора будут включены дезинфицирующие средства. Это позволит сократить продолжительность санобработки и облегчить процесс очистки оборудования, а также производственной культуры.



Одной из важных задач обеспечения санитарии в молочном производстве является санобработка линий и трубопроводов, автоцистерн, резервуаров для сохранения молока с применением современных технологий. Обеспечить выполнение данного подхода возможно путем образования композиции моющих средств, которые позволяют в низких температурах выполнить моющие и дезинфекции функции. В условиях низких температур роль дезинфицирующего средства в порошковых средствах выполняют агенты с хлорсодержащим составом, обеспечивающие бактерицидное действие. Отечественным производителем ПАВ является компания «НИИПАВ» - научно-исследовательский институт, занимающийся прикладной разработкой и осуществлением реализации технической политики в молочной отрасли с применением ПАВ и моющих средств. Отгрузки и складские запасы находятся по всей России [1, 3]. Средняя цена – 62.000 рублей за тонну.

Нитраты и азотная кислота поставляются зарубежными странами, следовательно, это выходит значительно выше. Средняя цена – 60.000 рублей за тонну, но из-за поставок из-за рубежа цена вырастает. С каждым годом цена увеличивается в 2 раза. Таким образом, сравнение цен на ПАВ и кислотные моющие средства позволяет отдать приоритеты ПАВ [5].

Анализ ценовых аспектов свидетельствует, санобработку технологического оборудования молочного завода целесообразно выполнить с использованием моющего средства специального комплексного действия, которое обеспечит очистку поверхностей оборудования соответствующих СанПиН, которое не наносит вред человеческому здоровью и не снижает качество производимой молочной продукции, не оказывает разрушительного действия на оборудование, является экономически выгодными в условиях производства.

#### **Заключение**

В ходе исследования мы теоретически обосновали и экспериментально установили основные закономерности удаления сложных белково-жировых веществ, составляющих отложения молочной продукции. Инновационная технология санобработки оборудования с применением ПАВ является эффективной для применения при очистке молочного оборудования, а также основным источником очистки от бактериального загрязнения молока. Реализация новой технологии обеспечит безопасность и эффективность моющих средств, также снизит пагубное влияние на человека и окружающую среду.

#### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Ананьева Н.В. Разработки в области моющих средств // Молочная промышленность. 2010. № 2. С. 67-68.
2. Дегтяров Г.П. Образование загрязнений на молочном оборудовании средства для их удаления // Техника и оборудование для села. - 2009. - № 5. - С. 14-16.
3. Дегтерёв Г. П., Рекин А. М. О новых моющедезинфицирующих средствах для молочных ферм // Молочное и мясное скотоводство. 2000. -№ 6. - С. 4-9.
4. Матвеев В.Ю. Меры санитарной обработки молочных линий // Вестник НГИ-ЭИ. 2017. № 3 (70). С. 32-40.
5. Пучин Е.А., Остроухов А.И. Современное моющее средство для очистки доильно-молочного оборудования//Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2012. № 5 (56). С. 14-17.
6. Пономарева А.Л. Исследование интенсивности образования биопленок *Listeria monocytogenes* при различных температурах // Здоровье. Медицинская экология. Наука. 2016. № 2 (65). С. 38-39.



Григорьева Анна Леонидовна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Grivorieva Anna Leonidovna, student of Komsomolsk-na-Amure State University

Башков Олег Викторович, доктор технических наук, заведующий кафедрой, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Oleg V. Bashkov, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department, Komsomolsk-on-Amur State University

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ**

### **MODELING THE FORMATION AND DEVELOPMENT OF FATIGUE CRACKS IN METAL MATERIALS WITH LOW-CYCLE FATIGUE**

Аннотация. В статье рассматривается обзор актуальных задач, и предлагается создание математической модели, связанной с образованием и развитием усталостных трещин в металлических материалах, которые возникают при малоцикловом нагружении. Представлены основные проблемы в различных областях промышленности, связанные с образования микротрещин при малоцикловом нагружении, которые в последующем приводят к разрушению различных видов конструкций или их элементов.

Abstract. The article considers an overview of current problems, and suggests the creation of a mathematical model related to the formation and development of fatigue cracks in metal materials that occur under low-cycle loading. The main problems in various fields of industry related to the formation of microcracks under low-cycle loading, which subsequently lead to the destruction of various types of structures or their elements, are presented.

Ключевые слова: трещина, малоцикловая усталость, материал, элемент конструкции.

Key words: crack, low-cycle fatigue, material, structural element

#### **Введение**

В современном мире очень остро стоит проблема ранней диагностики образования микротрещин в различных элементах конструкций, изготовленных из металлов [1]-[3], рисунок 1.



Рисунок 1 – Образовавшаяся трещина

К таким конструкциям можно отнести фюзеляж самолета, корпус речного или морского судна, элементы строительных оболочечных конструкций, элементы конструкций, использующихся на железной дороге, топливные резервуары, водопроводные трубы и т.д.

Из-за проблем с ранней диагностикой, в последствии возникает полное разрушение конструкции, что приводит к человеческим жертвам или материальным затратам.

### Основная часть

При постоянной эксплуатации вышеперечисленных конструкции, они непрерывно подвергаются малому деформированию, визуально не воспринимаемому человеческим глазом. Но при данных деформационных процессах возникает напряжение, которое оказывает воздействие на некоторые части элементов. При многократном нагружении происходит так называемое состояние «нагружение - разгрузка», что приводит к переходу к пластическому течению в окрестности «проблемной зоны», из-за чего появляется энергия диссипации, которая имеет накопительное действие после каждого цикла нагружения. При многократном воздействии (фюзеляж самолета постоянно испытывает данные нагрузки) возникает малоцикловая усталость материала. С каждым новым циклом, накопленная энергия увеличивается, что в итоге приводит к критическому значению и материал начинает разрушаться. В повседневной жизни в промышленности данное явление можно наблюдать только при появлении трещины диагностируемой специальным оборудованием. Во многих случаях возникает проблема, которая приводит к раннему разрушению, хотя при доскональном анализе и подсчетах можно было бы предвидеть и спрогнозировать поведение некоторых элементов конструкции, и произвести ремонт либо замену.

Также малоцикловая усталость напрямую зависит от свойств материала, из которого изготовлено изделие, от степени коррозии металла, плотности, толщины листа, температурных условия и т.д. В зависимости от характера малоциклового нагружения (равномерное или нет), будет определяться скорость разрушения материала [4]-[6].

При изучении аналогичной литературы было получено, что многие научные статьи описывают лишь деформацию материала при многоцикловом нагружении (количество циклов до разрушения составляет  $10^7$ ), а малоцикловая усталость материала мало затрагивается (количество циклов составляет где-то  $10^4$ ).

Отличие данных видов нагружения состоит в типе деформаций, возникающих в окрестности области разрушения [7].

С учетом всего вышеперечисленного, предлагается создание математической модели процесса малоциклового нагружения для определения необходимых параметров (временных, деформационных, структурных и т.д.) с учетом нахождения критического момента формирования микротрещин (рисунок. 2).

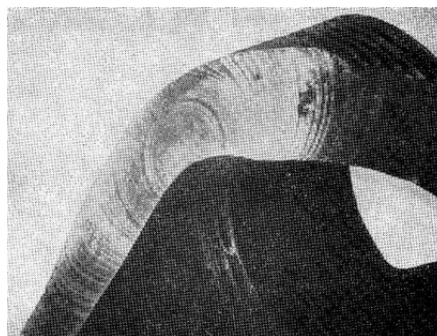


Рисунок 2 – Усталостное разрушение материала

### Заключение

Анализ проблематики, проведенный в данной статье показывает, что при раннем диагностировании развития микротрещин в различных элементах конструкций, можно не только предсказать их разрушение, а также уменьшить материальные затраты и избежать не нужных жертв. В связи с этим предлагается разработать математическую модель и программный комплекс, который будет позволять пользователю рассчитывать необходимые параметры и характеристики. Особенно это актуально в различных видах промышленности.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Канашин И.В., Григорьева А.Л., Хромов А.И. Малоцикловое нагружение материалов и задача о растяжении сжимаемой полосы // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. Комсомольск-на-Амуре, 2022. С. 380-383.

2. Grigoryeva A.L., Grigoryev Y.U., Khromov A.I. Tensile model of a shell-type flat plate at different displacement velocity fields // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. T. 200. С. 147-156

3. Grigorieva A.L., Grigoriev Y.Y., Zharikova E.P., Khromov A.I. A mathematical model of the field of the strain tensor in terms of deformation of the flat shell structures // Materials Science Forum. 2020. Т. 992. С. 870-875

4. Канашин И.В., Григорьева А.Л., Хромов А.И., Григорьев Ян.Ю. Растяжение полосы сжимаемого материала с непрерывным полем скоростей перемещений в условиях плоской деформации // Труды МАИ. 2022. № 124.

5. Григорьев Ян.Ю., Григорьева А.Л., Канашин И.В., Петрова А.Н., Хромов А.И. Математическая модель процесса деформирования элементов, изготовленных из конструкционных материалов с использованием машинного обучения // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2022. № 1 (57). С. 15-23.

6. Канашин И.В., Хромов А.И., Григорьева А.Л., Григорьев Ян.Ю. Моделирование процесса деформирования экспериментального образца при условии малоциклового нагружения // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2022. № 5 (61). С. 26-31.

7. Григорьева А.Л., Григорьев Ян.Ю., Хромов А.И., Канашин И.В. Моделирование деформационных процессов элементов сложных конструкций в условиях малоциклового деформации // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-2 (52). С. 123-128.

УДК 539.23

Кондратьев Михаил Валерьевич, студент, Пермский государственный национальный исследовательский университет, техник, Пермская научно-производственная приборостроительная компания

Kondratev Mikhail Valerievich, student of Perm State National Research University, technician at Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company

Жикина Людмила Алексеевна, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, начальник лаборатории, Пермская научно-производственная приборостроительная компания

Zhikina Lyudmila Alekseevna, The Postgraduate Student at Perm National Research Polytechnic University, the Head of Laboratory at Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company

Минкин Александр Михайлович, старший преподаватель, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, начальник отдела, Пермская научно-производственная приборостроительная компания

Minkin Alexander Mikhailovich, The Senior Lecturer at Perm State National Research University, the Head of Department at Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company

## **ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК TiO<sub>2</sub>**

## **THE EFFECT OF THERMAL TREATMENT ON THE ELECTRICAL AND GEOMETRIC PROPERTIES OF TiO<sub>2</sub> THIN FILMS**

Аннотация. Рассмотрено влияние температурной обработки на электрические и геометрические характеристики плёнки TiO<sub>2</sub>. Было обнаружено, что отжиг на воздухе приводит к увеличению электрического сопротивления при одновременном сокращении толщины покрытия. Предположены теоретически обоснованные причины наблюдаемого явления. Исследование способствует усовершенствованию контроля над процессом создания тонких плёнок TiO<sub>2</sub> с заданными свойствами.

Abstract. The paper considered the impact of temperature treatment on the electrical and geometric characteristics of the TiO<sub>2</sub> film. It was found that annealing in air leads to an increase

in electrical resistance while reducing the thickness of the layer. Theoretically justified reasons for the observed phenomenon are assumed. The study contributes to the improvement of control over the process of forming of TiO<sub>2</sub> thin films with specified properties.

Ключевые слова: диоксид титана (TiO<sub>2</sub>), тонкие пленки, электронно-лучевое испарение, высокотемпературный отжиг, фазовые переходы.

Key words: titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>), thin films, electron-beam physical vapor deposition, high temperature annealing, phase transition.

Диоксид титана благодаря своим физическим и химическим свойствам широко используется в солнечных элементах и фотокатализаторах, в качестве оптических и защитных покрытий [1]. Тонкие пленки диоксида титана все чаще применяются в микроэлектронных и оптических устройствах, газоанализаторах и биосенсорах [2]. Свойства тонких пленок TiO<sub>2</sub> зависят от их фазового состава – могут иметь аморфную и кристаллическую структуру. Среди кристаллических модификаций TiO<sub>2</sub> выделяют две тетрагональные фазы (рутил, анатаз) и одну орторомбическую фазу (брукит) [3].

Создание структур с заданной проводимостью зависит не только от методов и условий осаждения тонких пленок TiO<sub>2</sub>, но и от их постобработки.

В данной работе исследовалось влияние термообработки на электрические и геометрические свойства пленок диоксида титана, полученных методом электронно-лучевого испарения.

Пленки диоксида титана осаждали методом электронно-лучевого испарения на установке Satisloh MC-380-H на пластины из кварцевого стекла марки КУ-1. Кварцевые пластины были предварительно подготовлены в перекисно-аммиачной смеси NH<sub>4</sub>OH:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O в соотношении 3:1:1, в течение 20 минут при температуре 80 °С.

Уровень вакуума перед началом процесса составлял 4·10<sup>-4</sup> Па. Температура подложек поддерживалась на уровне 200 °С, а скорость их вращения составляла 40 об/мин. Скорость осаждения диоксида титана составляла 0,3 нм/с.

Образец 2 был подвергнут высокотемпературной обработке на воздухе в муфельной печи SNOL 30/1100. Температура отжига составляла 850 °С с выдержкой 1 час. Толщину пленок определяли при помощи оптического профилометра ZygoNew View7300. Для измерения электрического сопротивления использовали Тераомметр Е6-13А.

Анализ образцов тонких пленок TiO<sub>2</sub> (таблица 1), показал, что пленки характеризуются достаточно высоким электросопротивлением. При этом отмечено двукратное увеличение электросопротивления после термообработки пленки TiO<sub>2</sub>.

Таблица 1 – Характеристики плёнки TiO<sub>2</sub> до и после отжига на воздухе

№	Термообработка, °С	Толщина пленки, нм	Сопротивление, 10 <sup>12</sup> Ом
1	-	47±0,3	100
2	850	44,7±0,2	200

Более высокая проводимость пленок после осаждения может быть связана со стехиометрическими дефектами, возникающими в процессе осаждения. Титан имеет стабильные степени окисления Ti<sup>3+</sup> и Ti<sup>4+</sup>, которые приводят к образованию восстановленных оксидов, содержащих много кислородных вакансий. Эти вакансии действуют как доноры электронов. Повышенная стойкость отожженных пленок обусловлена заполнением кислородных вакансий на поверхности TiO<sub>2</sub> в процессе отжига. Следовательно, изменение стехиометрического соотношения кислорода и титана влияет на плотность носителей заряда при отжиге и, соответственно, на электропроводность этих оксидов [4].

Из приведенных в таблице данных видно, что после отжига пленок TiO<sub>2</sub> при температуре 850 °С наблюдается уменьшение толщины на ~4.9%. Таким образом, наблюдается увеличение плотности пленки, вероятно связанное со структурно-фазовыми превращениями. В литературе сообщается, что при температуре выше 400 °С наблюдается повышение кристалличности аморфно-кристаллической пленки с фазой

анатаза, которая затем начинает трансформироваться в фазу рутила при температуре более 800 °С. Важно отметить, что плотность фазы рутила ( $\rho=4,25\text{г/см}^2$ ) выше, чем у анатаза ( $\rho=3,894\text{ г/см}^2$ ) [5].

Исследования, проведенные в рамках данной работы, показали, что термообработка пленок  $\text{TiO}_2$ , нанесенных на кварцевые подложки методом электронно-лучевого испарения, на воздухе приводит к увеличению электросопротивления и плотности пленки.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ponce M.A., Parra R., Savu R., Joanni E., Bueno P.R., Cilense M., Varela J.A., Castro M.S. (2009). Impedance spectroscopy analysis of  $\text{TiO}_2$  thin film gas sensors obtained from water-based anatase colloids // *Sensors & Actuators, B: Chemical*. 2009. V. 139. №. 2. P. 447–452.

2. Mardare D., Rusu G.I. Structural and electrical properties of  $\text{TiO}_2$  RF sputtered thin films // *Materials Science and Engineering B75*. 2000. V. 75. №. 1. P. 68–71.

3. Э. П. Локшин, Т. А. Седнева Особенности перехода анатаза в рутил // *Журнал общей химии*. 2011. Т. 81. Вып. 9 С.1409- 1414

4. Khan A. F., Mehmood M, Durrani S.K., Ali M.L., Rahim N.A. Structural and optoelectronic properties of nanostructured  $\text{TiO}_2$  thin films with annealing // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2015. V. 29. P. 161–169.

5. A. S. Bakri, M. Z. Sahdan, F. Adriyanto, N. A. Raship, N. D. M. Said, S. A. Abdullah, and M. S. Rahim , "Effect of annealing temperature of titanium dioxide thin films on structural and electrical properties", *AIP Conference Proceedings* 1788, 2017, 030030.

УДК 66.063.8: 534–13

Коробчук Максим Васильевич, канд. техн. наук, преподаватель кафедры механики, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

Korobchuk Maksim Vasilyevich, Candidate of Engineering Sciences, teacher of the Department of Mechanics, Saint-Petersburg State Institute of Technology

Саенко Савелий Сергеевич, студент, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

Saenko Savelii Sergeevich, student of Saint-Petersburg State Institute of Technology

Веригин Александр Николаевич, проф., д-р техн. наук, зав. кафедрой мехатронных технологических комплексов, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

Verigin Aleksandr Nikolaevich, D.Sc. in Engineering, Prof, honored worker of Science of Russia, professor Department of Mechatronic Technological Systems, Saint-Petersburg State Institute of Technology

#### **НИЗКОЧАСТОТНОЕ ВИБРАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КАК СПОСОБ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

#### **LOW-FREQUENCY VIBRATION IMPACT AS A METHOD OF INTENSIFICATION OF MIXING IN CHEMICAL ENGINEERING**

Аннотация. В материалах работы применительно к вопросам перемешивания изучаются возможности различных конструкций аппаратов вибрационного действия. Для каждой группы аппаратов дается общая характеристика с указанием достоинств и недостатков и рекомендуемыми областями внедрения. В заключительной части статьи раскрываются перспективы применения вибрационных аппаратов в химической промыш-

ленности в контексте создания мехатронных комплексов химико-технологического назначения.

Abstract. In the materials of the work, the phenomena that determine the overall efficiency of the process are considered. Their relationship with the conditions for the implementation of the process, which depend on the design of the vibration action apparatus, is established. For each group of devices, a general characteristic is given, indicating the advantages and disadvantages and recommended areas of application. The final part of the article reveals the prospects for the use of vibration apparatus in the chemical industry in the context of the creation of mechatronic complexes for chemical and technological purposes.

Ключевые слова: химическая промышленность, химическая технология, вибрационная техника, мехатроника.

Key words: chemical industry, chemical technology, vibrating technique, mechatronics.

В химической технологии при создании, моделировании и оптимизации тепло и массообменных аппаратов, прежде всего, исходят из выявления требующей реализации гидродинамической обстановки. Организованный способ движения потоков (их взаимное перемешивание) должен обеспечивать выполнение двух условий: при минимуме энергетических затрат должна обеспечиваться максимальная производительность аппарата.

Аппараты, в которых тем или иным способом создается принудительное движение обрабатываемой среды (сред), находят применение для организации самых разнообразных процессов: гомогенных и гетерогенных химических реакций, экстрагирования, кристаллизации, абсорбции и т. д. [1-3].

Большое разнообразие задач, возникающих в промышленности при переработке различных систем (жидкость - жидкость, жидкость - газ, жидкость - твердое и жидкость - газ - твердое), с учетом специфики протекающих в них перечисленных выше явлений, не могут вписаться в рамки условий воздействий, создаваемых и ограниченных возможностями традиционного оборудования. И здесь крайне эффективным решением оказывается возможность возбуждения в среде низкочастотных колебаний и пульсаций.

Несмотря на то, что характерная для вибрационного воздействия способность значительно повышать интенсивность и эффективность применяемого оборудования подтверждается многочисленными исследованиями и не вызывает сомнений [4-6], технологические аппараты, где реализуются его полезные свойства, все еще можно отнести к экзотическим аппаратам или относительно редко встречающимся [7].

Рассмотрим три основных типа аппаратов, в которых реализуется низкочастотное вибрационное воздействие.

#### ***Аппараты вибрационного типа***

Перемешивание органически присуще жидкостям, а перемешивание встряхиванием, наряду с перемешиванием за счет помещаемой в емкость лопатки (весла) относится к наиболее древним. Однако, способ воздействия на жидкую среду, когда интенсивная циркуляция является следствием применения перемешивающего устройства, совершающего колебания, можно отнести к сравнительно молодым. Наиболее ранняя, известная из патентных источников конструкция аппарата вибрационного действия относится к 1864 году [8]. Устройство предназначалось для взбивания масла и имело относительно примитивный привод. Согласно описанию, взбивание осуществляется с помощью двух, совершающих при движении качания и колебания устройств, состоящих из перфорированных пластин, закрепленных на штоках, которые, в свою очередь, соединяются напрямую с соответствующими кривошипами механизма привода.

Первое упоминание о применении вибрационного воздействия для целей химической технологии относится к 1895 году [9]. Аппарат использовался для экстракции из руды серебра и золота. Согласно описанию, перемешивание осуществляется с помощью совершающего вертикальные колебательные движения перфорированного диска, закрепленного на штоке, который в свою очередь соединялся с шатуном кривошипного механизма.

Конструкция аппаратов, в которых мешалка (или насадка) совершает продольные синхронные колебания, наиболее проста. Высокая эффективность и надежность обеспечили конструкции широкое распространение. Фактически, данная конструкция лежит в основе всех современных смесителей емкостного типа.

Вибрирующие перемешивающие устройства применяют как в колонных аппаратах, где стремятся создать гидродинамический режим, приближающийся к идеальному вытеснению, так и в емкостных аппаратах, где гидродинамический режим приближается к идеальному смешению.

Одна из первых конструкций колонного аппарата с вибрирующей насадкой была предложена В. Ван-Дийком и описана в патенте 1935 года [10], который, впрочем, в силу ряда несовершенств, распространения в промышленности не получил.

Механический способ возбуждения был первым из способов генерации колебаний, попытки совершенствования, которого встречаются вплоть до настоящего времени. Альтернативой механическому перемешиванию является электромагнитный способ возбуждения. Несмотря на то, что впервые электромагнит был описан Вильямом Стюрженом в 1823 году, а описания первых электромагнитных вибраторов можно найти в работе Сильвануса Томпсона в 1892 году [11], первые конструкции вибрационных смесителей с возбуждением от электромагнитной катушки появляются лишь в 1926 году [12]. К настоящему времени электромагнитный способ возбуждения в силу высокой надежности и эффективности является наиболее предпочтительным и получил наибольшее распространение в мире [13,14].

Следует отметить, что в нашей стране исследование вибрационного воздействия применительно к перемешиванию началось несколько позже, и первый патент (авторское свидетельство), выданный на устройство с мешалкой, совершающей при движении качания, датируется 1926 годом [15].

В настоящее время работы по разработке современных вибрационных аппаратов перемешивания выполняются на кафедре мехатронных технологических комплексов инженерно-технологического факультета Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета).

#### ***Аппараты пульсационного типа***

Начиная с 1958 года в нашей стране (СССР) получают распространение оборудование с несколько иным способом генерации колебаний – пульсационные аппараты [16]. В них низкочастотные колебания суспензии генерируются с помощью пульсатора, расположенного вне аппарата. Впервые пульсационный способ перемешивания был предложен Всесоюзным НИИ неорганических материалов (в США, а затем и в ФРГ работы в схожем направлении были инициированы на несколько лет позже), а слава первопроходцев полностью принадлежит нашей соотечественнице, Карпачевой С.М. и ее коллегам. В результате выполняемых под её руководством пионерских работ по интенсификации массопереноса с помощью пульсационного воздействия были спроектированы аппараты самого разнообразного назначения, а также разработаны теория их расчета и моделирования.

Отделение аппарата от источника колебаний (пульсатора) значительно облегчает обслуживание оборудования в тех случаях, когда требуется минимизировать необходимый контакт персонала с обрабатываемыми средами или по условиям технологии должна быть обеспечена полная герметизация аппаратуры (например, в случае обработки радиоактивных, взрывоопасных или токсичных сред). Прежде всего, именно это относится к специфическому и весьма существенное достоинству пульсационного оборудования.

К основным недостаткам пульсационных аппаратов, с учетом того, что по производительности и интенсивности массопереноса они сопоставимы с механическими способами интенсификации, следует отнести их меньшую энергетическую эффективность и существенные конструктивные ограничения, а также вероятность появления кавитации и возникновения опасных напряжений в отдельных узлах аппарата. Как пра-

вило, диаметр аппаратов пульсационного типа не превышает 600–800 мм. При больших диаметрах аппарата становится затруднительным обеспечить равномерность распределения скоростей обрабатываемых сред по его сечению, кроме того, резко увеличивается и без того существенный расход энергии, затрачиваемой на сообщение пульсаций.

Наибольшее распространение пульсационный способ обработки сред получил в химических технологических, связанных с экстракцией. Экстракторы непрерывного действия выпускаются, например, Казанским Инженерно-Внедренческим Центром «Инжехим» (ИВЦ «Инжехим», г. Казань) [17].

Применение пульсационных аппаратов для перемешивания, в силу указанной выше их специфики, достаточно ограничено, тем не менее, работы по их совершенствованию ведутся и в настоящее время, например, в СПбГТИ (ТУ) на кафедре оптимизации химической и биотехнологической аппаратуры механического факультета.

#### ***Аппараты пульсационные роторного типа***

К еще одному типу аппаратов для перемешивания, реализующему принципы воздействия на обрабатываемую среду за счет колебаний следует отнести пульсационные аппараты роторного типа (РПА), содержащие ротор и статор у которых во взаимно перекрывающихся частях выполняются каналы различного профиля [18, 19]. Конструкция РПА выполнена так, что при вращении ротора происходит периодическое совпадение (или перекрытие) этих каналов. В аппаратах этого типа перемешивание строится не на известном принципе перемещающейся в смеси мешалки, а реализуется за счет генерации в обрабатываемой жидкости импульсов давления и разряжения, кавитации, мелкомасштабной пульсации, гидравлических ударов и общей турбулентности потока.

Различные модификации роторно-пульсационных аппаратов с успехом используются для приготовления многокомпонентных составов из трудно-смешиваемых сред, и находят применение во многих отраслях народного хозяйства.

Малые габариты, высокая производительность, работа в непрерывном (проточном) режиме обеспечивают высокоэффективные возможности применения роторно-пульсационных аппаратов в автоматизированных технологических линиях.

Организуемое пространственное движение каждой частицы по сложной траектории создает условия, при которых в рабочей камере аппарата происходит интенсивное турбулентное движение. Перемешивание протекает практически мгновенно. Вместе с тем пульсационные аппараты роторного типа отличаются малой удерживающей способностью и коротким временем пребывания в них обрабатываемых сред.

#### **Заключение**

Анализируя функционал и особенности каждого из типов оборудования можно отметить следующее. По сравнению с пульсационными, вибрационные аппараты потребляют меньше энергии, так как вибрация сообщается не всему объему жидкости, а лишь ее части, находящейся в непосредственной близости от мешалки. Кроме того, перемешивание в вибрационных аппаратах можно осуществлять с меньшими амплитудами и с большими частотами, что при прочих равных условиях позволяет добиться больших интенсивности и эффективности процесса [20].

Сравнивая вибрационные аппараты с роторно-пульсационными необходимо отметить, что последние не пригодны для проведения процессов, в которых для протекания между взаимодействующими средами химических реакций требует длительного времени контакта фаз. Также, из-за высоких сдвиговых усилий они совершенно не подходят для применения в технологиях ферментации или для культивирования микроорганизмов.

Следует отметить, что аппараты вибрационного перемешивания являются наиболее универсальными и позволяют осуществить наибольший спектр процессов с возможностью гибкого регулирования режимов работы и гарантированным качеством конечной продукции [21].

Рассмотренные в данной статье вопросы перемешивания гомогенных и гетерогенных сред имеют достаточно длительную историю и напрямую связаны с развитием,



как химической промышленности, так и с производством новых веществ и материалов. В настоящее время совершенно четко просматривается тенденция создания новых аппаратов с узкой специализацией, предназначенных для обработки конкретных сред с конкретными свойствами. Однако развитие химического машиностроения в таком направлении не следует считать оправданным.

Создание и использование унифицированного оборудования, позволяющего реализовать возможность гибкой адаптивной подстройки под самые разнообразные режимы работы необходимо считать более целесообразным направлением эволюции аппаратостроения. Возможность интеграции такого оборудования в существующие технологические линии позволит сделать первый шаг к созданию технологических комплексов, которые, помимо аппарата перемешивания, смогут включать в себя, например, один или несколько дозаторов для жидких и дисперсных материалов, различные исполнительные механизмы и т.д.

Современные тенденции в области автоматизации и мехатроники, при условии принципиальной возможности взаимной синхронизации оборудования, позволяют создавать мехатронные технологические комплексы, характеризующиеся высокой надежностью, безопасностью и малым временем отклика на любого рода отклонения. В таком разрезе вибрационные аппараты оказываются просто незаменимыми. Высокая надежность, отсутствие трущихся частей, возможность полной герметизации, а также относительная простота регулировки и управления режимами работы открывают широкое поле деятельности для внедрения инноваций и совершенствования самых разнообразных технологических комплексов.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Штербачек З., Тауск Я. Перемешивание в химической промышленности / Пер. с чешек. / Под ред. И. С. Павлушенко. Л., Госхимиздат, 1963. 416 с.
2. Лесин А.Д. Химическое и нефтяное машиностроение, 1967, с 43
3. Baird M. N. J. — Brit. Chem. Eng., 1966, v. 11, № 1, p. 20.
4. Аксельруд Г.А., Молчанов А.Д. Растворение твердых тел / . М., Химия, 1977. 269 с.
5. Родионов Е.П., Карпачева С.М., Ревнов В.Я. Разработка и применение пульсационной аппаратуры. М., Атомиздат, 1974.
6. Процессы жидкостной экстракции в цветной металлургии : научное издание / М. А. Меретуков. - М. : Металлургия, 1985. - 221 с.
7. Коробчук М.В. Пути совершенствования аппаратов вибрационного перемешивания / М.В. Коробчук, А.Н. Веригин // Высокие технологии и инновации в науке: сборник избранных статей Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 27 сентября 2021 года. – Санкт-Петербург: Частное научно-образовательное учреждение дополнительного профессионального образования Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ», 2021. – С. 94-97
8. Патент США № 44 732. 18.10.1864. B01F11/00. Improved churn / W.W. Laphan
9. Патент США № 541 658. 25.06.1895. B01F11/00. Process of extracting gold and silver / John J. Croose,
10. Патент США № 2 011 186. 13.08.1935. B01D11/04. Process and apparatus for intimately contacting fluids / Dijck Willem Johannes Dominicu
11. Silvanus Phillips Thompson The Electromagnet, and Electromagnetic Mechanism, Cambridge University Press, 2011 (впервые опубликовано в 1891 г.) ISBN1108029213
12. Патент США № 1 623 987, 28.06.1926. A47J43/044 (EP, US). Vibrator / Loe J. Wahl, Illinois, Wahl Clipper Corporation (USA)
13. Коробчук М. В. Обзор современных вибрационных смесителей сыпучих материалов и тенденции их развития / М.В. Коробчук, А.Н. Веригин // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 4(32). – С. 32-45.

14. Коробчук М.В. Особенности конструирования, пути и проблемы совершенствования аппаратов с вибрационным перемешиванием / М.В. Коробчук, А.Н. Веригин, Н.А. Незамаев // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2021. – № 59. – С. 86-93. – DOI 10.36807/1998-9849-2021-59-85-86-93.

15. А.с. 11040. Российская Федерация. Аппарат для взбалтывания жидкостей / П.В. Зеленцов; № 11700; заявл. 04.03.1926. Опубликовано: 30.09.1929.

16. ВНИИНМ — 50 лет : сб. статей : [в 4 т.] / Гос. науч. центр Рос. Федерации «Всерос. науч.-исследоват. ин-т неорган. материалов им. акад. А. А. Бочвара». — М., 1995—2000. Т. 2; под. ред. Ф. Г. Решетникова. — 1995. — 314 с.

17. Официальный сайт компании ИВЦ «Инжехим» [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://ingehim.ru/product/oborudovanie/ekstractoryi/pulsatsionnyie-ekstractoryi/> (дата обращения: 18.02.2022).

18. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. Монография. - М.: Машиностроение-1, 2001. - 260 с.

19. Официальный сайт компании ООО «Пищевые насосы» [Электронный ресурс]. - Режим доступа: URL: <https://foodpumps.ru/rotorno-pulsatsionnye-apparatu-ropa/> (дата обращения: 18.02.2022).

20. Коробчук, М. В. Конструкции мешалок вибрационных перемешивающих устройств / М. В. Коробчук, А. Н. Веригин // Химическая промышленность сегодня. – 2021. – № 5. – С. 46-55. – DOI 10.53884/27132854\_2021\_5\_46.

21. Коробчук, М. В. Аппараты виброперемешивания. Обзор конструкций и тенденции развития / М. В. Коробчук, А. Н. Веригин // Химическая технология. – 2022. – Т. 23. – № 2. – С. 80-96. – DOI 10.31044/1684-5811-2022-23-2-80-96.

УДК 535.37

Лим Любовь Андреевна, кандидат химических наук, доцент Департамента нефтегазового дела и нефтехимии Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет

Lim Lyubov Andreevna, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Oil, Gas and Petrochemistry of the Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University

Заболотная Анна Михайловна, старший преподаватель Департамента нефтегазового дела и нефтехимии Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет

Zabolotnaya Anna Mikhailovna, Senior Lecturer, Department of Oil, Gas and Petrochemistry of the Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University

Галкина Дарья Викторовна, студент, Дальневосточный федеральный университет  
Galkina Daria Viktorovna, student, Far Eastern Federal University

## **ПОЛУЧЕНИЕ МИКРОВОЛОКОН ИЗ ПОЛИКАРБОНАТА, ДОПИРОВАННЫХ НОДВМВF<sub>2</sub>**

## **PREPARATION OF POLYCARBONATE MICROFIBERS DOPED WITH НОДВМВF<sub>2</sub>**

Аннотация. Исследована возможность получения материала с высокоразвитой поверхностью контакта и последующим его использованием в качестве матрицы для устройства, детектирующего аммиак и органические амины в газовой фазе. В результате был получен нетканый волокнистый материал, допированный о-гидроксибензоилметанатом дифторида бора с удельной внешней поверхностью 0,51 м<sup>2</sup>/г.

Abstract. The possibility of obtaining a material with a highly developed contact surface and its subsequent use as a matrix for a device detecting ammonia and organic amines in the gas phase was studied. As a result, a nonwoven fiber material doped with o-hydroxydibenzoylmethanate of boron difluoride with a specific surface area of 0.51 m<sup>2</sup>/g was obtained.

Ключевые слова: дикетонаты дифторида бора, хемосенсор, пористые микроволокна.  
Key words: boron diketonates, chemosensor, porous microfibers.

$\beta$ -дикетонаты дифторида бора – вещества с доказанной сенсорной активностью на аммиак и органические амины, отличаются высокой интенсивностью люминесценции как в кристаллическом виде, так и в растворах [1, 2]. Вещество орто-гидроксидибензоилметанат дифторида бора (HODVMBF<sub>2</sub>) имеет в своей структуре гидроксильную группу в орто-положении одного из фенильных колец (см. Рисунок 1), что способствует обнаружению гидратированного аммиака благодаря взаимодействию с акцепторами протонов [2].

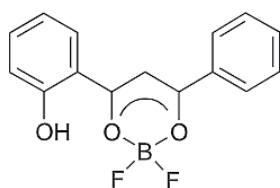


Рисунок 1 – Структурная формула о-гидроксидибензоилметаната дифторида бора (HODVMBF<sub>2</sub>) [2]

Известно, что в работе [2] порошок люминофора растирали на фильтровальной бумаге, помещали в камеру и подавали смесь, содержащую 28 ppm аммиака, после чего регистрировали тушение люминесценции (см. Рисунок 2).

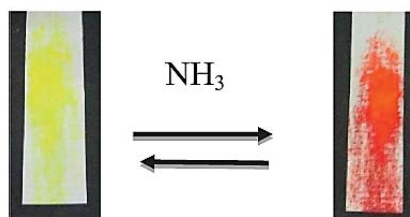


Рисунок 2 – Изменение окраски порошка HODVMBF<sub>2</sub> под действием паров аммиака [2]

Наблюдалось длительное время отклика, тушение люминесценции (желтый на красный) начинается спустя 240 с, а полное происходит за 960 с [2].

Также в работе [3] были исследованы хемосенсорные свойства полимерной люминесцентной композиции (ПЛК) на основе пленки из полистирола, допированной HODVMBF<sub>2</sub> (33 мас. %), при взаимодействии с парами аммиака. При взаимодействии люминофора с парами аммиака наблюдалось изменение окраски с желтой на оранжевую (см. Рисунок 3).

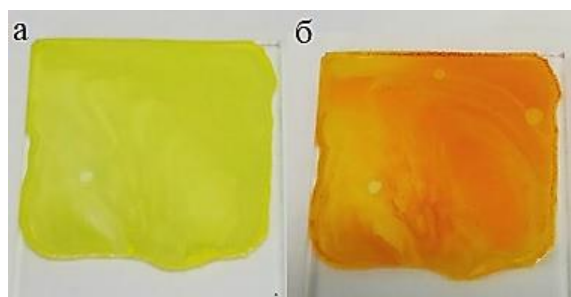
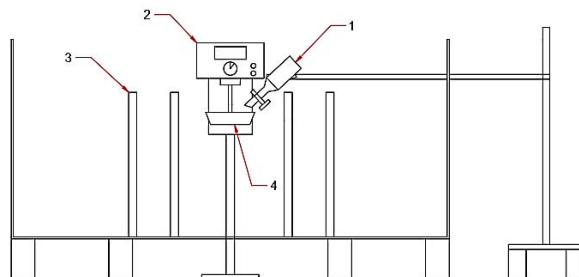


Рисунок 3 – Окраска ПЛК с HODVMBF<sub>2</sub> до (а) и после (б) взаимодействия с аммиаком [3]

На скорость гетерогенной реакции взаимодействия  $\text{HODVMBF}_2$  с аммиаком/органическими аминами прямо пропорционально влияет площадь контакта реагентов. Как известно площадь поверхности соприкосновения реагентов можно увеличить, измельчая твёрдое вещество, данный способ широко используется в химической технологии. Однако площадь контакта можно увеличить при использовании материалов с высокоразвитой поверхностью, например, пористых микро- и нановолокон.

Ранее нами были получены пористые микроволокна из поликарбоната методом бесоплового центробежного прядения (см. Рисунок 4) [4]. В таблице 1 представлены характеристики растворов поликарбоната и волокнистого материала



1 – ёмкость с раствором полимера; 2 – двигатель; 3 – коллекторы;  
4 – формующая насадка

Рисунок 4 – Установка центробежного формования

Таблица 1 – Характеристика растворов поликарбоната и волокнистого материала [4]

№ образца	Концентрация раствора, г/мл	Масса полимера в 30 мл растворителя, г	Выход волокон, г/%	$d \pm \Delta$ , мкм
1	0,19	5,70	~0	–
2	0,2	6,00	2,61/45	$5,24 \pm 0,28$
3	0,21	6,30	4,66/74	$6,44 \pm 0,44$
4	0,22	6,60	4,20/63	$7,21 \pm 0,58$

Было установлено, что данным методом можно получить пористые волокна диаметром от 5 до 7 мкм (см. Рисунок 5).

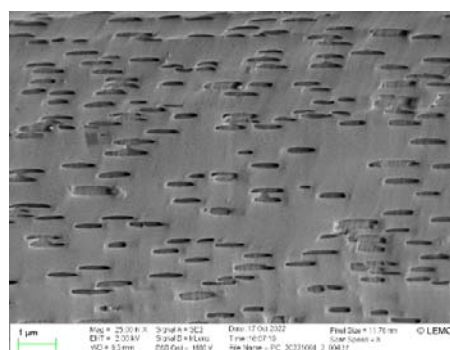
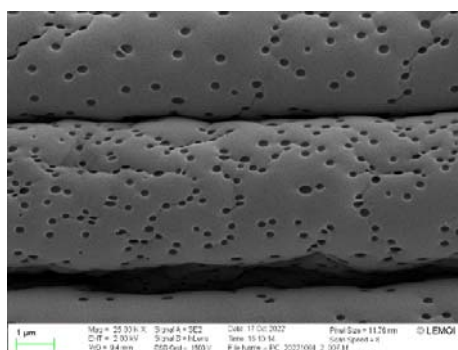


Рисунок 5 – Пористая поверхность поликарбонатных волокон

Форму полимерных волокон можно аппроксимировать в виде цилиндра. В таблице 2 представлена зависимость площади внешней поверхности от диаметра волокон.

Таблица 2 – Площадь поверхности волокна

$d \pm \Delta$ , мкм	$r$ , $\text{м} \cdot 10^{-6}$	$\rho_{\text{ПК}}$ , $\text{г}/\text{см}^3$	$S_{\text{вд}}$ , $\text{м}^2/\text{г}$
$5,24 \pm 0,28$	2,62	1,2	0,63
$6,44 \pm 0,44$	3,22		0,51
$7,21 \pm 0,58$	3,61		0,46

Из полученных данных видно, что при уменьшении диаметра волокна увеличивается удельная площадь внешней поверхности. Соответственно, для получения более развитой поверхности полимерной матрицы необходимо использовать максимально тонкое волокно, однако получать волокно при концентрации поликарбоната 0,2 г/мл экономически не выгодно, так как при данной концентрации наименьший выход волокнистого материала.

Для получения волокнистого материала, допированного  $\text{HODBMBF}_2$ , была выбрана концентрация полимерного раствора – 0,21 г/мл, что обеспечивает диаметр волокон –  $6,44 \pm 0,44$  мкм.

В результате были получены полимерные волокна, допированные орто-гидроксидибензоилметанатом дифторида бора (2,5 мас. %). Волокна были проверены на люминесценцию под УФ излучением (см. Рисунок 6).

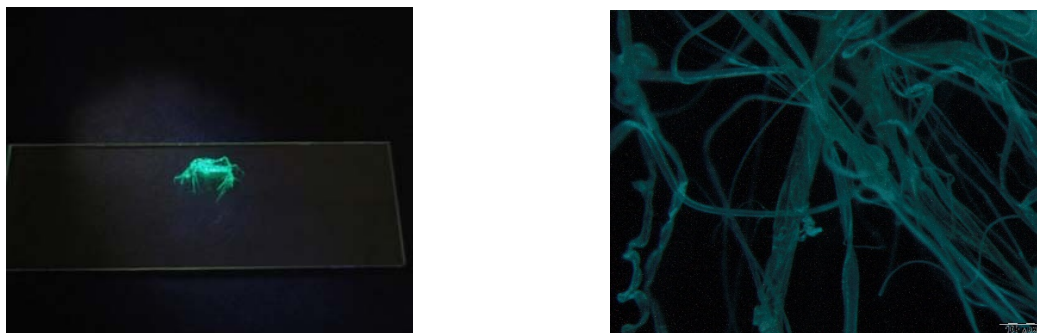


Рисунок 6 – Микроволокна из поликарбоната, допированные  $\text{HODBMBF}_2$  (2,5 мас. %) (снимки при облучении УФ светом, 254 нм)

Таким образом, показана возможность получения методом бесшпального центробежного прядения полимерных волокнистых материалов с люминесцентными добавками для разработки перспективных хемосенсорных устройств.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ring Size Effects on Multi-Stimuli Responsive Luminescent Properties of Cyclic Amine Substituted  $\beta$ -Diketones and Difluoroboron Complexes / F. Wang, D. Song, D. Dickie, C. Fraser. – DOI 10.1002/asia.201801576 // Chemistry - An Asian Journal. – 2019. – Vol. 14, № 10. – P. 1849-1859.
2. Fedorenko, E. V. o-Hydroxydibenzoylmethanate of boron di fluoride : A complex with multi-stimuli-responsive emission effects / E. V Fedorenko, A.G. Mirochnik, A. V Gerasimenko – DOI 10.1016/j.saa.2019.117367 // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2019. – Vol. 223. – P. 1-10.
3. Иштокина, Е. Ю. Обратимые хемосенсорные свойства полимерной композиции на основе о-гидроксидибензоилметанат дифторида бора / Е. Ю. Иштокина, А. А. Хребтов // Региональная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных по естественным наукам, 15-30 апреля 2021 г. : сборник мат. конференции. – Владивосток : Дальневосточный федеральный ун-т, 2021. – С. 489-491.
4. Galkina, D. V. Polycarbonate as a material for molding nonwoven fiber materials / D. V. Galkina // The 9th annual student scientific conference in english, 25-31 May 2022 : conference proceedings. – Vladivostok : Far Eastern Federal University, 2022. – P. 44-47.

Матрохина Анна Николаевна, студент, Ивановский государственный химико-технологический университет

Matrokhina Anna Nikolaevna, student, Ivanovo State University of Chemistry and Technology

Трифонова Ирина Павловна, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры «Химии и технологии высокомолекулярных соединений», Ивановский государственный химико-технологический университет

Trifonova Irina Pavlovna, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds, Ivanovo State University of Chemistry and Technology

Бурмистров Владимир Александрович, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры «Химии и технологии высокомолекулярных соединений», Ивановский государственный химико-технологический университет

Burmistrov Vladimir Aleksandrovich, Doctor of Chemistry, Professor, Professor of the Department of Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds, Ivanovo State University of Chemistry and Technology

## **МИКРОВОЛНОВОЙ СИНТЕЗ N-АЛКИЛИРОВАННОГО ИМИДАЗОЛА**

### **MICROWAVE SYNTHESIS OF N-ALKYLATED IMIDAZOLE**

Аннотация. Без использования растворителя методом микроволнового нагрева был проведен синтез 1-пентилимидазола. Выбранные условия синтеза позволили получить выход продукта 70%. Соединение было охарактеризовано методом ЯМР <sup>1</sup>H.

Abstract. The synthesis of 1-pentylimidazole was carried out without the use of a solvent by microwave heating. The chosen synthesis conditions made it possible to obtain a product yield of 70%. The compound was characterized by <sup>1</sup>H NMR.

Ключевые слова: азагетероциклы, имидазол, микроволновый синтез, N-алкилированный имидазол.

Key words: azaheterocycles, imidazole, microwave synthesis, N-alkylated imidazole.

В течение нескольких последних десятилетий интерес к использованию микроволнового нагрева в органическом синтезе неуклонно возрастает. Это связано с разработкой и внедрением более экологически безопасных и энергосберегающих технологий. К преимуществам проведения реакций в условиях микроволнового облучения можно отнести: легкость регулирования температуры, равномерность прогрева реагирующих веществ по всему объему, безынерционность нагрева, отсутствие теплоносителя; возможность мгновенного прекращения подачи энергии в случае необходимости. По сравнению с традиционными способами нагрева применение микроволнового излучения позволяет сократить время процесса во много раз и вести процесс в «сухих» условиях, т.е. в отсутствии растворителя [1].

Азагетероциклы с пятичленным циклом, особенно пирролы, пиразолы, имидазолы, триазолы, тетразолы и их конденсированные производные, представляют собой биологически активные вещества, обладающие антибактериальными, противогрибковыми, противовоспалительными, антигистаминными, обезболивающими и другими свойствами [2-4]. С учетом этих соображений исследователи уделяют большое внимание синтезу новых соединений с таким скелетом как с использованием традиционной, так и микроволновой технологии нагрева.

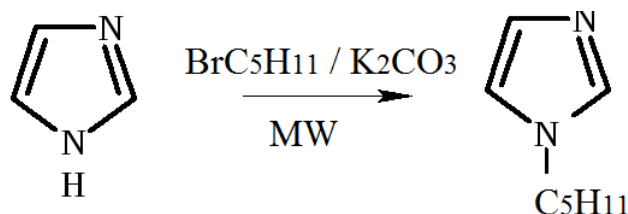
N-алкилирование гетероциклических соединений, содержащих кислый атом водорода, присоединенный к азоту, обычно осуществляется путем обработки этих соединений соответствующим основанием (гидридом или амидом натрия или металлоорга-

ническими соединениями) с последующей обработкой полученных солей алкилирующим агентом [5].

Альтернативой является проведение реакции таких гетероциклических соединений в условиях межфазного катализа, при котором галогениды реагируют непосредственно с гетероциклическими соединениями, не превращая их в соли на предварительных стадиях [1,6].

Особого внимания заслуживают реакции, протекающие в условиях микроволнового облучения по другим механизмам и приводящим к иным продуктам, чем в условиях традиционного конвекционного нагрева. Так, проведение алкилирования триазола бензил бромидом в условиях микроволнового облучения позволяет получить преимущественно продукт N-алкилирования, а в условиях конвекционного нагрева образуется исключительно продукт 1,4-диалкилирования. Выход продуктов в условиях микроволнового и конвекционного нагрева составляют 70% и 14% соответственно [7]. В работе [8] авторами установлено, что реакции на носителях завершаются в течение нескольких минут с высоким выходом, хотя в условиях конвекционного нагрева в жидкой фазе реакции проходят за часы, а на носителе для завершения реакции требуется нескольких суток.

Синтез алкилированного производного имидазола был проведен по методике, предложенной в работах [9,10].



Реагенты: имидазол (99%), n-пентил бромид, тетрабутиламмоний бромид были приобретены у Aldrich и использовались в том виде, в каком они были получены. Карбонат калия был предварительно высушен и измельчен.

Имидазол смешивали с 50%-ным избытком n-пентил бромида и каталитическим количеством тетрабутиламмоний бромида. Смеси сорбировали на карбонат калия и затем облучали в открытом сосуде в микроволновой печи от 40с до 90с и мощности 300Вт. Реакционную смесь обрабатывали подходящим растворителем (например, ТГФ или  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ), разделение 1-пентилимидазола и исходных реагентов проводили на хроматографической колонке с силикагелем. Наибольший выход продукта 70% наблюдался при обработке в течение 80с.

Соединение было охарактеризовано методом ЯМР  $^1\text{H}$ . Спектры ЯМР  $^1\text{H}$  образцов получены с использованием спектрометра Avance 500 (Bruker) на 5 мм датчике ТВ1 1H/31P/D-BB z-GRD. Рабочая частота на ядрах  $^1\text{H}$  составляла 500,17 МГц. Спектры получены в  $\text{CDCl}_3$  при комнатной температуре. Химические сдвиги ( $\delta$ ) представлены в м.д. по шкале, откалиброванной по тетраметилсилану (ТМС), который используется в качестве внутреннего стандарта. Спектральные изменения при синтезе N-алкилимидазолов связаны с появлением резонансных сигналов ароматических протонов 4 и 5 имидазольного кольца при 7,09 и 6,99 м.д., тогда как в спектре исходного имидазола имеется один сигнал при 7,15 м.д. вследствие быстрых таутомерных переходов.

**Благодарности.** Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671)

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Deshayes S., Liagre M., Loupy A., Luche J.-L., Petit A. Microwave activation in phase transfer catalysis // *Tetrahedron*. 1999. V. 55. Is. 36. P. 10851-10870.



2. Amariuca-Mantu D., Mangalagiu V., Danac R., Mangalagiu I.I. Microwave Assisted Reactions of Azaheterocycles Formedicinal Chemistry Applications // *Molecules*. 2020. V.25. N.3. P 716-735.
3. Ali I., Lone M.N., Aboul-Enein H.Y. Imidazoles as potential anticancer agents // *MedChemComm*. 2017. N.8. P.1742–1773.
4. Mantu D., Antoci V., Moldoveanu C., Zbancioc G., Mangalagiu I.I. Hybrid imidazole (benzimidazole)/ pyridine (quinoline) derivatives and evaluation of their anticancer and antimycobacterial activity // *J. Enzym. Inhib. Med. Chem*. 2016. N.31. P. 96–103.
5. Gilchrist T. L. *Heterocyclic chemistry* // Longman, 2nd edition, 1992.
6. El-Sayed A. M., Abd Allah O. A., El-Saghier A. M. M., Mohamed Sh. K. Synthesis and Reactions of Five-Membered Heterocycles Using Phase Transfer Catalyst (PTC) Techniques // *Journal of Chemistry*. 2014. V. 2014. Article ID 163074. 47 p.
7. Abenħaim D., Díez-Barra E., Hoz A.D.L., Loupy A., Sánchez-Migallón A. Selective Alkylations of 1,2,4-Triazole and Benzotriazole in the Absence of Solvent // *Heterocycles* Volume. 1994. V. 38, N 4. P. 793-802.
8. Bogdal D., Lukasiewicz M. Microwave-Assisted Oxidation of Alcohols Using Aqueous Hydrogen Peroxide // *Synlett*. 2000. N 1. P.143-145.
9. Bogdal D., Pielichowski J., Jaskot K. Remarkable Fast N-Alkylation of Azaheterocycles under Microwave Irradiation in Dry Media // *Heterocycles*. 1997. V.45. N.4. P. 715-722.
10. Ibrahim M. A.M., Messali M., Moussa Z., Abdullah Y. Alzahrani, Alamry S. N., Hammouti B. Corrosion Inhibition of Carbon Steel by Imidazolium and Pyridinium Cations Ionic Liquids in Acidic Environment // *Portugaliae Electrochimica Acta*. 2011. V.29. N.6. P.375-389.

УДК 541.49; 547.78; 535.34

Морозова Татьяна Дмитриевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Morozova Tatiana Dmitrievna, student of Komsomolsk-na-Amure State University

Шакирова Ольга Григорьевна, доктор химических наук, профессор, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Shakirova Olga Grigorievna, Dr. Sci. Chem., Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

**СИНТЕЗ, РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОЕ И СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСА КОБАЛЬТА(II)  
С 2,4-ДИМЕТИЛПИРАЗОЛО[1,5-А]БЕНЗИМИДАЗОЛОМ**

**SYNTHESIS, X-RAY DIFFRACTION AND SPECTROSCOPIC STUDY  
OF THE COBALT(II) COMPLEX  
WITH 2,4-DIMETHYLPYRAZOLO[1,5-A]BENZIMIDAZOLE**

Аннотация. Синтезирован новый комплекс кобальта(II) с 2,4- диметилпиразоло[1,5-а]бензимидазолом (L) состава  $[\text{CoL}_2(\text{NO}_3)_2]$ . Соединение изучено с помощью методов РФА, электронной и ИК-спектроскопии. Методом рентгеноструктурного анализа определена его молекулярная и кристаллическая структура. Полученные данные свидетельствуют, что координационный полиэдр в исследуемом комплексе формируется за счет атомов азота двух монодентатно координированных лигандов и двух бидентатно-циклически координированных нитрат-анионов.



Abstract. A new complex of the cobalt(II) with 2,4-dimethylpyrazolo[1,5-a]benzimidazole (L) of the composition  $[\text{CoL}_2(\text{NO}_3)_2]$  has been synthesized. The compound was studied using X-ray, electron and IR spectroscopy methods. It's molecular and crystal structure was determined by X-ray diffraction analysis. The data obtained indicate that the coordination polyhedron in the studied complex is formed by nitrogen atoms of two monodentate-coordinated ligands and two bidentate-cyclic coordinated nitrate anions.

Ключевые слова: синтез, комплекс кобальта(II), 2,4-диметилпиразоло[1,5-а]бензимидазол, спектроскопия, структура.

Keywords: synthesis, cobalt(II) complex, 2,4 dimethylpyrazolo[1,5-a]benzimidazole, spectroscopy, structure.

Основными факторами, влияющими на цитотоксичность и механизм действия координационных соединений, являются природа металла, его степень окисления и окислительно-восстановительный потенциал, геометрия координационной сферы, природа лиганда и др. [1]. Поэтому целенаправленно занимаясь дизайном координационных соединений можно проводить «избирательную настройку» их противоопухолевого действия. Замена лиганда даже на его ближайший аналог может изменить не только величину цитотоксичности комплекса, но и механизм связывания с ДНК [2].

Целью текущего исследования является получение новых координационных соединений биогенных металлов, обладающих магнитной и, возможно, биологической активностью. В качестве лиганда использовано новое соединение 2,4-диметилпиразоло[1,5-а]бензимидазол (L, рис.1), получен новый комплекс кобальта(II) и проведена его идентификация с помощью методов РСА, РФА, электронной и ИК-спектроскопии.

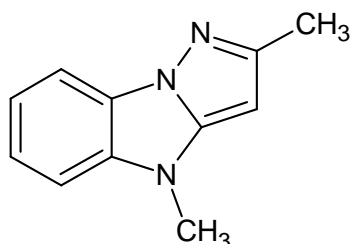


Рисунок 1 – Структура 2,4-диметилпиразоло[1,5-а]бензимидазола (L)

Комплекс  $[\text{CoL}_2(\text{NO}_3)_2]$  получен при взаимодействии ацетоновых растворов  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$  и L при мольном соотношении 1:2. Соединение при хранении на воздухе при комнатной температуре устойчиво, во влажном воздухе может сорбировать до 0.5 моль воды.

В ИК-спектрах L (полученных на FTIR-спектрометре IRAffinity-S1 (Shimadzu) в интервале от 4000 до 400  $\text{cm}^{-1}$  в КВт при комнатной температуре) присутствуют полосы валентных колебаний  $\nu(\text{C-H})$  в диапазоне 3125-2675  $\text{cm}^{-1}$  и чувствительных к координации колебаний пиразоло[1,5-а]бензимидазольного остова при 1622-1464  $\text{cm}^{-1}$ . В спектрах синтезированного комплекса валентные колебания пиразольного и имидазольного колец смещены на ~30-50  $\text{cm}^{-1}$  в высокочастотную область относительно валентных колебаний в молекуле L, что свидетельствует о координации атомов азота пиразольного фрагмента к металлу [3]. Следует отметить, что полосы колебаний нитрат-иона ( $\nu_5$  в интервале 1490-1620  $\text{cm}^{-1}$ ,  $\nu_1$  в интервале 1160-1290  $\text{cm}^{-1}$ ,  $\nu_2$  в интервале 990-1040  $\text{cm}^{-1}$ ) полностью перекрываются полосами колебаний гетероциклов R и  $\delta(\text{C-H})$ , что не позволяет по данным средней ИК-спектроскопии сделать вывод о способе координации этого аниона. В низкочастотном диапазоне в спектре комплекса регистрируются низкоинтенсивные полосы колебаний связей  $\text{Co-N}$  (394 и 268  $\text{cm}^{-1}$ ) и  $\text{Co-O}$  (304 и 284  $\text{cm}^{-1}$ ), что позволяет считать, что анионы к металлу координированы бидентатно [4].

По данным РСА, две молекулы лиганда координируются к иону кобальта(II) монодентатно атомом азота пиразольного кольца. Нитрат-ионы достраивают координационный узел, координируясь атомами кислорода бидентатно-циклически. Таким образом, реализуется координационный узел  $\text{CoN}_2\text{O}_4$ , который представляет собой искаженный октаэдр (рис. 2). Кристаллическая структура относится к островному типу – молекулы упаковываются в пространстве без образования дополнительных связей друг с другом (рис. 3).

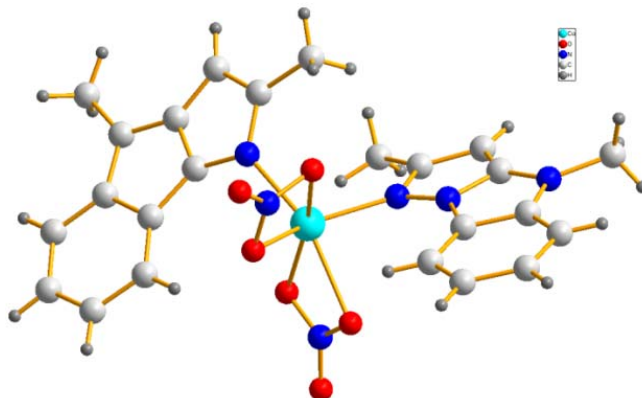


Рисунок 2 – Молекулярное строение комплекса  $\text{CoL}_2(\text{NO}_3)_2$

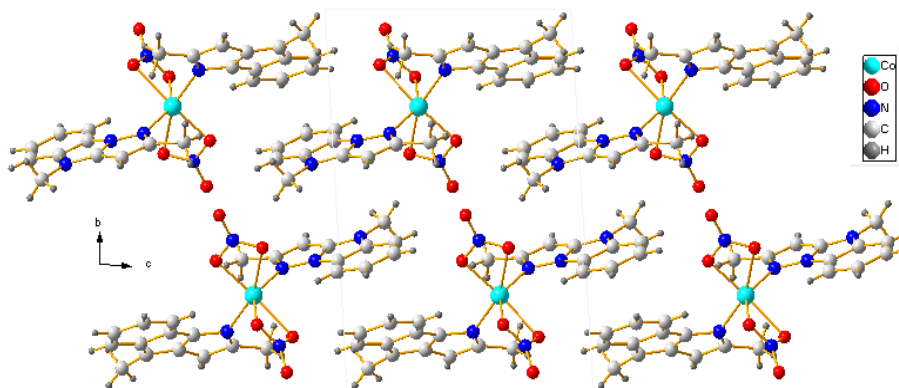


Рисунок 3 – Кристаллическое строение комплекса  $\text{CoL}_2(\text{NO}_3)_2$

Таким образом, изучено комплексообразование нового лиганда 2,4-диметилпиразоло[1,5-а]бензимидазол (L) с ионами кобальта(II). Методом ИК-спектроскопии в средней и низкочастотной областях доказано, что лиганд в комплексе координирован к металлу за счет атомов азота двух монодентатно координированных лигандов и двух бидентатно-циклически координированных нитрат-анионов.

Изучение биологической активности комплекса в отношении различных клеточных линий рака будет продолжением работы.

**Благодарности.** Авторы благодарят Министерство образования и науки Хабаровского края (грант ХК 84С/2022) за поддержку работы.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Dabrowiak, James C. Metals in medicine // John Wiley & Sons. 2017. 441 p.
2. Štarha P., Trávníček Z. “Non-platinum complexes containing releasable biologically active ligands” // Coord. Chem. Rev. 2019, vol. 395, pp. 130–145. doi: 10.1016/j.ccr.2019.06.001.
3. Ливер Э. Электронная спектроскопия неорганических и координационных соединений. // Ч. 2. М.: Мир. 1987. 443 с.
4. Накамото К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений: Пер с англ. // М.: Мир. 1991. 536 с.

Орлова Татьяна, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник  
НОЦ инфохимии, университет ИТМО

Orlova Tetiana, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher of In-  
fochemistry Scientific Center, ITMO University

Пивень Анастасия Олеговна, студент, университет ИТМО

Piven Anastasiia Olegovna, student of ITMO University

Матюшова Ольга Андреевна, студент, университет ИТМО

Matyushova Olga Andreevna, student of ITMO University

Зырянова Полина Игоревна, студент, университет ИТМО

Zyryanova Polina Igorevna, student of ITMO University

Носкова Ульяна Вячеславовна, студент, университет ИТМО

Noskova Ulyana Vyacheslavovna, student of ITMO University

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИСТИКИ САМОПРОИЗВОЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАТТЕРНОВ В СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ**

### **ESTABLISHMENT OF SPONTANEOUS FORMATION STATISTICS OF DYNAMIC PATTERNS IN LIGHT-RESPONSIVE NEMATIC LIQUID CRYSTALS**

Аннотация. В данной работе представлены результаты проведения статистического анализа самопроизвольного формирования динамически топологически сложны локализованных структур в тонких пленках светочувствительных хиральных нематиков путем индуцирования фотохимического превращения молекул хиральной органической примеси.

Abstract. Current work presents the results of the spontaneous formation statistical analysis of dynamic topologically complex localized twisted structures in thin films of light-responsive chiral nematic liquid crystal by optically inducing photochemical transformation of chiral organic impurity molecules.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, нематики, холестерики, лазерная генерация, светоиндуцированная генерация, оптические и фотонные приложения.

Key words: liquid crystals, nematics, cholesterics, laser generation, light-induced generation, optical and photonic applications.

#### **Введение**

На сегодняшний день топологически сложные локализованные структуры в хиральных нематических жидких кристаллах нашли широкое применение в оптике и фотонике в качестве составляющих оптических элементов [1]. Например, упорядоченный массив таких структур в нематических жидких кристаллах может быть использован как двумерная дифракционная решетка, позволяющая сформировать управляемые фазовые сингулярности в дифрагированных лазерных пучках [2].

В предыдущих исследованиях была изучена генерация разнообразных статических топологических структур путем оптически индуцированной локальной переориентации жидкокристаллических молекул в фотопассивных хиральных нематиках с помощью сфокусированных Гауссовых световых пучков [3]. Новый метод, основанный на светоиндуцированном управлении шагом холестерической спирали, позволяет создавать различные как статические, так и уникальные динамические структуры при помощи сфокусированного ультрафиолетового Гауссова пучка мощностью всего в десятки нановатт. Целью нашего исследования является детальное изучение взаимосвязи между топологией и поведением светоиндуцированных локализованных структур в тонких пленках фотоактивных хиральных нематиков [4].

### Основная часть

В настоящей работе мы демонстрируем получение динамических локализованных структур и управление их поведением, индуцируя фотохимическое превращение хиральных примесных молекул в сфокусированном лазерном пучке. Это, в свою очередь, вызывает локальное уменьшение шага холестерической спирали и формирование топологических сложных структур как результат комбинированного эффекта хиральности жидкого кристалла, условий сцепления на подложках и локализованного освещения [5, 6].

Целью проведенного эксперимента является установление статистики формирования динамических локализованных структур  $R_1$  и  $R_2$  из статичной структуры  $S_2$  при увеличении падающей на образец мощности записывающего Гауссова пучка в пленках фрустрированного хирального нематического жидкого кристалла.

В качестве образца в проведенном исследовании использовали нематический жидкий кристалл E7, в который была добавлена светочувствительная молекулярная примесь. Эта легирующая добавка эффективно поглощает свет в ближнем ультрафиолетовом диапазоне около 375 нм. При сфокусированном освещении локальной области образца происходит фотохимическая реакция, сопровождающаяся изомеризацией молекул и изменению закручивающей способности примеси, что приводит к уменьшению шага холестерической спирали. При этом происходит локальный срыв фрустрированного состояния хирального нематического жидкого кристалла и образуется локализованная хиральная структура.

Начальным этапом эксперимента являлось создание статичной локализованной структуры  $S_2$ , стабильно существующей при мощности Гауссова светового пучка 18 нВт. Затем после 15 минут ожидания, что соответствует времени достижения равновесного состояния для локализованных хиральных структур, мощность увеличивалась до 20 нВт и наблюдалось самопроизвольное формирование динамических структур  $R_1$  и  $R_2$ . Эксперимент повторили 20 раз для структур  $S_2$  с противоположной хиральностью.

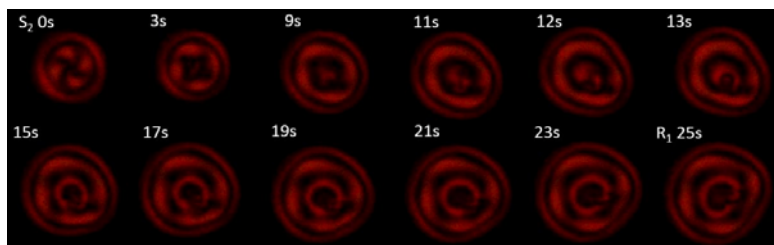


Рисунок 1 – Формирование динамических структур  $R_1$  и  $R_2$  из левозакрученной статичной структуры  $S_2$

### Заключение

В результате эксперимента был проведен статистический анализ самопроизвольного формирования динамических структур  $R_1$  и  $R_2$  из статичной структуры  $S_2$ . Было установлено, что, в случае правозакрученной начальной структуры  $S_2$ , формирование динамической структуры  $R_1$  происходит в 7 из 10 случаев, а структуры  $R_2$ , соответственно, в 3 из 10 случаев. При генерации из левозакрученной начальной структуры  $S_2$ , формирование динамической структуры  $R_1$  происходит в 6 из 10 случаев, а структуры  $R_2$ , соответственно, в 4 из 10 случаев, как указано в Таблице. В то время как вращательное поведение структуры  $R_1$  уже известно, динамическое поведение структуры  $R_2$  остается неизученным и требует дальнейших исследований.

Таблица 1 – Результат эксперимента

	Начальная левозакрученная структура $S_2$	Начальная левозакрученная структура $S_2$
Сформированная динамическая структура $R_1$	7/10	6/10
Сформированная динамическая структура $R_2$	3/10	4/10

Актуальность наших исследований обусловлена интенсивными научнотехническими разработками в области перестраиваемых рефрактивных, дифракционных и сингулярных оптических элементов, ячеек оптической памяти, устройств для структурирования световых пучков [1, 3], а также элементов транспортировки микро- и наночастиц [5, 7].

Полученные микроразмерные двулучепреломляющие структуры могут быть использованы, например, для создания многофункционального материала с произвольным набором микроскопических линз или дефлекторов; в качестве генераторов оптических вихрей; для перспективного многофункционального материала в области мягкой роботики.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hess A.J., Poy G., Tai J. B., Zumer S., Smalyukh I. I. Control of Light by Topological Solitons in Soft Chiral Birefringent Media // *Physical Review X*. 2020. № 10.
2. Yang B., Brasselet E. Arbitrary vortex arrays realized from optical winding of frustrated chiral liquid crystals // *Journal of the Optical Society of America*. 2013. № 15.
3. Ackerman P.J., Qi Z., Smalyukh I.I. Optical generation of crystalline, quasicrystalline, and arbitrary arrays of torons in confined cholesteric liquid crystals for patterning of optical vortices in laser beams // *Physical Review E*. 2012. № 86.
4. Smalyukh I.I., Lansac Y., Clark N.A., Trivedi R.P. Three-dimensional structure and multistable optical switching of triple-twisted particle-like excitations in anisotropic fluids // *Nature Materials*. 2010. № 9. С. 139–145.
5. Orlova T., Lancia F., Lossert C., Lamsaard S., Katsonis N., Brasselet E. Revolving supramolecular chiral structures powered by light in nanomotor-doped liquid crystals // *Nature Nanotechnology*. 2018. № 13. С. 304–308.
6. Loussert C., Brasselet E. Multiple chiral topological states in liquid crystals from unstructured light beams // *Applies Physics Letters*. 2014. № 104.
7. Evans J.S., Ackerman P.J., Broer D.J., Lagemaat J., Smalyukh I.I. Optical generation, templating, and polymerization of three-dimensional arrays of liquid-crystal defects decorated by plasmonic nanoparticles // *Physical Review E*. 2013. № 87.

УДК 678.09

Проценко Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Protsenko Alexander Evgenievich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

Люхо Илья Андреевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Lyukho Ilya Andreevich, student of Komsomolsk-na-Amure State University

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕСТРУКЦИИ ЭПОКСИДНОЙ МАТРИЦЫ И СТЕКЛОВОЛОКОННОГО НАПОЛНИТЕЛЯ ПКМ В СРЕДЕ ЭТИЛОВОГО СПИРТА В ПРИСУТСТВИИ NAOH**

#### **STUDY OF DESTRUCTION OF EPOXY MATRIX AND PCM GLASS FILLER IN ETHYL ALCOHOL IN THE PRESENCE OF NAOH**

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию процесса сольволиза полимерного композиционного материала на основе эпоксивинилэфирного связующего марки Dekane 411-350 и стеклоткани 1250-Т30-290 (Umatex), установлению факта деструкции материала при заданных условиях и зависимости между степенью разложения матрицы и количеством щелочи.

Abstract. This article is devoted to the study of the process of solvolysis of a polymer composite material based on Derakane 411-350 epoxy vinyl ester binder and glass fibers, to establish the fact of material destruction under given conditions and the relationship between the degree of matrix decomposition and the amount of alkali.

Ключевые слова: ПКМ, сольволиз, деструкция, рециклинг.

Key words: PCM, experiment, solvolysis, destruction, recycling.

### Введение

Существует проблема накопления отходов полимерных производств, в частности полимерных композиционных материалов (ПКМ). Отходы ПКМ образуются в ходе его обработки для дальнейшего использования и представляют собой обрезки материала. Помимо этого, существуют материалы, поврежденные в процессе эксплуатации, устаревшие либо изношенные, уже не требующиеся по месту пользования. Таким образом, с возрастанием объемов производства и потребления подобной продукции возрастает количество создаваемых отраслью трудно перерабатываемых отходов, которые разлагаются несколько сотен лет при утилизации захоронением.

Целью работы является установление оптимального режима утилизации ПКМ методом сольволиза, а также оптимизация этого процесса.

Сольволиз представляет собой один из методов утилизации трудно перерабатываемых отходов, основанный на взаимном обменном разложении растворителя и растворяемого вещества. В качестве растворителя используется спирт, в качестве растворяемого вещества – полимерный композиционный материал.

### Основная часть

Для осуществления процесса сольволиза используются термостойкие, инертные к агрессивным средам, устойчивые к перепадам давления фторопластовые реакторы в металлической обечайке.

В качестве основных параметров процесса были взяты следующие: масса спирта, концентрация спирта, масса щелочи, масса образца, время и температура эксперимента.

Оценка результата проводилась с помощью метода термогравиметрии посредством сравнения потери массы образцов.

Экспериментальные исследования сольволиза проводились при 250 °С.

В первой серии экспериментов продолжительностью процесса составила 3 часа, масса образцов составляла 9,5 г, концентрация щелочи была выбрана 5, 7, 9 % от массы спирта.



Рисунок 1 – образцы, обработанные в растворе спирта, содержащего щелочи, %:  
а) 5, б) 7, в) 9

По изображению видно, что с повышением массы щелочи в реакторе увеличилась степень разложения полимерной матрицы. Образец, содержание щелочи в котором составило 9 % расслаивался, волокна разрушались, 7 % остался с полимерной матрицей, препятствующей расслоению, 5 % прореагировал хуже остальных.

Во второй серии экспериментов продолжительность сольволиза составила 1,5 часа, массой образцов составляла 1,5 г при концентрации едкого натра 2, 5 и 10 %.

Данная серия экспериментов производилась для установления пропорции массы щелочи к массе образца, в ходе выполнения которых наблюдалось более качественное расслоение при увеличении концентрации щелочи. Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 1.



Рисунок 2 – образцы, обработанные в растворе спирта, содержащего щелочи, %:  
а) 2, б) 5, в) 10

Для оценки степени удаления полимерной матрицы использовался метод термogrавиметрического анализа. По потере массы оценивалась степень деструкции. Относительно количества взятых веществ была рассчитана пропорция массы щелочи к массе образца. На рисунке 3 представлен график зависимости степени деструкции от соотношения масс щелочь/матрица.

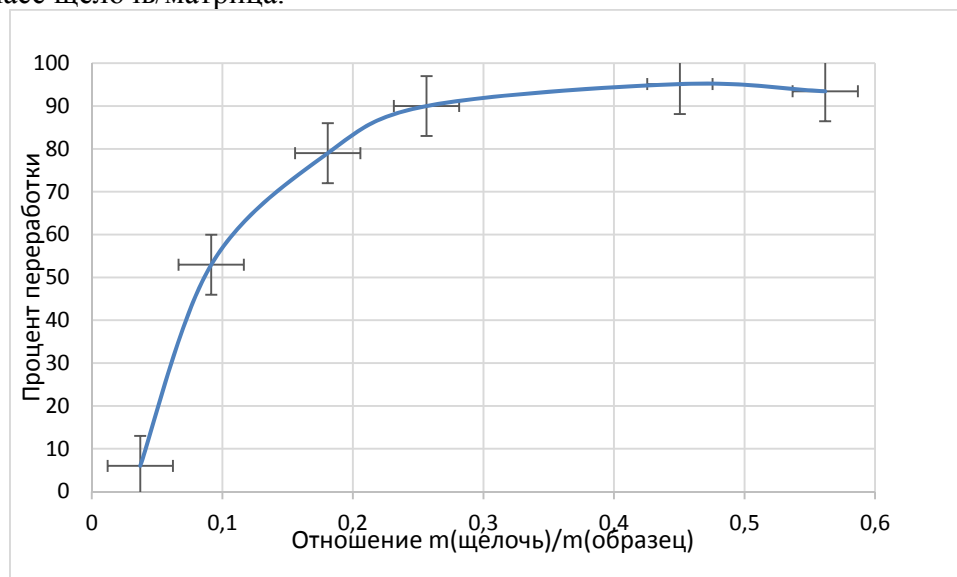


Рисунок 3 – Зависимость степени деструкции от соотношения щелочь/образец

### Заклучение

В работе была произведена серия экспериментов с изменяющимися входными данными, в ходе которых установлена зависимость между переменными. Исследована возможность переработки полимерных композиционных материалов методом сольволиза. Таким образом, установлено, что едкий натр является катализатором процесса деструкции полимерной матрицы в процессе алкоголиза в среде этилового спирта. Увеличение концентрации едкого натра способствует ускорению сольволиза. При соотношении щелочь/композит  $\sim 0.15\%$  достигается полное удаление матрицы из композита. За счет присутствия едкого натра происходит ускорение деструкции, однако, стеклянный наполнитель также разрушается. Полученные продукты возможно использовать в качестве дисперсных наполнителей в композитах. Сольволизная жидкость содержит органические компоненты возможные для применения в органическом синтезе.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Protsenko, A.E., Pimenova, E.D., Petrov, V. V. Recycling of glass fibers sheets from thermoset reinforced plastic using thermolysis method // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 734, № 1. P. 012185.
2. Соловьев В.А., Черный С.П. Искусственный интеллект в задачах управления. Ин-теллектуальные системы управления технологическими процессами // Владивосток : Дальнаука. 2010. – 267 с.
3. Yang P, Zhou Q, Yuan X X, Van Kasteren J M N and Wang Y Z 2012 Highly efficient solvolysis of epoxy resin using poly(ethylene glycol)/NaOH systems Polym. Degrad. Stab. 97 1101–6
4. Protsenko A E and Petrov V V 2022 Recycling of fiberglass fillers obtained from polymer composites based on an epoxy vinyl ester binder Mech. Compos. Mater. 58 1–12
5. Protsenko A. E., Petrov V. V. Recycling of fiberglass fillers obtained from polymer composites based on an epoxy vinyl ester binder //Mechanics of Composite Materials. – 2022. – Т. 58. – №. 4. – С. 537-544.
6. Еренков О. Ю., Петрова С. И. Новый подход к рециклингу термопластов //Современные материалы, техника и технологии. – 2016. – №. 1 (4). – С. 61-66.

УДК 534

Сапожник Ксения Романовна, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Sapozhnik Ksenya Romanovna, postgraduate, Komsomolsk-na-Amure State University

Божоев Илгиз Чыныбаевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Bojoev Ilgiz Chynybaevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Башков Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов»

Bashkov Oleg Victorovich, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department "Materials Science and Technology of New Materials", Komsomolsk-na-Amure State University

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАТОРА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

### MODELLING AND CALCULATION OF THE CONCENTRATOR FOR AN ULTRASONIC OSCILLATORY SYSTEM FOR VERY HIGH CYCLE LOADING

Аннотация. Приведены расчетные и экспериментальные данные по результатам моделирования концентратора ультразвуковой колебательной системы, предназначенной для проведения ультразвуковых усталостных испытаний. Показано, что усиление амплитуды смещения на свободном торце концентратора может быть достигнуто не только посредством изменения формы образующей самого элемента колебательной системы, но и благодаря варьированию соотношения размеров его ступеней. Моделирование проведено для ступенчатых концентраторов с катеноидальным переходом.

Abstract. The calculated and experimental data on the results of modeling the concentrator of an ultrasonic oscillatory system designed for ultrasonic fatigue testing are presented. It is shown that the amplification of the displacement amplitude at the free end of the concentrator can be achieved not only by changing the shape of the element of the oscillatory system itself,



but also by varying the ratio of the sizes of its stages. The simulation was carried out for step concentrators with a catenoidal transition.

Ключевые слова: концентратор, ультразвуковая колебательная система, коэффициент усиления.

Key words: concentrator, ultrasonic oscillatory system, amplification factor.

Интерес к исследованию режима сверхмногоциклового нагружения обусловлен возникшей необходимостью в оценке усталостной долговечности материалов, работающих в условиях долговременного высокочастотного воздействия. Обнаружено, что воздействующие на детали (конструкции) в течение длительного времени вибрационные нагрузки, амплитуды напряжения которых могут не превышать предела текучести и предела усталости (установленного для многоциклового режима), могут становиться причиной разрушения [1]. При изучении морфологии поверхности излома установлено, что отличительной особенностью разрушения при сверхмногоцикловом режиме является подповерхностный очаг зарождения микротрещин, приводящий к характерному виду разрушения типа «рыбий глаз» [2]. Механизмы зарождения и распространения таких трещин все еще находятся в стадии активного обсуждения, потому исследование материалов в сверхмногоцикловом режиме нагружения требует детального экспериментального изучения.

Режим сверхмногоциклового нагружения подразумевает испытания материала на базе не менее чем  $10^9$  цикла и более. Сократить временные затраты на осуществление такого нагружения позволяют испытательные резонансные ультразвуковые усталостные машины или установки. В данной статье приведены экспериментальные данные, полученные с использованием установки, описанной в [3].

Любая ультразвуковая технологическая установка представляет собой источник энергии (генератор ультразвуковых колебаний) и ультразвуковую колебательную систему, состоящую из активного элемента (преобразователя), согласующего элемента (концентратора) и образца или рабочего инструмента (в зависимости от назначения установки). Основной характеристикой колебательной системы является резонансная частота, позволяющая добиваться максимальных значений амплитуд колебательных смещений. Каждый из элементов системы выполняет свою функциональную роль: генератор обеспечивает стабильные значения генерируемой частоты и возможность ее регулирования в заданных пределах, преобразователь трансформирует электрический сигнал в механический, концентратор позволяет усилить входную амплитуду колебаний для достижения необходимой интенсивности излучения в обрабатываемой среде [4].

В силу небольшой величины амплитуды колебаний преобразователя (даже в резонансном режиме) необходимо использование ультразвуковых концентраторов. Принцип их действия заключается в увеличении амплитуды колебательного смещения частиц за счет уменьшения поперечного сечения стержня по закону сохранения количества движения. В зависимости от формы образующей концентраторы могут принимать коническую, катеноидальную, ступенчатую и др. конфигурации. Анализ резонансных параметров различных видов концентраторов приведен в [5]. По результатам анализа выяснено, что ступенчатые концентраторы с катеноидальным переходом обеспечивают максимальное увеличение коэффициента усиления по сравнению с другими вариациями форм концентраторов без риска преждевременного разрушения элемента.

Увеличение амплитуды смещения тем больше, чем больше разница в диаметрах противоположных торцов концентратора. Однако варьирование размеров входного и выходного сечений торцов концентратора не всегда легко реализуемо. Уменьшение диаметра выходного торца может значительно снизить прочностные характеристики переходного участка, кроме того, уменьшить площадь излучающей поверхности. Уве-

личение диаметра входного торца концентратора требует и увеличения размера преобразователя, что не всегда возможно [6].

Первоначально рассматривалась конфигурация ступенчатого катеноидального концентратора, ступени которого равны между собой. Отношение диаметров принималось равным 2. Параметры конфигурации модели рассматриваемого концентратора приведены в таблице 1. Расчетный коэффициент усиления ( $K_y$ ) составлял 3,56. Экспериментальные резонансные значения ультразвуковой установки, полученные с его использованием: частота  $f_{рез} = 20360$  Гц,  $K_y = 3,33$ .

Таблица 1 – Конфигурация ступенчатого концентратора с катеноидальным переходом

$D_1$	$d_2$	$D1/d2$	Форма образующей	$l_{общ}$ , мм	Соотношение ступеней, мм	Модуль Юнга $E$ , $\cdot 10^9$ Па	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент Пуассона, $\mu$	Резонансная частота, $f_{рез}$
30	15	2	катеноид	126.75	42.25 / 42.25/42.25	206, 46	7364	0,31	20367

Для целей исследования необходимо было увеличить амплитуду смещения колебаний, сохранив исходные величины диаметров входного и выходного торцов концентратора, а также обеспечивая постоянство резонансной частоты установки. По результатам моделирования в программно-инженерном комплексе Abaqus было определено оптимальное процентное соотношение длин ступеней концентратора, которое составило 43% : 24% : 33% . В результате полученный коэффициент усиления составил 3,85. Амплитуда колебаний возросла на 10 %. Экспериментальные резонансные значения ультразвуковой установки, полученные с его использованием: частота  $f_{рез} = 20370$  Гц,  $K_y = 3,67$ .

Параметры конфигурации оптимизированного концентратора приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Параметры оптимизированного концентратора

$D_1$	$d_2$	$D1/d2$	Форма образующей	$l_{общ}$ , мм	Соотношение ступеней, мм	Модуль Юнга $E$ , $\cdot 10^9$ Па	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент Пуассона, $\mu$	Резонансная частота, $f_{рез}$
30	15	2	катеноид	134,5	57,8/32,3/44,4	206, 46	7364	0,31	20365

Таким образом, в случае невозможности изменения диаметров входного и выходного торцов концентратора, одним из способов повышения амплитуды смещения ультразвуковых колебаний можно рассматривать изменение соотношений длин его ступеней.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бурого Н.Г., Исследование сверхмногоциклового усталости при высокочастотных колебаниях элементов авиационных конструкций // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Аннотации докладов. (Казань, 20 – 24 августа 2015 г.). – Казань: Издательство Академии наук РТ, 2015 – 319 с.

2. Прохоров А.Е., Плехов О.А. Экспериментальное исследование процесса разрушения стали 40X13T в режиме гигацикловой усталости // Природные ресурсы арктики и субарктики. 2018. Т. 26. № 4. С. 125-132.

3. Сапожник К.Р., Башков О.В. Разработка установки для проведения ультразвуковых усталостных испытаний // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: мат-лы Международной науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 7-11 февраля 2022 г. – Комсомольск-на- Амуре : ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2022.

4. Хмелев В.Н., Сливин А.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности // Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203 с

5. Сапожник К.Р., Кучумова М.Д., Башков О.В. Моделирование ультразвуковых колебательных систем // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 г. : в 3 ч. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2020. – Ч. 1. С. 128-131

6. Хмелев В.Н., Хмелев С.С., Барсуков Р.В., Голых Р.Н., Карзакова К.А. Совершенствование конструкции резонансного концентрирующего звена с увеличенной поверхностью излучения // Техническая акустика. 2012. №7.

УДК 544.6

Скорб Екатерина Владимировна, кандидат химических наук, профессор НОЦ инфохимии, Университет ИТМО

Skorb Ekaterina Vladimirovna, Candidate of Chemistry, Professor, Infochemistry scientific center, ITMO University

Носкова Ульяна Вячеславовна, студент, Университет ИТМО

Noskova Uliana Vyacheslavovna, student of ITMO University

Зырянова Полина Игоревна, студент, Университет ИТМО

Zyrianova Polina Igorevna, student of ITMO University

Королев Илья Сергеевич, студент, Университет ИТМО

Korolev Ilya Sergeevich, student of ITMO University

Пивень Анастасия Олеговна, студент, Университет ИТМО

Piven Anastasiia Olegovna, student of ITMO University

## **КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ УРИКАЗЫ В ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНЫХ СЛОЯХ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МОЧЕВОЙ КИСЛОТЫ**

### **URICASE CROWDING VIA POLYELECTROLYTE LAYERS COACERVATION FOR ELECTROCHEMICAL DETECTION OF URIC ACID**

Аннотация. В данной работе электрод из углеродного волокна был модифицирован окислительно-восстановительным медиатором берлинской лазури, слоем мочевиной кислоты на основе уриказы и послойно собранной полиэлектrolитной пленкой, которая образует сложный коацерват, состоящий из слабо заряженного полиэлектrolита и высокозаряженного. Электрод показал высокую эффективность в обнаружении мочевиной кислоты в биожидкостях.

Abstract. In this work, the carbon fiber electrode was modified with Prussian blue redox mediator, UOx layer, and a layer-by-layer assembled polyelectrolyte film, which forms a complex coacervate consisting of a weakly charged polyelectrolyte and a highly charged one. Electrode has shown high efficiency in detecting uric acid in biofluids.

Ключевые слова: послойное наслаивание, полиэлектrolит, коацервация, мочевиная кислота.

Key words: layer-by-layer assembly, polyelectrolyte, crowding effect, uric acid.

Макромолекулярная коацервация играет ключевую роль в клеточной среде, влияя на супрамолекулярную организацию, денатурацию белка и скорость физиологически важных ферментативных реакций. Это происходит из-за динамической компартиментализации посредством разделения фаз жидкость-жидкость, что увеличивает ло-

кальную концентрацию фермента и изменяет диффузию субстратов. Сборки полиэлектролитов позволяют воспроизводимо локализовать фермент за счет образования индивидуальной фазы коацерватного комплекса и исключения из фазы избытка соли и воды [1]. Следовательно, кинетика ферментативных реакций в переполненной среде не зависит от ионной силы, обусловленной свободными ионами, а скорее зависит от свойств макромолекул, окружающих фермент [2].

Ранее был предложен подход для электрохимических иммуносенсоров с поверхностью раздела полиэлектролит-белок-гидрогель [3], включая нанопленки [4]. Гидрогелевые интерфейсы на основе нейтральных полиэлектролитов обеспечивают воспроизводимые результаты в сложных системах и простое изменение состава гидрогеля, что позволяет легко собирать данные для машинного обучения. Локализованные антитела к клещевому энцефалиту, иммобилизованные в электроде полиэлектролитно-белковой конструкции, могли обнаруживать до 5 целых вирусных частиц. Это доказывает эффективность полиэлектролита для повышения чувствительности иммуносенсоров по сравнению с электродом, модифицированным только антителами. Гидрофильные свойства полиэлектролитов в переполненной среде подавляли неспецифическую адсорбцию белка [5]. Таким образом, сборка послойного осаждения эффективно контролирует адсорбцию антигенов и антител на поверхности электрода. В данной работе предложена концепция краудсорсинга полиэлектролитов для разработки датчика на мочевую кислоту (UA) на основе уриказы (UOx). Подобный датчик сможет стать частью мультисенсорной платформы, которая позволит контролировать концентрацию мочевой кислоты в различных биожидкостях. Такая платформа ускорит и упростит проведение анализов, что позволит пациентам, например, с мочекаменной болезнью или подагрой, контролировать состояние своего здоровья вне больницы самостоятельно.

В качестве подложки электродов было выбрано углеродное волокно. Оно было выбрано из-за таких отличительных черт, как компактность, доступность и простота в использовании. Кроме того, углерод является хорошим гибким проводником, что позволяет качественно отслеживать изменения концентрации в реальном времени. Электроды из углеродного волокна модифицировали берлинской лазурью  $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$  путем электроосаждения с использованием 12 циклических сканирований циклической вольтамперометрии в диапазоне от -0,2 до 0,6 В со скоростью сканирования 0,05 В/с из раствора, содержащего 1,5 мм  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  и 1,5 мм  $\text{FeCl}_3$  в 0,1 м  $\text{KCl}$  и 0,1 М  $\text{HCl}$ . Затем электрод промывали деионизированной водой и активировали, применяя еще 50 циклов в растворе электролита (0,1 М  $\text{KCl}$  и 0,1 М  $\text{HCl}$ ), используя тот же протокол. После нанесения электроды промывали холодной водой и сушили на воздухе.

Пленки  $(\text{PEI}/\text{UOx})(\text{PEI}/\text{PSS})_n$  ( $n = 1,2$ ) и  $(\text{PAH}/\text{UOx})(\text{PAH}/\text{PSS})_2$  наносили на рабочую поверхность электрода, покрытого берлинской лазурью, методом послойного осаждения с погружением электрода в раствор, соответствующего компонент в течение 30 с и промывку натрий-фосфатным буфером перед нанесением последующего слоя. Для анализа полиэлектролитных структур был использован метод кварцевого кристаллического микровзвешивания (QCM). Этот метод заключается в измерении сдвига резонансной частоты специального кварцевого резонатора, зависящего от массы адсорбированного на нем вещества. Для корреляции изменения частоты колебаний микрокристалла кварца,  $\Delta f$ , и массы нанесенных на него полиэлектролитных слоев или UOx,  $\Delta m$ , использовали уравнение Зауэрбрея (1):

$$\Delta f = \frac{2f_0^2}{A\sqrt{\rho_q\mu_q}} \Delta m \quad (1)$$

где  $f_0$  – фундаментальная частота (5 МГц);  $A$  – пьезоэлектрически активная область ( $1.5386 \text{ cm}^2$ );  $\rho_q$  – плотность кварца ( $2.648 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ );  $\mu_q$  – пьезоэлектрическая константа ( $2.947 \times 10^{11} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ ).

Для изготовления электрода сравнения Ag/AgCl углеволокно разрезали на кусочки длиной 80 мм, которые покрыли лаком для ногтей, оставив открытыми 15 мм с обоих концов. Приготовленное таким образом покрытие сушили в соответствии с инструкцией. После этого этапа рабочую часть покрывали проводящей серебряной пастой и оставлен для высыхания на воздухе на 30 минут. После этого конец, покрытый Ag, погружали в 1 М HCl, затем промывали деионизированной водой для получения углеволокна, покрытого слоем AgCl. Рабочая зона электрода была модифицирована методом послойного осаждения следующим образом. Сначала его погружали на 30 с в раствор сильного положительно заряженного полиэлектролитов полиэтиленimina (PEI) или полиаллиламин гидрохлорида (ПАН), а затем в раствор слабо заряженного поли(4-стиролсульфонат) PSS. Между погружениями тугий конец промывали холодной водой. Наконец, было нанесено 64 слоя (32 слоя PEI и 32 слоя PSS).

После изготовления электрода сравнения собиралась трехэлектродная ячейка, которая состояла из электрода сравнения, рабочего электрода и вспомогательного электрода. Калибровка электрохимического датчика с использованием трех наноархитектур полиэлектролит-фермент рабочего электрода (ПАН/UOx/PSS/(ПАН/PSS)<sub>2</sub>, PEI/UOx/PSS/(PEI/PSS)<sub>2</sub> и PEI/UOx/PEI/PSS) установила широкий динамический диапазон концентрационной зависимости UA (от 10<sup>-4</sup> М до 10<sup>-6</sup> М). Далее качество обнаружение UA с помощью трехэлектродной системы также было исследовано на образцах мочи пациентов с SARS-CoV-2. Результаты исследования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты определения концентрации UA в биожидкости с использованием разных полиэлектролитных сборок.

Композиция из полиэлектролитов	Результат определения CUA, mM	Исходная CUA, mM
(PEI/PSS) <sub>2</sub>	3.12 ± 0.15	3.12 ± 0.15
PEI/PSS	3.15 ± 0.22	3.12 ± 0.15
(ПАН/PSS) <sub>2</sub>	2.89 ± 0.19	3.12 ± 0.15

Результаты анализа с использованием предложенной трехэлектродной системы на основе углеродного волокна и наноархитектуры полиэлектролит-фермент коррелируют с эталонными значениями спектрофотометрического анализа, демонстрируя низкую вариацию из-за повторяемости (стандартное отклонение составляет от 4,8% до 7,0%).

Таким образом, в ходе работы был предложен подход к конструированию датчика на мочевую кислоту на основе углеродного волокна, покрытого системой фермент-полиэлектролит. А также продемонстрирована конкурентоспособность электрохимического ферментативного анализа со спектрофотометрическим анализом для определения мочевой кислоты с точки зрения воспроизводимости. Предлагаемая система из углеродного волокна, модифицированная слоями полиэлектролитов, может быть использована для сбора больших данных и применения машинного обучения для фундаментального физико-химического изучения белков в переполненных системах и практического применения в качестве электрохимических датчиков.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Park S., Barnes R., Lin Y., Jeon B.-J., Najafi S., Delaney K.T., Fredrickson G.H., Shea J.-E., Hwang D.S., Han S. Dehydration entropy drives liquid-liquid phase separation by molecular crowding // *Commun. Chem.* 2020. Т. 3. № 83.
2. Skorb E.V., Andreeva D.V., Layer-by-layer approaches for formation of smart self-healing materials // *Polym. Chem.* 2013. № 4. С. 4834–4845.
3. Stekolshchikova A.A., Radaev A.V., Orlova O.Y., Nikolaev K.G., Skorb E.V., Thin and flexible ion sensors based on polyelectrolyte multilayers assembled onto the carbon adhesive tape // *ACS Omega* 2019. № 4. С. 15421–15427.

4. Ivanov A.S., Nikolaev K.G., Stekolshchikova A.A., Tesfatsion W.T., Yurchenko S.O., Novoselov K.S., Andreeva D.V., Rubtsova M.Y., Vorovitch M.F., Ishmukhametov A.A., Egorov A.M., Skorb E.V., Tick-borne Encephalitis electrochemical detection by multi-layer perceptron on liquid–metal interface // ACS Appl. Bio Mater. 2020. № 3. С. 7352–7356.

5. Baldina A.A., Nikolaev K.G., Ivanov, A.S., Nikitina A.A., Rubtsova M.Y., Vorovitch M.F., Ishmukhametov A.A., Egorov A.M., Skorb E.V., Immunochemical biosensor for single virus particle detection based on molecular crowding polyelectrolyte system. // J. Appl. Polym. Sci. 2022. № 139. Т. 24.

УДК 62-555:669.295"24

Снегирёв А.О., аспирант, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,

Snegirev A.O post-graduate student of Moscow Aviation Institute (National Research University)

Аслаева О.С., студентка ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Aslaeva O.S. (Aslaeva O.C.), student of the Moscow Aviation Institute (National Research University)

## **ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АКТУАТОРА С ДВУМЯ ПРОТИВОДЕЙСТВУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА**

### **STUDIES OF THE PERFORMANCE OF AN ACTUATOR WITH TWO COUNTERACTING ELEMENTS MADE OF AN ALLOY BASED ON TITANIUM NICKELIDE**

Аннотация. Исследована работоспособность термомеханического актуатора, включающая два пружинных элемента из никелида титана с эффектом памяти формы. Соединенные последовательно пружины предварительно растягивали и располагали между захватами испытательной машины. Термоциклирование проводили в интервале  $20\div 100^{\circ}\text{C}$  поочередно каждой из пружин с измерением их перемещений и развиваемых усилий. Установлено, что механические усилия при нагреве отвечают кривой нагрузки соответствующей пружине при  $100^{\circ}\text{C}$ . При охлаждении усилия снижаются до нуля, вследствие развития в мартенсите пластичности превращения.

Предложены формулы для расчета удельной работы термомеханических актуаторов. Расчеты показали, что схема с двумя противодействующими элементами с памятью формы обладают меньшей удельной работой по сравнению со схемами с постоянным противодействием и переменным противодействием, но позволяет выполнять более сложные действия, благодаря разделенному управлению температурами каждого из элемента с памятью формы.

Abstract. The performance of a thermomechanical actuator, which includes two spring elements made of TiNi with a shape memory effect, has been studied. The springs connected in series were pre-stretched and placed between the grips of the testing machine. Thermal cycling was carried out in the range of  $20\div 100^{\circ}\text{C}$  in turn for each of the springs with the measurement of their displacements and developed forces. It is established that the mechanical forces during heating correspond to the load curve of the corresponding spring at  $100^{\circ}\text{C}$ . Upon cooling, the forces decrease to zero, due to the development of transformation plasticity in the martensite.

Formulas for calculating the specific work of thermomechanical actuators are proposed. Calculations have shown that a circuit with two counteracting shape memory elements has a low-

er specific work compared to schemes with constant and variable resistance, but allows you to perform more complex actions due to the separate control of the temperatures of each of the shape memory elements.

Ключевые слова: никелид титана, актуаторы, эффект памяти формы, испытания, удельная работа.

Key words: titanium nickelide, actuators, shape memory effect, test, specific work.

### **Введение**

Актуаторы – это устройства, преобразующие управляющий сигнал в полезную работу с помощью исполнительного механизма. Большинство актуаторов являются электромеханическими устройствами, которые характеризуются достаточно большими габаритными размерами и необходимостью электропитания. В некоторых актуаторах используют функциональные материалы, обладающие особыми свойствами, такими как пьезоэффект, магнитострикция, эффект памяти формы. Первые два свойства позволяют обеспечить высокую частоту срабатывания актуатора, но обладают низкой удельной мощностью. Сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ) используют в актуаторах с низкой частотой срабатывания, но при этом они могут выполнять на три порядка более высокую удельную работу по сравнению с пьезокерамиками и магнитострикционными материалами. Эти сплавы позволяют минимизировать габариты и вес актуатора, совместив в нем термочувствительный элемент и исполнительный механизм.

Такие актуаторы основаны на реализации обратного эффекта памяти формы в условиях термоциклирования при противодействующих напряжениях. Напряжения могут создаваться подвешенным к элементу с ЭПФ грузом (постоянное противодействие) или контрпружиной из конструкционного материала (переменное противодействие). Отдельно можно рассмотреть случай, когда контрпружина изготовлена также из сплава с ЭПФ, а функционирование актуатора обеспечивается последовательным нагревом и охлаждением основного элемента и контр тела.

Поэтому целью настоящей работы является изучение закономерности работы актуаторов из пружин никелида титана в условиях переменного нелинейного противодействия, а также разработка методики расчета удельной работы пружинного актуатора из никелида титана.

### **Объекты и методы исследования**

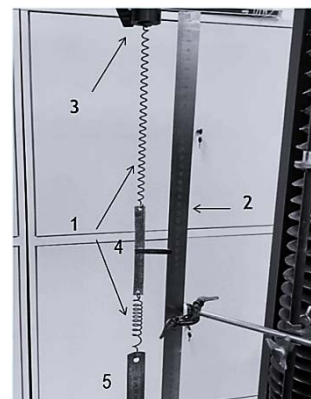
В качестве объекта испытаний использовали две пружины. Первая пружина диаметром  $D_1 = 11$  мм и вторая пружина  $D_2 = 7$  мм, количество витков составляло  $n_1 = 10$ ,  $n_2 = 24$ , соответственно, изготовлены из проволоки ( $d = 1,3$  мм) сплава Ti-55,8% вес. Ni.

Пружины были отожжены в вакууме при  $700^\circ\text{C}$ , а затем состарены при  $470^\circ\text{C}$  в течение 1 часа. В результате такой термической обработки температуры начала ( $A_n^B$ ) и конца ( $A_k^B$ ) восстановления формы пружин после деформации растяжением на 2–2,5 % и нагревом в водяном термостате в свободном состоянии составили  $38,3^\circ\text{C}$  и  $45,2^\circ\text{C}$ . Финишная обработка включала галтовку в керамических и полимерных чипсах для удаления окисленных слоев и полировки поверхности. Пружины предварительно испытывали на растяжение в изотермических условиях при 20 и  $100^\circ\text{C}$  для нахождения критических деформации в мартенситном и аустенитном состоянии.

Для исследования работы актуатора в условиях переменного нелинейного противодействия две пружины соединяли через промежуточную пластину (4) внутри рабочего пространства испытательной разрывной машины FPZ 100 (рис.1). Это позволило с помощью датчика силы машины определять усилия (P), устанавливающиеся в результате взаимодействия пружин из никелида титана. В этом случае важной характеристикой актуатора является исходное расстояние ( $\Delta L_{исх}$ ) между пружинами, находящимися в недеформированном состоянии до их соединения в единое исполнительное устройство. Для изменения этой величины использовалась линейка, которая фиксировалась в одном из

захватов испытательной машины. К линейке (5) крепился свободный конец одной из пружин (1), свободный конец другой пружины фиксировался в противоположном захвате (3). В работе величину  $\Delta L_{исх}$  принимали равной 100 или 150 мм.

Рисунок 1 - Устройства для испытания пружин с ЭПФ при переменном нелинейном противодействии. 1 – испытываемые пружины, 2 – линейка для измерения удлинения пружины, 3- датчик силы, 4- промежуточная пластина, 5- линейка для измерения  $\Delta L_{исх}$



Принцип испытания актуатора заключался в следующем. После суммарной деформации пружин на величину  $\Delta L_{исх}$  при 20 °С измеряли установившееся усилие  $P$  и удлинения каждой из пружин  $\Delta L_1$  и  $\Delta L_2$ . Затем осуществляли нагрев одной из пружин до 100 °С с помощью потока горячего воздуха и измеряли в этом состоянии установившееся усилие и удлинения пружин. После этого охлаждали эту пружину до 20°С с контролем изменения развиваемых усилий и удлинений пружин. На следующем этапе нагревали до 100 °С и охлаждали до 20 °С другую пружину. Такой цикл повторяли 3 раза.

#### Результаты исследований и их обсуждение

Было определено механическое поведение каждой пружины по отдельности при температуре 20 и 100°С, которое описываются кривыми (2,4) и (1,3), соответственно. Поскольку пружины работают в разном направлении, то на графике их механическое поведение показано навстречу друг к другу. Для первой пружины из нулевой точки, для второй пружины в другом направлении из точки  $\Delta L_{исх}$ .

При температуре 20°С точка А показывает начальное равновесие двух пружин в мартенситном состоянии. После нагрева первой пружины, равновесие смещается в точку В, близкой к кривой нагрузки этой пружины. При охлаждении этой пружины происходит полная разгрузка, отвечающая точке С. При последующем нагреве второй пружины система переходит в точку D, которая стремится приблизиться к кривой нагрузки при 100°С второй пружины. При охлаждении второй пружины также происходит ее полная разгрузка и смещение в точку Е. Далее при циклировании модели актуатора его рабочее поведение характеризуется точками В, С, D, Е.

Максимальное обратимое удлинение, наблюдаемое в экспериментах при  $\Delta L_{исх} = 100$  мм, составляло 56 мм между точками С и D для первой пружины и В и Е для второй пружины, что отвечает  $\gamma_{об} = 2.5$  % для пружин в мартенситном состоянии. Это меньше аналогичной величины (10,5 %), наблюдаемой в экспериментах с постоянным противодействием. Максимальное обратимое удлинение, наблюдаемое в экспериментах при  $\Delta L_{исх} = 150$  мм, составляло 114 мм, что отвечает  $\gamma_{об} = 5$  % для пружин мартенситном состоянии.

Испытаний показали, что при температурах 20 и 100 °С усилия  $P$  и удлинения пружины  $\Delta L$  не совпадают с данными, представленными в литературе [1], в которой показано, что при охлаждении должно быть перемещение от кривой нагрузки в аустенитном состоянии к кривой нагрузки в мартенситном состоянии. В эксперименте наблюдается полная разгрузка материала. Это происходит в результате развития пластичности при мартенситном превращении. В материале происходит рост кристаллов мартенсита с ориентировкой отвечающее направлению приложенной нагрузки, что приводит к накоплению деформации. В результате этого напряжения в материале снижаются практически до нуля.



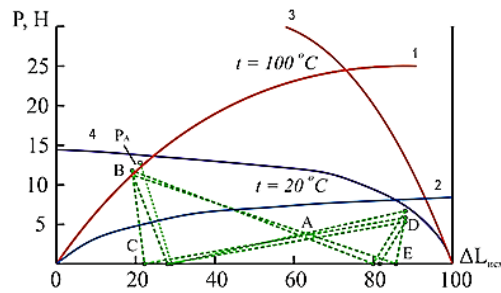


Рисунок 2 - Испытаниях актуатора в условиях переменного нелинейного противодействия при суммарной деформации обеих пружин на  $\Delta L=100$  мм

Для оценки эффективности работоспособности актуатора с двумя пружинами из никелида титана и сравнения ее с другими схемами актуаторов, целесообразно произвести определение ее удельной работы.

Удельная работа ( $a$ ), совершаемая материалом пружины, равна:

$$a = \frac{1}{2} P_A \Delta L_{об} = \frac{\tau_M}{4k} * \gamma_{об} \quad (1)$$

Где  $P_A$  – усилие, развиваемое пружиной 1 в точке В, или усилие, развиваемое пружиной 2 в точке D, при нагреве до температуры  $100^\circ\text{C}$  (рис. 2),  $\Delta L_{об}$  – перемещение пружины совершенное во время цикла нагрева,  $\tau_M$ - напряжения в мартенситном состоянии,  $k$  – поправочный коэффициент,  $k = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0,615}{C}$ ,  $\gamma_{об}$ - обратимая деформация,  $(\tau_{кр}^{0,3})_M$ -критические напряжения в мартенситном состоянии,  $\gamma_{об}^{max}$ -максимальная обратимая деформация,  $(\gamma_{кр}^{0,3})_A$  - критическая деформация в аустенитном состоянии,  $(\gamma_{кр}^{0,3})_M$  - максимальная деформация в мартенситном состоянии,  $G_A$ - модуль сдвига в аустенитном состоянии,  $G_M$ - модуль сдвига в мартенситном состоянии.

Формула расчета максимальной удельной работы ( $a_{max}$ ) будет выглядеть следующим образом.

$$a_{max} = \frac{(\tau_{кр}^{0,3})_M}{4k} * \gamma_{об}^{max} \quad (2)$$

$$\gamma_{об} = (\tau_{кр}^{0,3})_M - (\gamma_{кр}^{0,3})_A \quad (3)$$

$$\gamma_{об}^{max} = (\gamma_{кр}^{0,3})_M - \frac{(\gamma_{кр}^{0,3})_M}{G_A} - \frac{(\tau_{кр}^{0,3})_M}{G_M} = (\gamma_{кр}^{0,3})_M - (\tau_{кр}^{0,3})_M \left[ \frac{1}{G_A} - \frac{1}{G_M} \right] \quad (4)$$

$$\text{Тогда } a_{max} = \frac{1}{4k} (\tau_{кр}^{0,3})_M \left[ (\gamma_{кр}^{0,3})_M - (\tau_{кр}^{0,3})_M \left[ \frac{1}{G_A} - \frac{1}{G_M} \right] \right] \quad (5)$$

Для используемого в наших экспериментах материала пружин (сплав Ti-55,8%Ni) удельная работа при переменном нелинейном противодействии, рассчитанная по формуле (1), равняется 2.36 и 2.16 МДж/м<sup>3</sup> при растяжении двух пружин на 100 мм, и 4.83 и 3.34 МДж/м<sup>3</sup> при растяжении на 150 мм. Рассчитанное максимальное значение удельной работы двух пружин по формуле (5) составило 6.25 МДж/м<sup>3</sup>. Для сравнения была взята из литературы [2] удельная работа для пружинных актуаторов с ЭПФ в условиях постоянного и переменного противодействия. При данных схемах нагружения удельная работа равняется 12,8 МДж./м<sup>3</sup> и 11,7 МДж/м<sup>3</sup>, соответственно.

### Выводы

Установлено, что максимальные усилия, развиваемые актуатором с двумя пружинами из никелида титана, отвечают кривым деформации пружин в аустенитном состоянии. При охлаждении, в мартенситном состоянии, усилия актуатора равны нулю.

Удельная работа и максимальная удельная работа, рассчитанная для двухпружинного актуатора, меньше по сравнению со схемами испытаний при постоянном и переменном противодействии, но имеет гораздо больше вариантов использования в различных схемах актуаторов с ЭПФ.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kejun Hu, Kanty Rabenorosoa, Morvan Ouisse. A Review of SMA-Based Actuators for Bidirectional Rotational Motion: Application to Origami Robots//02.07.2021.
2. Коллеров М.Ю., Бурнаев А.В., Гусев Д.Е., Шаронов А.А. Закономерности термомеханического поведения актуаторов из никелида титана // Титан. 2017. №1 (55). С. 46-51. (ВАК).

УДК: 667.678.8

Сучков Владислав Сергеевич ассистент кафедры технологии лаков и красок, Казанский национальный исследовательский технологический университет (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), г. Казань

Vladislav S. Suchkov assistant of the department of technology of paints and coatings, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan

Москвин Иван Германович студент кафедры технологии лаков и красок, Казанский национальный исследовательский технологический университет (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), г. Казань

Ivan G. Moskvin student of the department of technology of paints and coatings, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan

## **РАЗРАБОТКА ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ГРУНТОВКИ ДЛЯ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ**

### **DEVELOPMENT OF ANTI-CORROSION PRIMER FOR FIRE-PROOF COATINGS**

Аннотация. Наибольший интерес для лакокрасочной промышленности представляют полиорганосилоксаны, имеющие достаточно сложную структуру со случайным распределением фрагментов и содержащие в макромолекулах концевые силанольные группы. Следствием такого строения и невысокой длины макроцепей полиорганосилоксанов являются недостаточно высокие эксплуатационные, в том числе барьерные и адгезионные свойства покрытий на их основе в значительной мере определяющие противокоррозионную эффективность последних. В качестве пути преодоления этих недостатков в данной работе использовали химическое структурирование пленкообразователя в естественных условиях в результате применения синтезируемых модифицирующих добавок.

Absrtact. Polyorganosiloxanes, which have a rather complex structure with a random distribution of fragments and contain terminal silanol groups in macromolecules, are of the greatest interest for the paint and varnish industry. The consequence of this structure and the low length of the macro chains of polyorganosiloxanes are insufficiently high operational, including barrier and adhesive properties of coatings based on them, which largely determine the anticorrosive effectiveness of the latter. Chemical structuring of the film-forming agent under natural conditions as a result of the use of synthesized modifying additives was used as a way to overcome these shortcomings in this work.

Ключевые слова: полиорганосилоксаны, отвердитель, термостойкие покрытия, противокоррозионная.

Key words: polyorganosiloxanes, hardener, heat-resistant coatings, anticorrosive.

Ряд крупномасштабных пожаров в торговых, развлекательных центрах и др. массово посещаемых объектов вызвал активизацию рецептурных и технологических разработок в области огнезащитных покрытий. При этом очевидна необходимость использования грунтовок, обеспечивающих противокоррозионную защиту при эксплуатации

окрашенного объекта и предотвращающих отслаивание огнезащитного слоя покрытия в условиях огневого воздействия.

К основными компонентам, определяющим комплекс эксплуатационных свойств грунтовок, относятся пленкообразующая основа или связующее и пигментная часть. [1]

Целью данной работы явился выбор и исследование характеристик пленкообразователя для грунтовки. Область применения разрабатываемой грунтовки предполагает его высокую термостойкость. Известно, что наиболее высокой термостойкостью отличаются кремийорганические полимеры. В качестве пленкообразующей основы для красок, лаков и покрытий, как правило, используются олигомерные органосилоксаны, полученные сополиконденсацией смесей органохлорсиланов различной функциональности в смеси толуола и изобутанола. [2]

Покрытия естественной сушки являются хрупкими и, как правило, имеют недостаточно высокие адгезионные, барьерные и физико-механические характеристики полиорганосилоксановых покрытий естественной сушки. Для устранения этих недостатков идут по пути термообработки покрытий при 250-300°C с целью активации силанольных групп и химического структурирования полиорганосилоксана. Что ограничивает область их применения, в частности, в связи с невозможностью нагрева таких крупногабаритных объектов.

Путем расширения области применения полиорганосилоксановых покрытий является придание способности их пленкообразующей основе способности к химическому структурированию без подвода тепла, в естественных условиях. [3, 4]

В данной работе исследовали возможность использования при получении грунтовок для огнезащитных покрытий полиорганосилоксановый лак SiAS- 600 производства ООО НПП «Спектр».

Критериями защитных свойств покрытий служили коррозионный потенциал окрашенного металла в контакте с коррозионно-активной средой и коэффициент, равный отношению емкостей системы окрашенный металл/электролит при 2000 и 20000 Гц:  $K_f = C_{2000}/C_{20000}$  где  $C_{2000}$  и  $C_{20000}$  - емкость испытуемой системы при частоте (f) 2000 и 20000 Гц соответственно. Значение  $K_f$ , равное 1 при максимально высоких защитных свойствах покрытия, снижается по мере потери его изолирующей способности.

Таблица 1 - Свойства покрытий на основе SiAS-600

Адгезия, балл	Удар, см	Прочность при изгибе, мм	Количество двойных протирок ацетоном
5	0	> 20	0

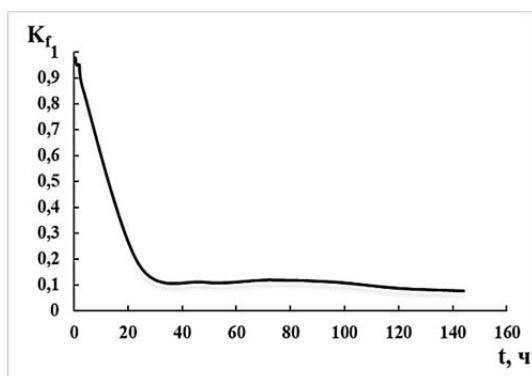


Рисунок 1 - Отношение емкостей системы окрашенный металл/электролит во времени

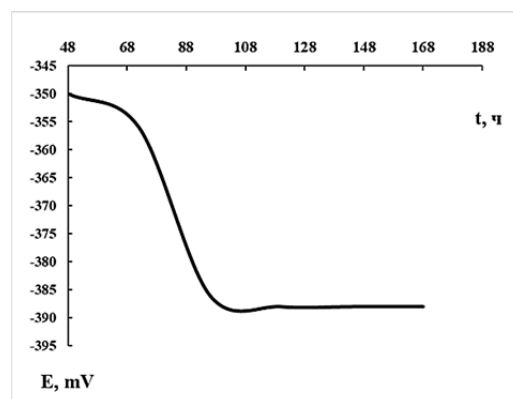


Рисунок 2 - Зависимость изменения электродного потенциала во времени

Как видно из результатов исследования, приведенных в таблице 1 покрытия, сформированные на основе лака SiAS-600, обладают недостаточно высокими физико-механическими и адгезионными. Резкое падение значения  $K_f$  на начальной стадии испытаний и установление значения потенциала окрашенного металла в области, отвечающей коррозии железа (рис. 1 и 2), свидетельствуют о неудовлетворительных защитных свойствах покрытий.

Поэтому целью дальнейших исследований явилось улучшение комплекса эксплуатационных свойств покрытий холодной сушки на основе лака SiAS-600, посредством введения функциональных добавок (отвердителей). Добавки смешивали в заданном соотношении с лаком перед нанесением покрытий. Включение отвердителя в состав покрытия способствует насыщению полиорганосилоксанового пленкообразователя полярными функциональными группами. Это обеспечивает тем самым поперечную сшивку олигомерных цепей при формировании покрытий и активацию взаимодействия с поверхностью субстрата. Подтверждением этого являются данные, приведенные в таблице 2, свидетельствующие об улучшении физико-механических свойств и адгезии покрытий в результате добавки синтезированных структурирующих добавок. Анализ полученных результатов исследований позволяет выбрать в качестве оптимального варианта использование 20% добавки АЛ-93.

Таблица 2 - Свойства покрытий на основе SiAS-600 с АЛ-93

Адгезия, балл	Удар, см	Прочность при изгибе, мм	Количество двойных протирок ацетоном
0	50	1	Не стирается

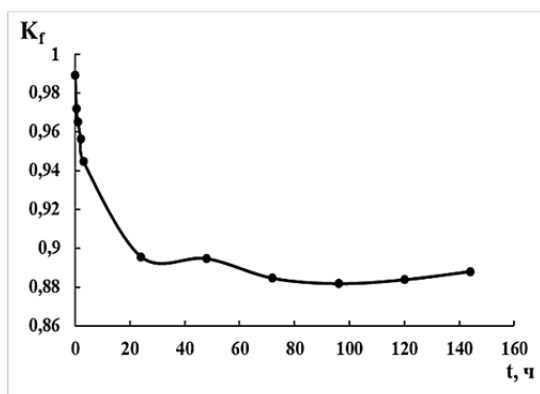


Рисунок 3 - Отношение емкостей системы окрашенный металл/электролит во времени

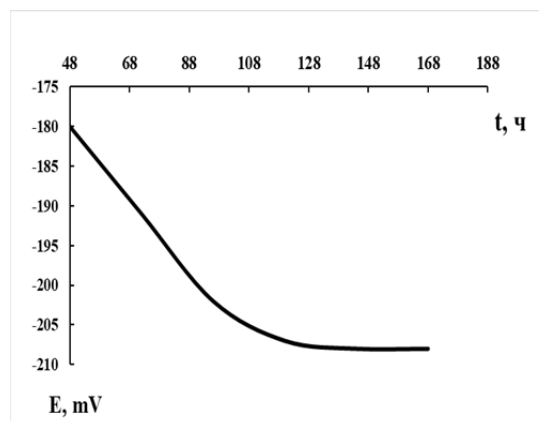


Рисунок 4 - Зависимость изменения электродного потенциала во времени

Сопоставление результатов исследований, приведенных на рис.1-2 и рис. 3-4, свидетельствует о значительном усилении их защитной способности в результате химического структурирования.

При этом следует отметить, что включение органической составляющей (в составе отвердителя) не влияет на термостойкость кремнийорганических покрытий, что подтверждается результатом термогравиметрического анализа, где разница в потере массы исходного и отвержденного покрытий при  $700^{\circ}\text{C}$  не более 4 %.

Изложенное позволяет сделать заключение о возможности использования разработанной структурирующей добавки с целью улучшения защитных и адгезионных свойств покрытий на основе полиорганосилоксанового лака при практическом сохранении их термостойкости.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. P. A. Sørensen, S. Kiil, K. Dam-Johansen Anticorrosive coatings: a review// J. Coat. Technol. Res., 6 (2) 135–176, 2009 DOI 10.1007/s11998-008-9144-2
2. Л.М. Хананашвили Химия и технология элементоорганических мономеров и полимеров. М.: Химия, 1998. 528 с.63.
3. G. Lorenz, A. Kandelbauer, Silicones, Handbook of Thermoset Plastic, third edition, (2014), pp. 555–575.
4. Liu, D., Yu, Y., Mi, L., Yu, Y., Song, L.-X. Preparation of Room Temperature Curable Organic-inorganic Hybrid Thermal Control Coatings | [有机/无机杂化室 固化热控涂层的制备] 2018 Wujī Cailiao Xuebao/Journal of Inorganic Materials 33(8), с. 914-918 DOI 10.15541/jim20180092.

УДК 544.6

Уласевич Светлана Александровна, кандидат химических наук, ординарный доцент  
НОЦ инфохимии, Университет ИТМО

Ulasevich Svetlana Alexandrovna, Candidate of Chemistry, Associate Professor, Infochemistry scientific center, ITMO University

Зырянова Полина Игоревна, студент, Университет ИТМО

Zyrianova Polina Igorevna, student of ITMO University

Носкова Ульяна Вячеславовна, студент, Университет ИТМО

Noskova Uliana Vyacheslavovna, student of ITMO University

Королев Илья Сергеевич, студент, Университет ИТМО

Korolev Ilya Sergeevich, student of ITMO University

Пивень Анастасия Олеговна, студент, Университет ИТМО

Piven Anastasiia Olegovna, student of ITMO University

## ИОНОСЕЛЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ИОННЫХ ТОКОВ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

### ION-SELECTIVE ELECTRODES FOR DETECTING IONIC CURRENTS IN BIOLOGICAL SYSTEMS

Аннотация. В представленном исследовании приведена ионоселективная микроэлектродная система на основе углеродного волокна для детектирования ионов кальция, натрия и калия в биологической системе. Данная разработка позволит определять токовые всплески ионов, генерирующиеся за счет активации ионных каналов.

Abstract. This research describes an ion selective microelectrode system based on carbon fiber for detecting sodium, potassium, and calcium ions in the biological system. This development will allow to determine the current bursts of ions generated due to the activation of ionic channels.

Ключевые слова: полиэлектролиты, углеродное волокно, ионоселективные электроды, ионные каналы.

Key words: polyelectrolytes, carbon fiber, ion-selective electrodes, ion channels.

Связь с помощью электрических сигналов распространена среди биологических систем, и одним из наиболее известных примеров является потенциал действия в нейронах, опосредованный ионными каналами. [1,2] Известно, что биоэлектрическая передача сигналов происходит из-за изменений потенциала покоя плазматической мем-

браны, контролируемых ионных каналов, насосов и щелевых контактов. [3,4] Медленные изменения потенциала покоя плазматической мембраны во всех клетках служат высоко консервативным информационным путем, который регулирует процессы, протекающих внутри клеток. [1] Это изменение потенциала часто вызывается работой ионных каналов и способствует межклеточной коммуникации, регуляция которой обеспечивается различными сигнальными молекулами, которые высвобождаются и диффундируют во внеклеточное пространство.

В последние десятилетия активно изучается межклеточная коммуникация через ионные каналы, что обеспечило фундаментальное понимание структурных основ передачи сигналов нейронами. В частности, установлено, что кальциевые каналы выполняют уникальные функции: участвуют в электрогенезе, поддерживают определенную внутриклеточную концентрацию ионов кальция, инициируют секрецию медиаторов и гормонов, формируют кратковременные и долговременные формы синаптической пластичности в центральной нервной системе и др. Несмотря на широкий спектр исследований рецепторных систем, паракринной регуляции в клетках и их физиологии в целом, природа передачи сигнала по ионным каналам, особенно кальциевым каналам, остается неясной. В связи с этим мы исследовали механизм передачи сигнала по кальциевым каналам. С этой целью мы выяснили влияние активации кальциевых каналов на изменение количества ионов калия, натрия и кальция в клеточной системе. Измерение внеклеточного сигнала проводилось с помощью биосовместимых ионоселективных электродов (ИСЭ). Для локализации клеток применяли гидроксипатитные паттерны (Рисунок 1). Клетки при культивации повторяют узор паттерна, что делает предлагаемую систему привлекательной для биологических исследований.

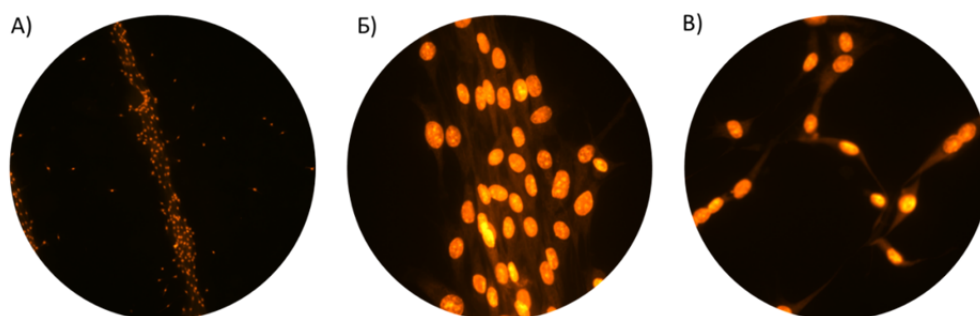


Рисунок 1 – Кольца Лизеганга в флуоресцентном микроскопе, родаминовый канал

Проводящий материал, который послужил основой для создания ионоселективных электродов – углеродное волокно, модификация которого была произведена с использованием полиэлектролитов: слабо положительно заряженного (полиэтиленимин (PEI) и сильно отрицательно заряженного поли(4-стиролсульфонат) (PSS)) методом послойного осаждения. Схема сборки электродов представлена на рисунке 2.

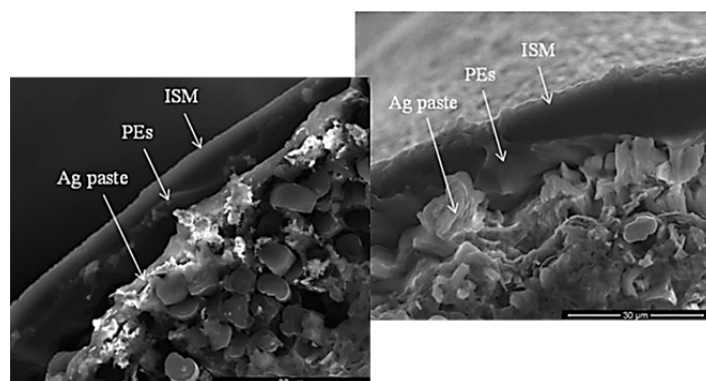


Рисунок 2 - Изображения сканирующего электронного микроскопа электрода из углеродного волокна, модифицированного полиэлектролитами

Последним этапом сборки, после полиэлектrolитов, является нанесения ионоселективной мембраны, которая способствует улавливанию необходимого катиона с помощью компонента – ионофора, который в ходе измерений обратимо связывается с определенным ионом. Данная методика создания электрода, селективного к иону калия, натрия и кальция позволяет с высокой точностью определить их количество в системе, при этом представленные электроды стабильны. [5–7] Далее ИСЭ погружали в растворы хлоридов натрия, кальция и калия. После кондиционирования проводилась калибровка полученных сенсоров на стандартных растворах соеующих солей (концентрации растворов:  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$  моль/л).

При выборе клеточной линии для контрольных исследований учитывалась их чувствительность к ионам кальция. Таким образом, для изучения кальциевых каналов были выбраны мышечные остеобласты C2C12. После проверки работы электродов на точность и селективность их погружали в среду с клетками для обнаружения ионов кальция, натрия и калия. Норадреналин выбрали в качестве вещества способное активировать кальциевые каналы. Данное вещество добавляли в систему с клетками в различных концентрациях для точного установления его влияния. В результате экспериментов по определению потенциала на стандартных растворах получено, что ИСЭ с высокой точностью показываю концентрацию ионов. Полученные значения близки к расчетным из уравнения Нернста и представлены в таблице (Таблица 1).

Таблица 1 – Калибровочные значения ИСЭ

Ион, к которому селективен электрод	Наклон ИСЭ, мВ	Наклон по Нернсту, мВ
K <sup>+</sup>	56.0	58.0-59.0
Na <sup>+</sup>	60.2	58.0-59.0
Ca <sup>2+</sup>	30.0	29.0-29.6

Далее проведены базовые эксперименты по определению потенциала на паттернах с клеточной культурой и без неё. Установлена разница потенциалов в разных частях паттерна с клетками и без них. Также провели измерения высвобождения кальция при добавлении активирующих компонентов: хлорида кальция и норадреналина. Выявили, что хлорид кальция и норадреналин приводят значимым, скачкообразным изменением значениям потенциала, с последующей стабилизацией значений, что может быть обусловлено клеточной коммуникацией.

Таким образом, показано, что ионоселективные электроды обладают высокой точностью при измерениях в биологических системах и могут быть использованы для изучения клеточной коммуникации. Получено, что активация кальциевого канала происходит как при добавлении хлорида кальция, так и при добавлении норадреналина, причем при добавлении последнего происходит резкое изменение потенциалов в системе.

Эта работа была поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, РФФ №19-79-10244.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Shad K.F., Salman S., Afridi S., Tariq M., Asghar S. Introductory Chapter: Ion Channels [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.intechopen.com/chapters/63380> (дата обращения: 27.02.2022)
2. P. Subramanyam, H.M. Colecraft. Ion channel engineering: perspectives and strategies // Journal of molecular biology. 2015 T. 427. № 1 С. 190–204.
3. Tarasov M. V. et al. Calcium-gated K<sup>+</sup> channels of the KCa1. 1-and KCa3. 1-type couple intracellular Ca<sup>2+</sup> signals to membrane hyperpolarization in mesenchymal stromal cells from the human adipose tissue //Pflugers Archiv-European Journal of Physiology. – 2017. – Т. 469. №. 2. С. 349–362.

4. Kotova P. D. et al. Calcium signaling mediated by aminergic GPCRs is impaired by the PI3K inhibitor LY294002 and its analog LY303511 in a PI3K-independent manner //European Journal of Pharmacology. 2020. Т. 880. С. 173182.

5. Nikitina A. A. et al. Nanostructured layer-by-layer polyelectrolyte containers to switch biofilm fluorescence //Bioconjugate Chemistry. 2018. Т. 29. №. 11. С. 3793–3799.

6. Stekolshchikova A. A. et al. Thin and flexible ion sensors based on polyelectrolyte multilayers assembled onto the carbon adhesive tape //ACS omega. 2019. Т. 4. №. 13. С. 15421–15427.

7. Skorb E.V., Volkova A.V., Andreeva D.V. Layer-by-layer approach for design of chemical sensors and biosensors //Current Organic Chemistry. 2015. Т. 19. №. 12. С. 1097–1116.

УДК 544.57

Уласевич Светлана Александровна, кандидат химических наук, ординарный доцент  
НОЦ инфохимии, Университет ИТМО

Ulasevich Svetlana Alexandrovna, Candidate of Chemistry, Associate Professor, Infochemistry scientific center, ITMO University

Королев Илья Сергеевич, студент, Университет ИТМО

Korolev Ilya Sergeevich, student of ITMO University

Зырянова Полина Игоревна, студент, Университет ИТМО

Zyrianova Polina Igorevna, student of ITMO University

Носкова Ульяна Вячеславовна, студент, Университет ИТМО

Noskova Uliana Vyacheslavovna, student of ITMO University

## **ИЗУЧЕНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИЙ КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АНАЛИЗА ВОДНОСПИРТОВЫХ РАСТВОРОВ**

### **STUDY OF OSCILLATIONS OF CAVITATION BUBBLES USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR THE ANALYSIS OF AQUEOUS-ALCOHOLIC SOLUTIONS**

Аннотация. В данной статье показано влияние ультразвуковых волн на водно-спиртовые растворы. Установлено, что воздействие ультразвука на жидкости приводит к формированию маленьких пузырей, состоящих из газов, растворенных в жидкости и паров самого растворителя. Размер пузырей колебался в процессе акустического возбуждения, что привело к их сжатию под воздействием внешних сил и расширению, когда молекулы внутри пузыря оказывали воздействие на его внутренние стенки.

Abstract. In this article, we show the effect of ultrasonic waves on water-alcohol solutions. It has been established that the action of ultrasound on liquids leads to the formation of small bubbles consisting of gases dissolved in the liquid and vapors of the solvent itself. The size of the bubbles fluctuated during acoustic excitation, which led to their contraction under the influence of external forces and expansion when the molecules inside the bubble exerted an impact on its inner walls.

Ключевые слова: ультразвук, кавитация, искусственный интеллект.

Key words: ultrasound, cavitation, artificial intelligence.

Известно, что наличие вязкоупругой среды сильно влияет на динамику кавитационного пузыря, на его свойства линейного резонанса и нелинейное поведение [1, 2].



Кроме того, молекулы поверхностно-активных веществ или твердые частицы, адсорбированные на поверхности пузырька, также могут изменять их динамику из-за изменения вязкости среды [3, 4].

Целью данной работы являлась разработка метода качественного и количественного детектирования состава электролита по особенностям осцилляций кавитационного пузыря с применением искусственного интеллекта (Рисунок 1). В ходе эксперимента были поставлены следующие задачи:

1. Изучение особенностей осцилляций в электролитах и водных растворах на их основе.
2. Разработка алгоритма машинного обучения для определения качественного и количественного состава электролита по особенностям осцилляций кавитационного пузыря.

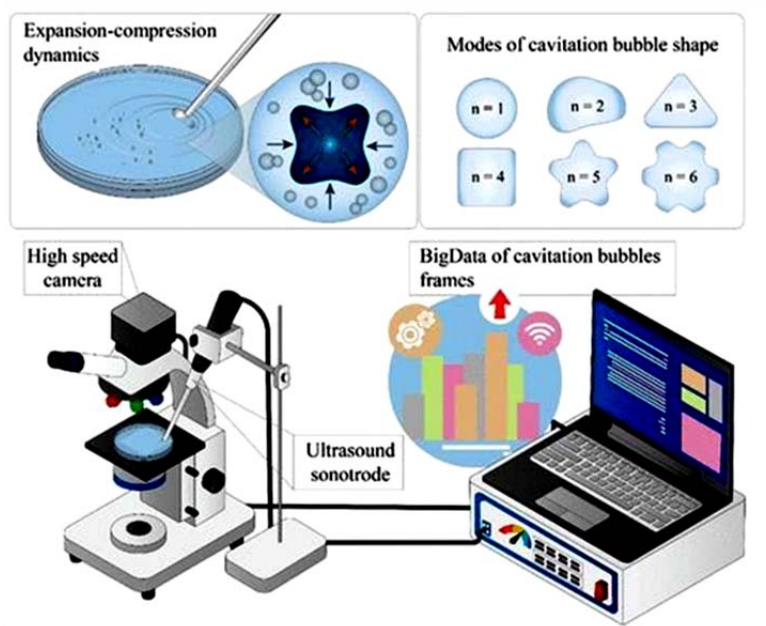


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки. Динамика расширения–сжатия пузырьков фиксируется высокоскоростной камерой. Кадры анализируются с помощью искусственной нейронной сети

Исследование пузырьковой кавитации проводили в чашке Петри диаметром 10 см. Видео роста пузырьков записывали с помощью скоростной камеры Phantom Miro C110. Чашку Петри помещали на оптический микроскоп Микмед-6 (ЛОМО, Россия) с объективом 10× и генерировали ультразвуковые пузырьки. ультразвуковым генератором УЗГ 55-22 с резонансной частотой  $22 \pm 3$  кГц. Сонотрод располагался под углом  $45^\circ$  к камере. Поведение кавитационных пузырьков и колебания их площади в растворах с разной концентрацией этанола различались (Рисунок 2). В частности, максимальные значения площади кавитационного пузырька наблюдаются в 96%, 75% и 25% растворах этанола. Моды кавитационного пузыря увеличиваются с увеличением продолжительности кавитации.

Так как критерии резонанса и стабильности обеспечивают условия для дестабилизации пузырька, они не дают представления о его динамике или кинетике вблизи неустойчивых состояний. Такую кинетику следует рассматривать как близкую к критической или хаотическую, с небольшими случайными флуктуациями, определяющими эволюцию пузырей. Для их описания можно использовать статистические методы [5-6]. Например, кластеризация визуальных изображений с использованием алгоритмов искусственного интеллекта. Хотя невозможно получить точное описание того, как концентрация раствора влияет на динамику пузырьков, все же возможно разделить изображения с разной концентрацией, применив алгоритм искусственной нейронной сети.

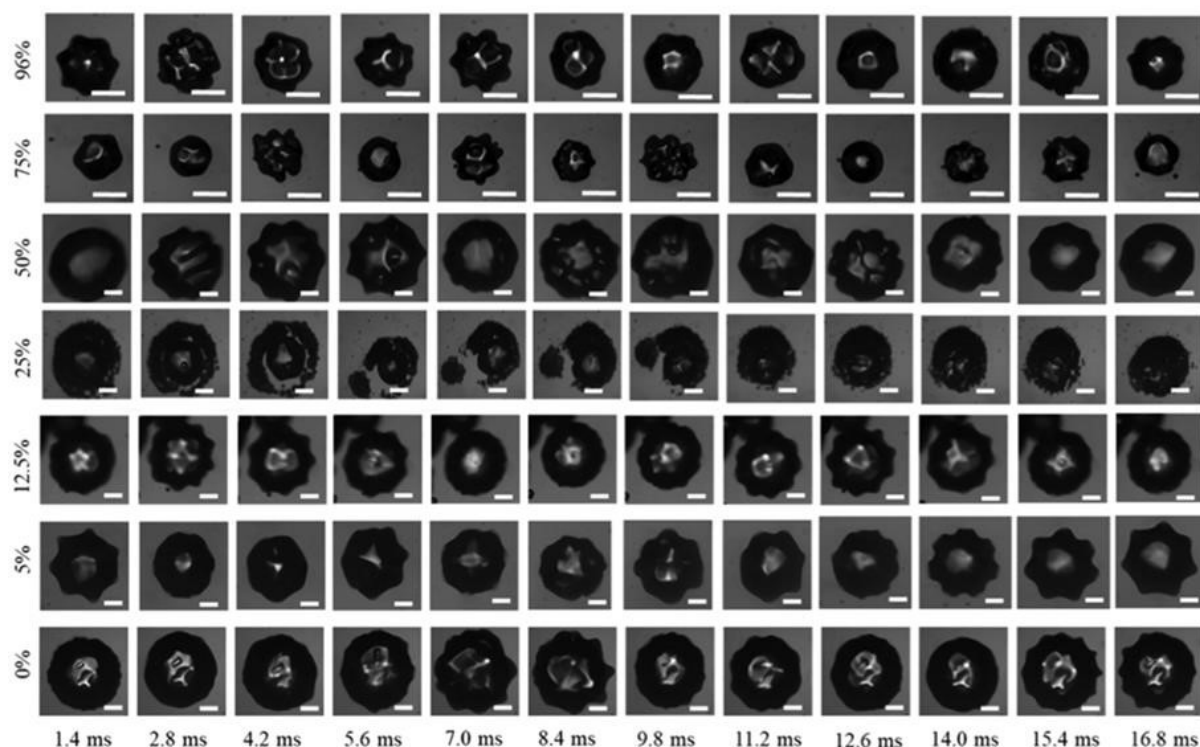


Рисунок 2 – Колебания формы кавитационных пузырьков в дистиллированной воде и водно-спиртовых растворах, содержащих 5 ÷ 96% мас. EtOH. Период ультразвукового возбуждения составляет  $T = 1/f$ ; период колебания формы соответствует 1,4 мс. Шкала измерения составляет 500 мкм.

Таким образом, методы искусственного интеллекта могут дополнять качественный и количественный анализ в системах далеких от равновесия, что может быть использовано для автоматического анализа пузырьков в режиме реального времени.

Эта работа была поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание № FSER-2021-0013 (Правительством Российской Федерации в рамках Программы стипендий и профессорства Университета ИТМО).

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Coussios C. C., Roy R. A. Applications of acoustics and cavitation to noninvasive therapy and drug delivery // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2008. Т. 40.
2. Dollet B., Marmottant P., Garbin V. Bubble dynamics in soft and biological matter // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2019. Т. 51. С. 331-355.
3. Choi J. J. et al. Noninvasive and localized neuronal delivery using short ultrasonic pulses and microbubbles // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2011. Т. 108. №. 40. С. 16539-16544.
4. Poulichet V., Huerre A., Garbin V. Shape oscillations of particle-coated bubbles and directional particle expulsion // *Soft matter*. 2017. Т. 13. №. 1. С. 125-133.
5. Honarvar F., Varvani-Farahani A. A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control // *Ultrasonics*. 2020. Т. 108. С. 106227.
6. Aboutorab M. et al. Nano-emulsion of saffron essential oil by spontaneous emulsification and ultrasonic homogenization extend the shelf life of shrimp (*Crocus sativus* L.) // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2021. Т. 45. №. 2. С. e15224.

Чемакина Ирина Сергеевна, младший научный сотрудник Лаборатории теории и оптимизации химических процессов, Тюменский государственный университет  
Chemakina Irina Sergeevna, junior research associate at Laboratory of theory and optimization of chemical processes, Tyumen State University

Иванцов Михаил Иванович, научный сотрудник Лаборатории № 2 "Химии нефти и нефтехимического синтеза", сектора 2 "Каталитического синтеза на основе оксидов углерода и углеводородов им. А.Н.Башкирова", Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

Ivantsov Mikhail Ivanovich, research associate at the Laboratory No. 2 "Chemistry of Petroleum and Petrochemical Synthesis", Sector 2 "Catalytic Synthesis Based on Carbon Oxides and Hydrocarbons named after A.N. Bashkirov", Institute of Petrochemical Synthesis named after A.V. Topchiev of the Russian Academy of Sciences

Крысанова Кристина Олеговна, научный сотрудник Лаборатории № 2 "Химии нефти и нефтехимического синтеза", сектора 2 "Каталитического синтеза на основе оксидов углерода и углеводородов им. А.Н.Башкирова", Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

Krysanova Kristina Olegovna, research associate at the Laboratory No. 2 "Chemistry of Petroleum and Petrochemical Synthesis", Sector 2 "Catalytic Synthesis Based on Carbon Oxides and Hydrocarbons named after A.N. Bashkirov", Institute of Petrochemical Synthesis named after A.V. Topchiev of the Russian Academy of Sciences

Третьяков Николай Юрьевич, директор Центра коллективного пользования, Тюменский государственный университет

Tretyakov Nikolai Yurievich, Director of the Center for Collective Use, University of Tyumen

Елышев Андрей Владимирович, директор Центра природовдохновленного инжиниринга, Тюменский государственный университет

Elyshev Andrey Vladimirovich, Director of the Center for Nature-Inspired Engineering, University of Tyumen

## **НОВЫЕ КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНОЙ БИОМАССЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО МЕТАНА**

### **NEW CATALYTIC SYSTEMS BASED ON SECONDARY BIOMASS FOR THE PRODUCTION OF SYNTHETIC METHANE**

Аннотация. Массовый переход к возобновляемым источникам энергии – один из факторов достижения целей декарбонизации. Перспективным методом такого перехода является конвертация C-содержащих выбросов в синтетический природный газ, который, в свою очередь, может быть использован в качестве экологически чистого энергоносителя. Поскольку взаимодействие оксидов углерода с водородом сопровождается большим выделением тепла, поиск эффективного и термостабильного катализатора остаётся актуальной задачей. В данной работе рассматривается применение каталитических систем на основе вторичной биомассы, берёзового активированного угля и микроцеллюлозы, и нитрата никеля. Катализаторы были получены методом пропитки и гидротермального синтеза, соответственно, и проанализированы методами оптической эмиссионной спектроскопии, рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии и БЭТ. Активность образцов катализатора была протестирована при в условиях процесса гидрирования монооксида углерода, как модельной смеси.

Abstract. The massive transition to renewable energy sources is one of the factors in achieving the goals of decarbonization. A promising method of such a transition is the conversion of C-containing emissions into synthetic natural gas, which, in turn, can be used as an environmentally friendly energy carrier. Since the interaction of carbon oxides with hydrogen is accompanied by a large release of heat, the search for an effective and thermostable catalyst remains an urgent task. This paper discusses the use of catalytic systems based on secondary

biomass, birch activated carbon and microcellulose, and nickel nitrate. The catalysts were obtained by impregnation and carbonization, respectively, and analyzed by optical emission spectrometry, X-ray phase analysis, scanning electron microscopy and BET. The activity of the catalyst samples was tested under the conditions of the process of hydrogenation of carbon monoxide as a model mixture.

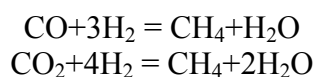
Ключевые слова: метанирование, синтетический природный газ, никель, активированный уголь, микроцеллюлоза.

Key words: methanation, synthetic natural gas, nickel, activated carbon, microcellulose.

### **Введение**

Массовое внедрение возобновляемых источников энергии в энергетическую систему, а также разработка крупномасштабных систем хранения энергии необходимы для достижения глобальных целей по декарбонизации. Стратегия Power-to-Gas, направленная на обезуглероживание газовой сети, заключается в использовании преимуществ существующей сетевой инфраструктуры для постепенного перехода от традиционного топлива к источникам метана с низким содержанием ископаемого углерода [1]. Однако такие системы генерации газа, как правило, ориентированы на производство водорода, что имеет проблемы совместимости с существующей инфраструктурой трубопроводов природного газа [2].

Вследствие этого представляется актуальным процесс получения синтетического метана [3]. Процесс конверсии оксидов углерода в метан базируется на двух основных реакциях, которые катализируются переходными металлами VIII группы, а именно железом, кобальтом и никелем:



Наибольшую активность в процессе гидрирования монооксида углерода проявляют кобальт, и в особенности никель, поэтому разработка никельсодержащих каталитических систем является доминирующей. Одной из основных характеристик реакции взаимодействия оксидов углерода с водородом является значительное (206 кДж/моль для CO и 164 кДж/моль для CO<sub>2</sub>, соответственно) выделение тепла, что накладывает дополнительные критерии к носителю и условиям эксплуатации катализатора: высокие нагрузки по сырью (больше 1000 ч<sup>-1</sup>), желательное разбавление реакционной смеси инертным компонентом или проведение реакции в избытке водорода [4]. Высокое выделение тепла может приводить к спеканию активной фазы катализатора, что может быть предотвращено введением промотирующих компонентов и усложнением состава и метода приготовления каталитического материала [5].

Углеродсодержащие носители обладают рядом уникальных физико-химических свойств, к которым относятся высокая удельная поверхность носителя, легкая функционализация поверхности и высокая термостойкость, что делает перспективным их использование в качестве прекурсора катализатора [6]. Синтез типичного углеродного носителя – березового активированного угля (БАУ) – можно разделить на два этапа: термическое разложение биомассы (березовая древесина) и последующая окислительная активация поверхности. Разрабатываемый нами подход к синтезу углеродсодержащего носителя позволяет совместить стадии формирования углеродного каркаса и функционализации поверхности с последующей иммобилизацией ионов активного металла (никеля) и сформировать катализатор при более мягких условиях из вторичной биомассы.

Целью настоящей работы является синтез и исследование каталитических свойств катализаторов, сформированных на углеродсодержащем носителе – БАУ и микроцеллюлозе (МКЦ).

### **Экспериментальная часть**

Методом гидротермального синтеза на основе МКЦ как модельного компонента биомассы и нитрата никеля синтезировали металл-углеродный материал. Процесс гидротермального синтеза заключается в обработке углеродсодержащего субстрата

субкритической водой, что приводит к формированию углеродного скелета. Процесс проводили при 230°C в инертной атмосфере в автоклаве в растворе нитрата никеля.

Также методом пропитки по влагоемкости и последующим прокаливанием при 400°C в инертной атмосфере сформировали катализатор на основе БАУ и нитрата никеля.

#### **Обсуждение результатов**

Образцы были охарактеризованы с помощью оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-ОЭС), рентгенофазового анализа (РФА), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и метода БЭТ.

Состав полученной системы Ni/БАУ подтвердили методом ИСП-ОЭС и показали, образец содержит 12 %<sub>масс</sub> никеля.

Полученные системы охарактеризовали методом РФА, который показал следующие результаты: структура образца Ni/БАУ отличается наличием специфических кристаллографических пиков, соответствующих оксиду никеля NiO, а также обширного гало, относящегося к аморфной природе БАУ. Рентгенограмма образца Ni/МКЦ показала присутствие металлического никеля и его оксидов NiO и Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, что демонстрирует нам формирование металл-углеродных наноразмерных систем.

Методом СЭМ микроскопии показано формирование однородного, плотного покрытия с сохранением пористой структуры БАУ (Рисунок 1). Микрофотография показывает, что пропитка никелем не приводит к агломерации частиц, что, вероятно, указывает на сильное взаимодействие металл-носитель и, следовательно, на высокую степень диспергирования на БАУ, т.е. высокую степень превращения. Распределение элементов на катализаторе Ni/БАУ оценивали методом рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии. Показано, что содержание никеля на поверхности БАУ составляет 16 %.

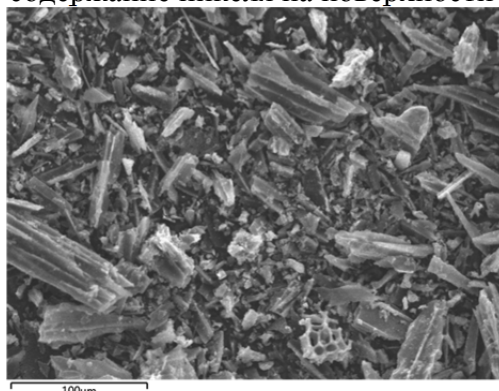


Рисунок 1 – изображение образца катализатора Ni/БАУ, полученное методом СЭМ

Методом БЭТ обнаружено образование каталитической системы со значительной поверхностью 456 м<sup>2</sup>/г.

Синтезированные углеродсодержащие системы испытали в условиях процесса гидрирования монооксида углерода, как модельной смеси (CO/H<sub>2</sub>=1/3) при T=250-330°C, атм. давлении и нагрузке по сырью 5000 ч<sup>-1</sup>. Показано, что в присутствии образца Ni/БАУ конверсия монооксида углерода достигает 8%, а выход метана 10 г/м<sup>3</sup>, тогда как в присутствии Ni/МКЦ конверсия СО и выход СН<sub>4</sub> составляют 100% и 127 г/м<sup>3</sup>, соответственно, что позволяет сделать вывод о более высокой каталитической активности последнего.

#### **Заключение**

Новые каталитические системы с высокой удельной поверхностью и пористостью на основе вторичной биомассы были синтезированы методами пропитки и гидротермального синтеза для получения синтетического метана. Структурные и физико-химические свойства порошковых катализаторов идентифицировали различными аналитическими методами: ИСП-ОЭС, РФА, СЭМ и БЭТ. Полученные результаты свидетельствуют о том, что структура носителя БАУ существенно не изменяется после пропитки. Результаты оценки активности и стабильности никелевых катализаторов, нанесённых на БАУ и МКЦ, показывают, что наилучшие характеристики и селективность в

реакции метанирования даёт катализатор Ni/МКЦ. Таким образом, синтез каталитических систем на основе вторичной биомассы является перспективным направлением для получения синтетического метана и требует дальнейших исследований для поиска новых источников биомассы и композитов.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Тюменской области по проекту Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра № 89-ДОН (3).

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Chauvy R. et al. Production of synthetic natural gas from industrial carbon dioxide // *Appl Energy*. Elsevier, 2020. Vol. 260. P. 114249.
2. Becker W.L., Penev M., Braun R.J. Production of synthetic natural gas from carbon dioxide and renewably generated hydrogen: A techno-economic analysis of a power-to-gas strategy // *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*. American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2019. Vol. 141, № 2.
3. Katla D. et al. Preliminary experimental study of a methanation reactor for conversion of H<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> into synthetic natural gas (SNG) // *Energy*. Pergamon, 2022. P. 125881.
4. Rönsch S. et al. Review on methanation – From fundamentals to current projects // *Fuel*. Elsevier, 2016. Vol. 166. P. 276–296.
5. Barrientos J. et al. The effect of catalyst pellet size on nickel carbonyl-induced particle sintering under low temperature CO methanation // *Appl Catal A Gen*. Elsevier, 2016. Vol. 514. P. 91–102.
6. Liu J. et al. Chem Soc Rev Chemical Society Reviews Carbon-based catalysts for Fischer-Tropsch synthesis † // *Chem. Soc. Rev.* Vol. 50. P. 2337.

УДК 621.9:519.8

Чжо Зин Оо, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Kyaw Zin Oo, Graduate Student of Komsomolsk-na-Amure State University

Бурдасова Александра Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и технология новых материалов», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Burdasova Aleksandra Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department “Materials Science and Technology of New Materials”, Komsomolsk-na-Amure State University

Афанасьева Анна Алексеевна, младший научный сотрудник, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Afanasjeva Anna Alekseevna, Junior Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University

Самар Елизавета Владимировна, младший научный сотрудник, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Samar Elizaveta Vladimirovna, Junior Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University

Кривобоков Анатолий Артёмович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Krivobokov Anatoly Artyomovich, student, Komsomolsk-na-Amure State University

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТАЛИ 08X18N10T, ПОЛУЧЕННОЙ ИЗ ПОРОШКА МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ**

#### **INVESTIGATION OF FATIGUE DURABILITY OF 08X18N10T STEEL OBTAINED FROM POWDER BY 3D PRINTING**

Аннотация. В статье представлены результаты исследования усталостной долговечности стали 08X18N10T, полученной методом 3D-печати, с использованием метода акустической эмиссии. Циклические испытания выполнялись на специализированной бескон-

тактной установке с электромагнитным возбуждением. На протяжении всего испытания регистрировалась акустическая эмиссия структурных изменений. Образование магистральной трещины определяли по снижению резонансной частоты циклических колебаний. Выявлена стадийность зарождения и развития структурных дефектов в стали.

Abstract. The article presents the results of a study of the fatigue life of steel 08X18N10T obtained by 3D printing using the acoustic emission method. Cyclic tests were performed on a specialized contactless installation with electromagnetic excitation. Acoustic emission of structural changes was recorded throughout the test. The formation of the main crack was determined by reducing the resonant frequency of cyclic oscillations. The stages of the origin and development of structural defects in steel are revealed.

Ключевые слова: 08X18N10T, 3D-печать, селективное лазерное сплавление, акустическая эмиссия, усталость

Key words: 08X18N10T, 3D printing, selective laser melting, acoustic emission, fatigue

### **Введение**

В отличие от традиционных процессов производства в настоящее время для точного воспроизведения прототипа изделия все больше стал применяться метод 3-D печати [1]. Современные технологии позволяют изготавливать не только прототипы изделий из пластика, но и готовые изделия из металла. Одним из наиболее распространенных методов изготовления металлических изделий является метод селективного лазерного сплавления (СЛС) из порошка [2, 3]. Для этого применяют порошки, как чистых металлов, так и сплавов. Для оценки структурного и технического состояния конструкционных материалов необходимо изучать закономерности изменения их структурного состояния. Процесс испытаний усталостной долговечности можно разделить на шесть стадии: циклическая микротекучесть, текучесть, упрочнение, развитие субмикротрещин до размеров микротрещин, развитие микротрещин до размеров макротрещин и долом [5]. Для выявления данных стадий, как правило, проводят множественные испытания материалов на усталость при разных напряжениях, сопровождая их фактографическими исследованиями на каждой стадии. Процесс является достаточно трудоемким и длительным. При использовании резонансных колебательных систем, образование магистральной трещины может быть выявлено по снижению резонансной частоты циклических колебаний. Также ранее была предложена методика оценки стадийности циклической долговечности и усталости по параметрам акустической эмиссии, регистрируемым в процессе усталостных испытаний для поликристаллических металлических материалов. Целью данных исследований является исследование кинетики накопления усталостных повреждений в образцах стали 08X18N10T, полученных из порошка 3D печатью методом СЛС.

### **Методика испытания образцов стали**

Испытательные образцы были выполнены в виде двойной лопатки с радиусной рабочей частью шириной  $h = 1,50-1,70$  мм, толщиной  $s = 2,80-2,90$  мм. Исследование циклической долговечности образцов выполнялось на установке с бесшумным бесконтактным электромагнитным нагружением [4]. В зависимости от упругих свойств материала частота резонансных колебаний, задаваемая прибором измерения усталости, может варьироваться от 30 до 60 Гц. Для исследования кинетики накопления усталостных повреждений используется метод АЭ. Сигналы АЭ регистрируются широкополосным пьезоэлектрическим преобразователем GT-301 с полосой пропускания 50-550 кГц. Аналоговый сигнал, после соответствующего усиления параметров полученного сигнала в аналоговом блоке (согласующий усилитель и фильтр нижних частот) приходит на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), где производится преобразование сигнала в цифровую форму и записывается в реальном масштабе времени на ЭВМ. Для обработки сигналов АЭ используется программа, созданная в Matlab. Программа позволяет об-



рабатывать АЭ информацию по таким параметрам как число циклов, амплитуда, частота, энергия сигналов АЭ, дополнительные параметры АЭ [5, 6].

### Результаты испытаний образцов стали 08X18H10T

В таблице 1 представлены результаты механических испытаний, регистрируемые установкой.

Таблица 1 – Результаты испытаний образцов стали 08X18H10T, полученной 3D печатью, на усталость

№ обр.	N, циклов	$\sigma$ , МПа (ср.)	f колебаний начал., Гц	f колебаний конеч., Гц
01	96348	380-395	62,1	39,7
02	80636	320	59,7	42,2

На рис. 1 приведены диаграммы изменения нагрузки и частоты колебаний во времени двух образцов 01 и 02. Напряжение изменялось несколько неравномерно из-за особенностей работы установки для циклических испытаний. Средняя амплитуда испытаний образца 01 составила 380-395 МПа, для образца 02 – 320 МПа. Конечная стадия испытаний для каждого из образцов завершалась снижением частоты резонансных колебаний, вызванным образованием и ростом магистральной трещины.

Рис. 2 демонстрирует накопление суммарной дискретной АЭ, сопоставленной с диаграммой изменения частоты колебаний образца во времени. На рис. 3 приведены диаграммы регистрации амплитуды АЭ сигналов, совмещенные с диаграммами накопления суммарной АЭ.

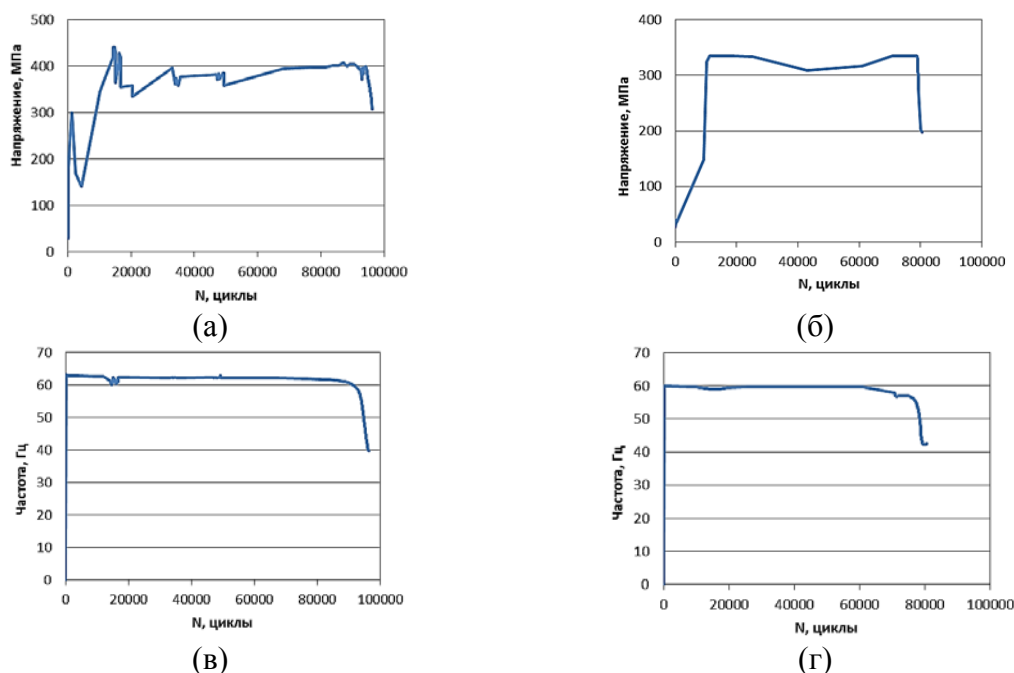


Рисунок 1 – Диаграммы испытаний образцов: зависимости напряжения от числа циклов для образца 01 (а), для образца 02 (б), зависимости частоты резонансных колебаний при испытаниях от числа циклов для образца 01 (в), для образца 02 (г).

При достижении 87 тыс. циклов, после того, как частота колебаний образца 01 в процессе испытаний снизилась на 1 Гц с 62 до 61 Гц (рис 1.в), амплитуда регистрируемых сигналов постепенно течение 120 с (примерно 7 тыс. циклов) начала расти от 200 мВ до 1000 мВ (рис 3.а).

В образце 02 после достижения 70 тыс. циклов, когда частота колебаний снизилась на 0,5 Гц с 60 до 59,5 Гц (рис 1.г), амплитуда регистрируемых сигналов в период 1200 с (примерно 68 тыс. циклов) повысилась от 50 мВ до 1000 мВ (рис 3.б).

Приведенные факты указывают на то, что в указанные периоды времени в каждом из образцов произошло зарождение и активный рост магистральной трещины. Чув-



ствительность метода акустической эмиссии позволила зарегистрировать эти изменения при незначительном снижении частоты в начальный период зарождения трещин.

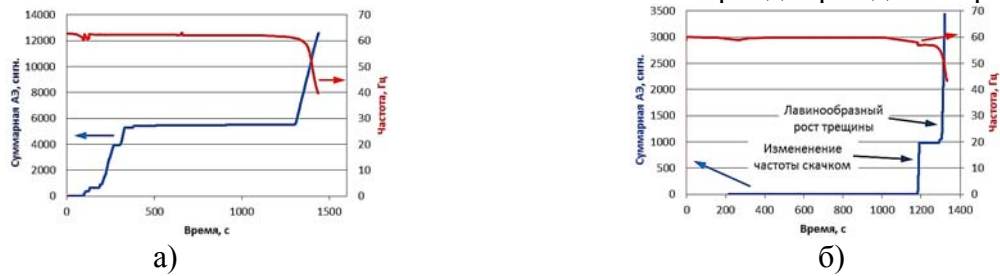


Рисунок 2 – Диаграммы зависимости суммарной АЭ (N) и частоты колебаний образца от времени: образец 01(а), образец 02 (б).

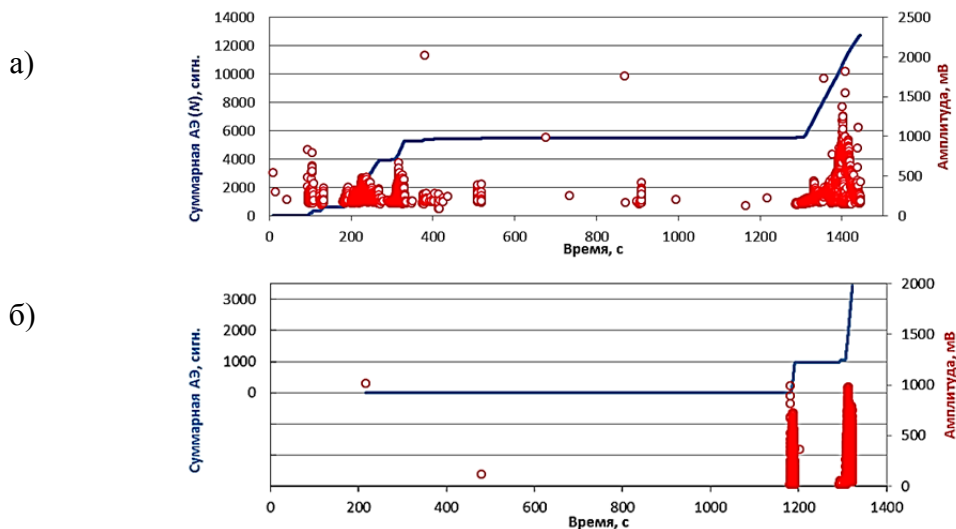


Рисунок 3 – Диаграммы зависимости суммарной АЭ (N) и амплитуды от времени для образца 01(а), для образца 02 (б).

При этом необходимо отметить различие в характере накопления развивающихся повреждений, регистрируемых в виде сигналов АЭ, для обоих образцов. В начале инкубационного периода на стадии циклической текучести образца 01 ориентировочно до 25000 циклов испытания наблюдается генерация сигналов АЭ, связанная с развитием пластической деформации в приповерхностных слоях образца. Активность сигналов АЭ (не приведена на графиках) в образце 01 находится в пределах  $dN/dt = 50-100 \text{ с}^{-1}$ , амплитуда колеблется в пределах 200-700 мВ (рис 3,а).

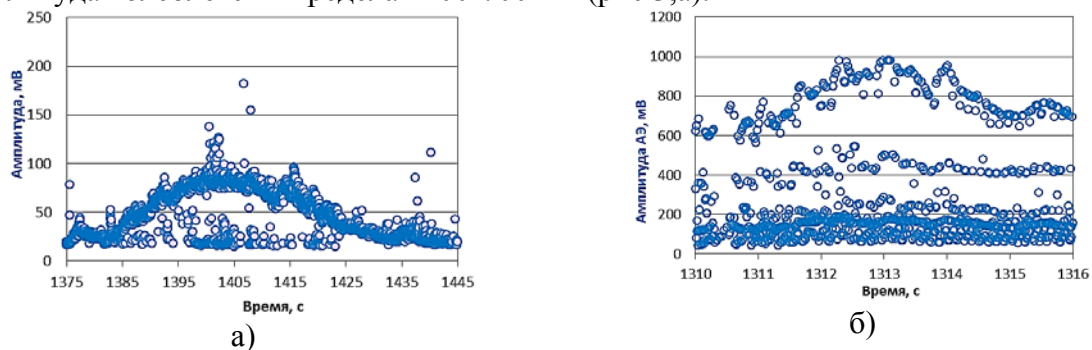


Рисунок 4 – Амплитуда АЭ, зарегистрированная на стадии роста магистральной трещины в образце 01(а) и образце 02 (б).

При испытании образца 02 первые сигналы с высокой активностью и амплитудой пределах 50-1000 мВ появляются в момент, частота резонансных колебаний образца уже начинает снижаться (рис 3,б). В данный же период происходит скачкообразное изменение частоты колебаний, что может быть связано со значительным резким при-

ращением длины трещины ввиду неравномерности структуры образца, полученного лазерным сплавлением из порошка.

Каждый цикл изгибающей нагрузки в зависимости от состояния материала в устье растущей трещины может приводить или к пластической деформации локализованной зоны, или разрушению упрочненного в процессе циклической деформации материала. Данные эффекты можно наблюдать по волновому изменению амплитуды в период активного роста магистральной трещины обоих образцов (рис. 4).

#### **Заключение**

Проведенные предварительные исследования показали информативность метода АЭ, совмещенного с методом регистрации частоты резонансных колебаний при проведении усталостных испытаний и исследовании поведения структурно неоднородных материалов, полученных 3D печатью. Различие между характером регистрируемых сигналов АЭ для двух испытанных образцов показывает неравномерность формирования структуры в процессе выполнения технологии селективного лазерного сплавления. В дальнейшем необходимо выполнить исследования структурных изменений, характеризующих зарождение дефектов, их развитие и слияние в магистральную трещину, которые позволят установить связь между характером развития трещины и параметрами регистрируемых сигналов АЭ.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке гранта государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-452.2022.4). Авторы благодарят главного научного сотрудника лаборатории магнитного структурного анализа Института физики металлов им. М.Н. Михеева д.т.н. Казанцеву Н.В. за предоставленные для исследований образцы стали 08X18H10T, изготовленные 3D печатью методом СЛС.

#### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Коваленко Р.В. Современные полимерные материалы и технологии 3D печати// Вестник Казанского технологического университета. 2015. №1. С. 263-266.
2. Zhong Y., Liu L., Wikman S., Cui, D., Shen Z. Intragranular cellular segregation network structure strengthening 316L stainless steel prepared by selective laser melting// Journal of Nuclear Materials. 2016. V. 470. P. 170
3. Kazantseva N., Krakhmalev P., Asberg M., Koemets Y., Karabanalov M., Davydov D., Ezhov I., Koemets O. Micromechanisms of Deformation and Fracture in Porous L-PBF 316L Stainless Steel at Different Strain Rates// Metals. 2021. No 11. P. 1870.
4. Kazantseva N.V., Ezhov L.V., Vinogradova N.I., Il'inykh M.V., Fefelov A.S., Davydov D.I., Oleneva O.A., Karabanalov M.S. Effect of built geometry on the microstructure and strength characteristics of the Ti-6Al-4V Alloy prepared by the selective laser melting// Physics of Metals and Metallography. 2018. V.119. С.1079-1086
5. Башков О.В. Попкова А.А., Башкова Т.И., Шаркеев Ю.П. Исследование стадийности накопления усталостных повреждений в структурированных образцах титана BT1-0 методом акустической эмиссии// Цветные металлы. 2017. № 9. С. 84-90.
6. Khon H.H., Bashkov O.V., Bashkova T.I. Experimental validation of identification crack propagation in plates as a source of acoustic emission// Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. V. 200. P. 77-86.
7. Khon, H., Bashkov, O.V. The study of acoustic emission waves generated from different types of sources // Materials Today: Proceedings. 2019. V. 19. P. 2243-2247.
8. Башков О.В., Панин С.В., Семашко Н.А. Петров В.В, Шпак Д.А. Идентификация источников акустической эмиссии при деформации и разрушении стали 12X18H10T // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 10. С. 51-57.

Шуляк Дарья Андреевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Shulyak Daria Andreevna, student of Komsomolsk-na-Amure State University

Проценко Александра Николаевна, кандидат химических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Protsenko Alexandra Nikolaevna, PhD, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

## **КАТАЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ КОМПЛЕКСА МЕДИ(II) С 1-(4-ХЛОРФЕНИЛ)ПИПЕРАЗИНОМ НА ПРИМЕРЕ РЕАКЦИИ ИЗОМЕРИЗАЦИИ Н-ГЕПТАНА**

### **CATALYTIC ACTIVITY OF THE COPPER(II) COMPLEX WITH 1-(4-CHLOROPHENYL)PIPERAZINE ON THE EXAMPLE OF THE N-HEPTANE ISOMERIZATION REACTION**

Аннотация. Впервые исследована каталитическая активность соединения хлорида меди(II) состава  $(H_2L)[CuCl_4]$  и  $(H_2L)[CuCl_4] \cdot H_2O$ , где  $L = 1-(4-хлорфенил)пиперазин$  на примере реакции изомеризации гептана нормального строения в интервале температур 50-100 °С. Был определен качественный состав продуктов реакции.

Abstract. The catalytic activity of a copper(II) chloride compound of the composition  $(H_2L)[CuCl_4]$  and  $(H_2L)[CuCl_4] \cdot H_2O$  was studied for the first time, where  $L = 1-(4-chlorophenyl)piperazine$  on the example of the heptane isomerization reaction of normal structure in the temperature range of 50-100 °C. The qualitative composition of the reaction products was determined.

Ключевые слова: каталитическая активность, комплекс, медь, 1-(4-хлорфенил)пиперазин, комплексообразование, ИК-спектроскопия, рентгеноструктурный анализ (РСА).

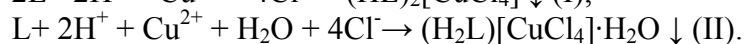
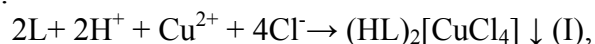
Keywords: catalytic activity, complex, copper, 1-(4-chlorophenyl)piperazine, complexation, IR-spectroscopy, X-ray diffraction analysis (XRD).

В нефтеперерабатывающей промышленности применяются разнообразные катализаторы, которые являются важной темой для изучения каталитической активности. Использование новых комплексов на основе меди(II) с азотсодержащими органическими соединениями в кислой среде в качестве самостоятельного катализатора даст возможность получать высокоэффективные каталитические системы для нефтепереработки. Современные катализаторы (хлорид алюминия, алюмоплатиновые катализаторы, цеолитные катализаторы и др.) имеют один общий недостаток – высокая температура процесса - от 120 до 450 °С. Что негативно влияет на экономическую составляющую [1-3].

Целью данной работы является поиск и создание новых каталитических систем процесса низкотемпературной изомеризации алканов нормального строения не превышающих температурный диапазон в 120 °С.

В качестве новых каталитических систем рассматриваются новые тетрагалогенидные комплексы меди(II) с азотсодержащим гетероциклическим основанием 1-(4-хлорфенил)пиперазином.

Комплексы были получены взаимодействием подкисленных этанольных растворов соли хлорида меди(II) с органическим катионом в соотношении металл : основание = 1 : 2:



Для эксперимента были использованы хлорид меди(II) (х.ч.), концентрированная соляная кислота (х.ч.), этанол (ректификат), 1-(4-хлорфенил)пиперазин (х.ч.) (рисунок 1), реактор и необходимое лабораторное оборудование.

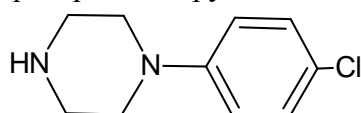


Рисунок 1 – 1-(4-хлорфенил)пиперазин (L)

Исследования на каталитическую активность полученных комплексов проводился в реакторе периодического действия (рисунок 2) на примере реакции изомеризации гептана нормального строения. В реактор приливали 10 мл н-гептана и катализатор в концентрации 2 % от массы углеводорода при температуре от 50 до 100 °С с целью изучения процесса низкотемпературной изомеризации парафиновых углеводородов (таблица 1).



Рисунок 2 – Реактор периодического действия

Таблица 1 – Продукты реакции изомеризации н-гептана при разном температурном режиме эксперимента

Углеводород / температура, °С	Гептан, 50-80 °С	Гептан, 90 °С
Продукт	метоксиэтанол	метоксиэтанол
	диметоксиэтан	диметоксиэтан
	метилформиат	метилформиат
	3-метилгексан	3-метилгексан
	метилциклогексан	метилциклогексан
		н-гексан

В результате реакции основным продуктом изомеризации н-гептана является 3-метилгексан. Также в состав продуктов входит циклическое соединение – метилциклогексан и ряд кислородосодержащих органических соединений. При нагреве образца при температуре 90 °С, к уже имеющимся аналогичным продуктам реакции, добавляется гексан нормального строения.

При режиме эксперимента - 100 °С в течение 2 часов н-гептан образовывал широкий ряд различных производных углеводородов как алифатического, так и циклического ряда с различным количественным соотношением атомов углерода (рисунок 3). Наличие циклических компонентов благоприятно влияет на качество автомобильных бензинов, и при этом приводят к повышению октанового числа.

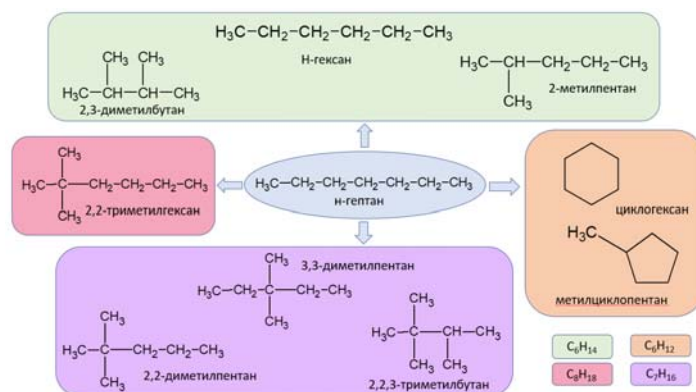


Рисунок 3 – Продукты реакции изомеризации н-гептана при 100 °С

### Заключение

В результате проведенного исследования тетрагалогенидные комплексы меди(II) зарекомендовали себя как эффективные катализаторы процесса изомеризации алканов нормального строения. Оба комплекса проявляют каталитическую активность при температурном режиме ниже 100 °С, что позволяет использовать соединения в качестве катализаторов низкотемпературной изомеризации алканов нормального строения. При температуре 100 °С показано, что в результате реакции происходит образование как 6, 7 так и 8 углеродсодержащих производных алифатического и циклического ряда различного состава. Что также приводит к повышению октанового числа.

**Благодарности.** Авторы благодарят Министерство образования и науки Хабаровского края (грант ХК 84С/2022) за поддержку работы.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ясакова Е. А., Ситдикова А. В., Ахметов А. Ф. Тенденции развития процесса изомеризации в России и за рубежом // Нефтегазовое дело. 2010. Т. 1.
2. Хаимова Т.Г., Мхитарова Д.А. Изомеризация как эффективный путь производства высокооктановых компонентов бензина // Информационно-аналитический обзор. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 2005. 80 с.
3. Silva A. C., Fernández T. L., Carvalho N. M., Herbst M. H., Bordinhão J., Horn Jr., A., Antunes O. A. C. Oxidation of cyclohexane catalyzed by bis-(2-pyridylmethyl)amine Cu(II) complexes // Applied Catalysis A: General. 2007. 317(2). P. 154-160.

УДК 608.2

Яцко Дмитрий Сергеевич, младший научный сотрудник Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук  
Yatsko Dmitriy Sergeevich Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

### ОСОБЕННОСТИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

### FEATURES OF ADDITIVE MANUFACTURING OF MAGNETIC MATERIALS

Аннотация. Технологии, применяемые в настоящее время для производства постоянных магнитов, устарели. В настоящее время технологии развиваются в направлении автоматизированного производства, где человек исполняет исключительно управляющую роль. В данной работе исследовано применение аддитивных технологий с целью получения магнитных материалов. Предложено оборудование и технология автоматизации процесса.

Abstract. The technologies being in use for manufacturing permanent magnets are obsolete. Currently, technologies are developing in the direction of automated manufacturing, where a human plays a controlling role. In this paper, the use of additive technologies to obtain magnetic materials is investigated. The equipment and the technology of automating the process is suggested.

Ключевые слова: магнетизм, аддитивные технологии, лазерное излучение.  
Key words: magnetism, additive manufacturing, laser emission.

### **Введение**

Постоянные магниты и магнитные материалы являются важной и неотъемлемой частью современной промышленности. Они используются в различной технике, от микроволновок до современной электроники. Наибольшей эффективностью обладают постоянные магниты с добавлением редкоземельных элементов (Sm и Nd), увеличивающих эксплуатационные характеристики и область применения [1, 2].

Современное производство постоянных магнитов ориентировано на массовое изготовление однотипных изделий. Как правило, постоянные магниты изготавливают одним из двух наиболее распространённых методов, это заливка в форму или прессование порошка. В основном, производство постоянных магнитов разделено на несколько этапов:

- подготовка оснастки, литейных или пресс-форм;
- подготовка компонентов сплава и его плавление в печи;
- измельчение сплава в мельнице для его запрессовки;
- заливка сплава или прессование порошка в формах;
- финальная механическая обработка и намагничивание.

На всех вышеперечисленных этапах производства необходимо присутствие человека, однако развитие современных технологий направлено на минимизацию ручного труда и переход к автоматике.

Также существуют такие методики производства постоянных магнитов как [1]:

- синтез из металлов;
- электролиз расплавленных сред;
- осаждение из газовой фазы;
- карботермическое восстановление;
- борокарботермическое восстановление;
- восстановление из оксидов РЗМ карбидом бора;
- боротермическое восстановление оксидов РЗМ;
- металлотермическое восстановление смесей оксидов РЗМ и бора.

Но их применение ограничено из-за специфики их применения, обычно это связано с ограниченностью размеров получаемых изделий или большого срока их изготовления.

Современная промышленность переходит на максимально автоматизированное производство, что уменьшает количество брака и увеличивает скорость работы. В этом отношении применение аддитивных технологий позволяет минимизировать роль человека как исполнителя, оставляя за оператором исключительно управляющую роль.

### **Лазерные аддитивные технологии**

Существует множество разновидностей применяемых аддитивных технологий (рисунок 1) [3, 4].

Основные различия у представленных разновидностей связаны с используемым материалом. Чаще всего используются различные полимеры или металлы. Для изготовления магнитных материалов из металлов лучше всего подходит применение аддитивных технологий с использованием лазерного излучения для плавления металла.

Аддитивные технологии, в которых применяется лазерное излучение и металлический порошок, разделяют на несколько разновидностей в зависимости от способа подачи материала в область построения (сплавления порошка с поверхностью).

Например, при работе по технологии Directed Energy Deposition (DED) [5] порошок подаётся непосредственно в область плавления, что повышает эффективность его

использования. Концепция применения DED технологии представлена на рисунке 2. Часто, DED технология применяется для нанесения покрытий из металлов, твёрдых растворов и металлов с хорошей адгезией [6-9]. Однако, применение аддитивных технологий не ограничивается изготовлением новых изделий, они также применяются для ремонта. [10, 11].

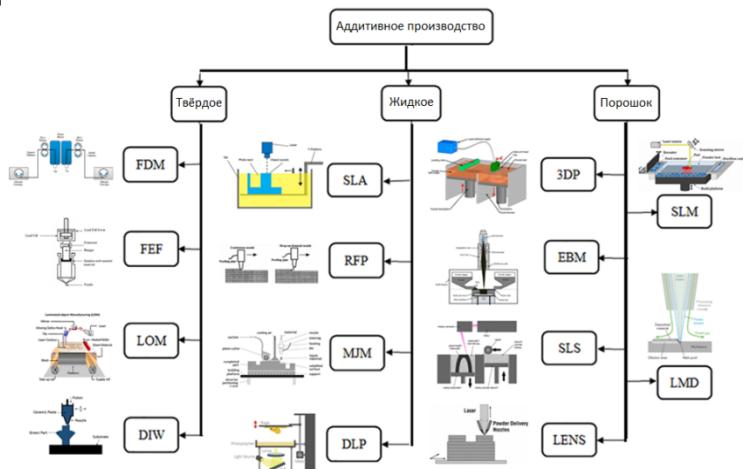


Рисунок 1 – Основные группы аддитивных технологий

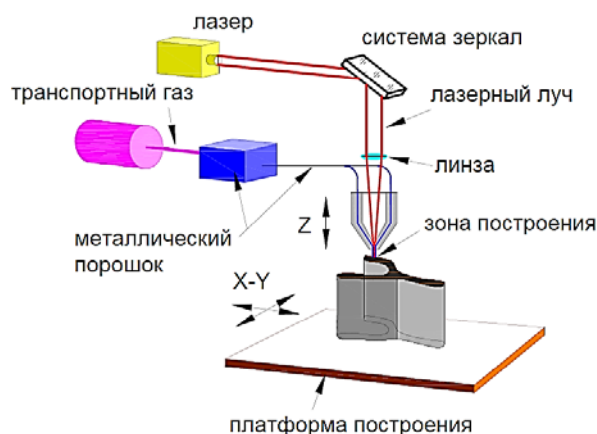


Рисунок 2 – Принцип АП по технологии Directed Energy Deposition

### Получение магнитов, используя аддитивные технологии

Использование аддитивных технологий позволяет получать материалы, обладающие магнитными свойствами. Проведённые исследования показали, что при сплавлении металлов лучом лазера в постоянном магнитном поле напряжённостью 500-540 мТл (рисунок 3), материал приобретает свойства ферромагнетика.

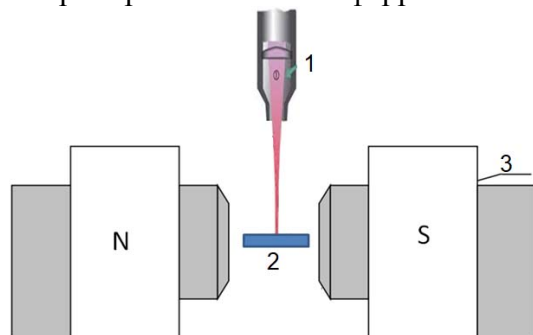


Рисунок 3 – Принцип получения магнитных материалов аддитивными методами  
1) луч лазера; 2) сплавляемый материал 3) источники магнитного поля

В процессе эксперимента смесь порошков Sm/Co (37/63) сплавлялась лазерным излучением на поверхности пластины из нержавеющей стали марки 12X18Н10Т. Связующая смесь из поливинилового спирта ((C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O)<sub>x</sub>) (0,5 г), борной кислоты (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>)

(0,5г), сорбита (C6H14O6)(1 г) и пропиленгликоли (3 мл<sup>3</sup>) удерживала порошок на поверхности, не позволяя ему сдвинуться под действием магнитного поля.

Исследование спектров дифракции экспериментально полученных образцов из смеси порошков Sm/Co показало, что при сплавлении образуется интерметаллид Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>. Из-за использования порошков чистых металлов получаемые образцы сильно окисляются, что, в конечном счёте, негативно сказывается на их магнитных свойствах (рисунок 4). Аналогичные эксперименты с использованием сплава КС25ДЦ показали, что у получаемых образцов присутствует остаточная намагниченность порядка 7 етл/г.

Исследование на магнитооптическом Керр-микроскопе позволило определить, что средний размер магнитного домена у получаемых образцов (из порошков Sm/Co) варьируется от 50-100 мкм в длину и 20-30 мкм в ширину.

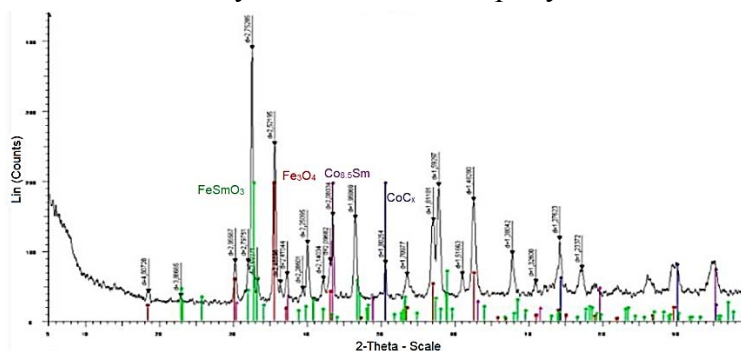


Рисунок 4 – Дефракционные спектры полученных образцов

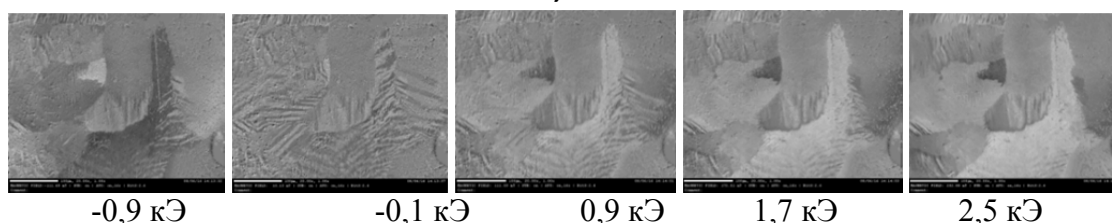
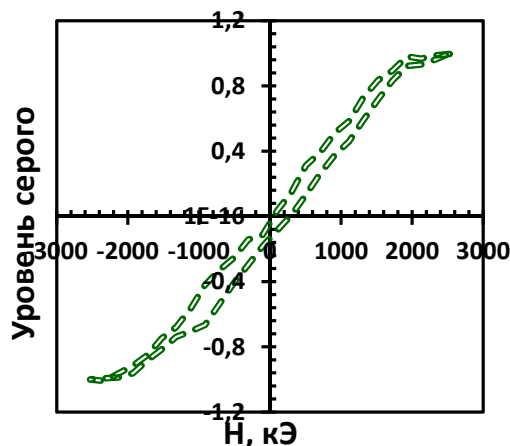
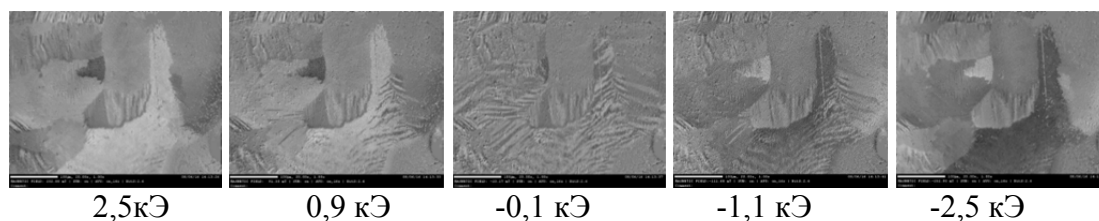


Рисунок 5 – Петля магнитного гистерезиса по данным магнитооптического Керр-микроскопа и соответствующего распределения намагниченности для наплавленного Sm–Co образца при 300 К в полузамкнутом сосуде с продувкой аргона.

Размер магнитной площади равен 450x450 мкм<sup>2</sup>



## Закключение

Современная наука и промышленность имеет значительный задел для разработки технологии аддитивного изготовления материалов, обладающих магнитными свойствами. Экспериментальным путём доказана возможность получения магнитных материалов из смеси порошков Sm/Co и сплава KC25ДЦ на основе Co. Определены остаточная намагниченность (7 ему/г) и размер магнитных доменов (50-100 на 20-30 мкм) полученных образцов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Игнатов А.С. Исследование и разработка способа получения гибких магнитных материалов на основе системы Nd-Fe-B // диссертация на соискание степени кандидата Технические наук: 05.16.02 [Место защиты: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»], 2018. – 127 с.
2. W. Duffner Robert Science and Technology The Making of the Air Force Research Laboratory // — Alabama, USA Air University Press, 2000. - с. 128.
3. Колчанов Д.С. Разработка оборудования и технологии выращивания изделий методом селективного лазерного плавления порошков нержавеющей стали // диссертация на соискание степени кандидата Технические наук: 05.02.07 [Место защиты: ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»], 2018.- 138 с.
4. Краснова Е.В., Саушкин Б.П. Аддитивное формообразование изделий из металлов и сплавов пучком электронов: прямая подача энергии и материала в зону плавления (часть 2) // Аддитивные технологии №2 2021г С 46-57.
5. Лысыч М.Н., Шабанов М.Л., Качурин А.А, Обзор современных технологий 3D печати // СОВРЕМЕННЫЕ НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ № 6, 2015 С 26-30.
6. Ahsan M., Pinkerton A.J., Moa tR.J., Shackleton J. Comparative study of laser direct metal deposition characteristics using gas and plasma-atomized Ti-6Al-4V powders // Materials science and engineering a-structural materials properties microstructure and processing 528 (2011) 7648-7657P.
7. Shah K., Haq I.U., Khan A., Shah S.A., Khan M., Pinkerton A.J. Parametric study of development of Inconel-steel functionally graded materials by laser direct metal deposition // Materials & Design, 54 (2014) 531-538P.
8. Shiva S., Palani I.A., Mishra S.K., Paul C.P., Kukreja L.M. Investigations on the influence of composition in the development of Ni-Ti shape memory alloy using laser based additive manufacturing // Optics And Laser Technology, 69 (2015) 44-51P.
9. Paul C.P., Ganesh P., Mishra S.K., Bhargava P., Negi J., Nath A.K. Investigating laser rapid manufacturing for Inconel-625 components // Optics Laser Technol. 39 (2007) 800-805P.
10. Казаков Н.П., Лесничий В.В., Карпухин А.П. Экономические показатели ремонтно-восстановительных работ с использованием аддитивных технологий // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооружённых Сил Российской Федерации. – 2019. – № 2(12). – С. 123-134.
11. Быков В.В., Голубев М.И., Голубев И.Г. Направления использования аддитивных технологий при ремонте лесопромышленных и лесохозяйственных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2019. – № 3. – С. 26-30. – DOI 10.31044/1684-2561-2019-0-3-26-30.

## **СЕКЦИЯ ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЦЕССЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

УДК 621.9.042

Арсеньев Владимир Борисович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Arseniev Vladimir Borisovich, student, Komsomolsk-on-Amur State University

Серебренникова Анжела Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Serebrennikova Anzhela Gennadievna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ "КАЧАЛКА" С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CAD/CAM/CAE-СИСТЕМ**

### **STUDY OF THE PARAMETERS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF MANUFACTURING THE PART "SWING CHAIR" USING CAD/CAM/CAE SYSTEMS**

Аннотация. В данной статье проведен анализ существующего технологического процесса изготовления детали «Качалка» и предложено его усовершенствование на основе данных, полученных в результате инженерного анализа процесса изготовления в САМ-системе программы NX 8.5. Суть совершенствования технологического процесса заключается в изменении параметров обработки, на основе данных, полученных в результате применения CAE-модуля программы NX 8.5. После приложенных нагрузок, которые происходят в результате обработки, видно, каким образом деформируется деталь. При изготовлении деталей, самое главное, это получить точные размеры. Чтобы уйти от погрешностей при обработке, необходимо подобрать такие режимы обработки, при которых деталь будет деформироваться меньше.

Abstract. Investigation of the parameters of the technological process of manufacturing the part "Swing chair" using CAD / CAM / CAE systems. This article analyzes the existing technological process for the manufacture of the part "Swing chair" and proposes its improvement based on data obtained as a result of engineering analysis of the manufacturing process in the CAM system of the program NX 8.5. The essence of improving the technological process is to change the processing parameters, based on the data obtained as a result of using the CAE module of the NX 8.5 program. After the applied loads that occur as a result of processing, you can see how the part is deformed. When manufacturing parts, the most important thing is to get the exact dimensions. To avoid errors during processing, it is necessary to select such processing modes under which the part will be deformed less.

Ключевые слова: модель, обработка, режимы резания, режущий инструмент, траектория, силы резания, крутящий момент.

Key words: model, processing, cutting conditions, cutting tool, trajectory, cutting forces, torque.

В последнее время, в машиностроении активно используются САПР-системы, которые помогают моделировать, анализировать и проектировать обработку на станках с ЧПУ. Одной из функций современных систем САПР является оценка напряженно-деформированного состояния детали под нагрузками, возникающими в процессе обработки. Для этого в системах САПР используются стандартные модули CAE [1].

В данной работе представлен процесс и результаты анализа напряженно-деформированного состояния детали качалка в процессе обработки фрезерованием на станке фрезерной группы. Для анализа использован модуль CAE программы NX 8.5 [1].

Деталь качалка является частью механизма управления закрылками самолета и используется для поворота на определенный угол части механизма. Она предназначена для обеспечения взаимного расположения подшипников относительно главной оси и обеспечение требуемой точности отверстий подшипники. Качалка воспринимает все нагрузки, возникающие в ходе работы, обеспечивает стабильность характеристик: прочности, жесткости, виброустойчивости. В связи с этим при изготовлении необходимо максимально точно обеспечить все требуемые размеры.

Рассмотрим процесс обработки поверхностей 1 и 2, показанных на рисунке 1.

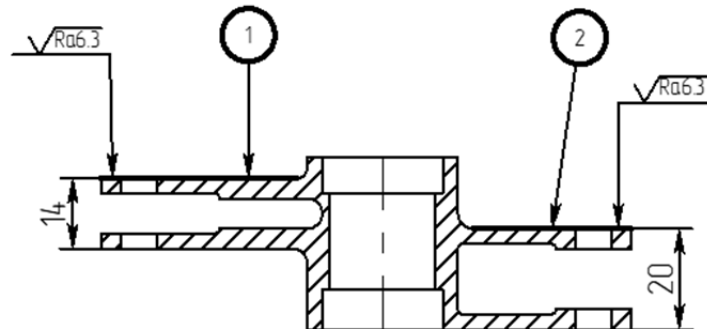


Рисунок 1 – Эскиз операции 010

Проанализируем режим обработки данных плоскостей. Назначим в модуле САМ: скорость резания  $V_c = 800$  м/мин, подача на зуб  $s_z = 0,08$  мм, частота вращения  $n = 15915$  мин<sup>-1</sup>, минутная подача  $s_m = 2546$  мм/мин.

На рисунке 2 показана траектория обработки данных поверхностей. Режущий инструмент – концевая фреза  $\varnothing 16$ , 2 зуба.

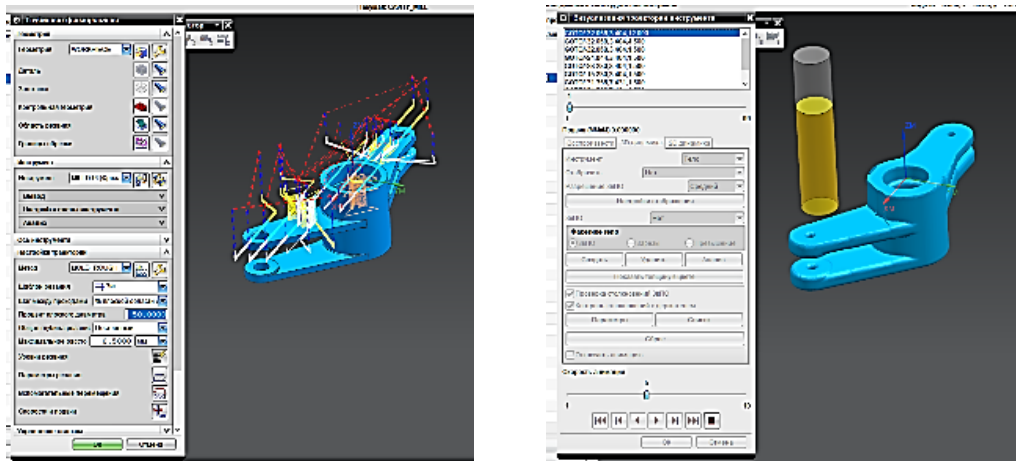


Рисунок 2 – Траектория движения инструмента

Переходим в модуль САЕ и создаем модель нагрузки детали при обработке. Открываем вкладку Проектирование и создаем идеализированную модель. Накладываем сетку ТЕТРА(10), размер элемента 4 и назначаем материал (рисунок 3).

Данная сетка необходима, чтобы разбить тело на более мелкие участки. Сетка является неотъемлемой частью процесса инженерного моделирования, где сложные геометрические объекты делятся на простые элементы. Сетка влияет на точность, сходимость и скорость моделирования

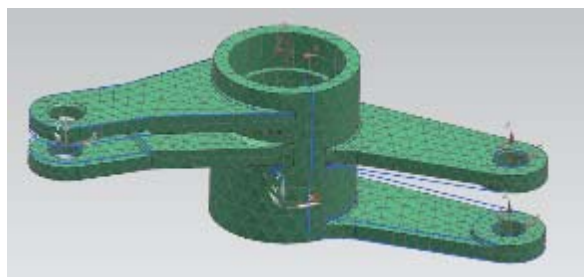


Рисунок 3 – Модель с построенной сеткой STETRA(10),

После этого задаем ограничения детали и нагрузку. Берем фиксированное ограничение, так как на данной операции баз еще нет и деталь зажимается в призмы В качестве нагрузки – приложим силу, равную 300 Н (рисунок 4).

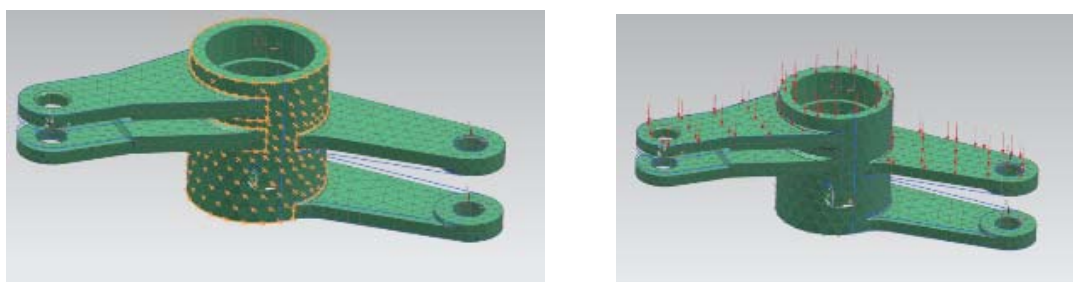


Рисунок 4 – Модель с зафиксированным закреплением и приложенной нагрузкой

После того, как настроили все нагрузки и ограничения, запускаем Решатель. В итоге получается картина напряженно-деформированного состояния детали качалка в процессе обработки (рисунок 5).

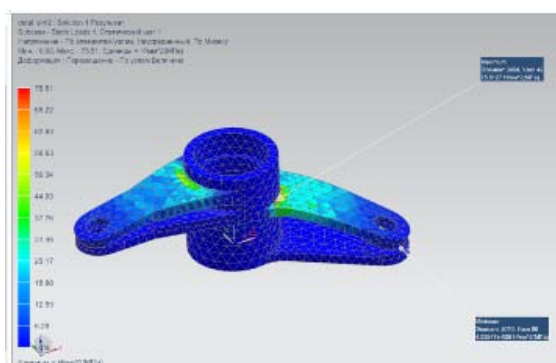


Рисунок 5 – Напряженно-деформированное состояние детали

После анализа данных, в которых видно, по каким осям и какое значение перемещений получилось, можно изменять параметры режима резания и приложенную силу и повторять расчет до получения оптимального результата, при котором деталь будет испытывать наименьшие нагрузки.

Вывод: по данному алгоритму можно промоделировать разные условия обработки и таким образом определить оптимальный режим.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гончаров П. С., Артамонов И. А. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ / П. С. Гончаров, И. А. Артамонов, Т. Ф. Халитов, С. В. Денисихин, Д. Е. Сотник / М.: ДМК Пресс. – 504 с.

Арчаков Беслан Магомет-Баширович, студент; Archakov Beslan Magomet-Bashirovich  
Бахматов Павел Вячеславович, к.т.н, доцент Bakhmatov Pavel Vyacheslavovich  
Комсомольский-на-Амуре государственный университет

## **ВЛИЯНИЕ УГЛА ЗАТОЧКИ ВОЛЬФРАМОВОГО ЭЛЕКТРОДА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ШВА**

### **INFLUENCE OF THE SHARPENING ANGLE OF THE TUNGSTEN ELECTRODE ON THE SEAM CHARACTERISTICS**

Аннотация. Данная статья посвящена влиянию угла заточки вольфрамового электрода на характеристики шва. В данной работе были рассмотрены вопросы рекомендации выбора угла заточки электрода в зависимости от выбора марки и какое влияние оказывает тот или иной зазор между электродом и деталью. Также были рассмотрены вопросы о видах и методах заточки вольфрамового электрода.

Abstract. This article is devoted to the influence of the sharpening angle of the tungsten electrode on the characteristics of the seam. In this paper, the issues of recommending the choice of the sharpening angle of the electrode were considered, depending on the choice of brand and what effect this or that gap between the electrode and the part has. Questions about the types and methods of sharpening the tungsten electrode were also considered.

Ключевые слова: вольфрамовый электрод, заточка электрода, сварной шов, сварка, аргонодуговая сварка.

Key words: tungsten electrode, electrode sharpening, weld, welding, argon arc welding.

#### **Введение**

Вольфрамовый электрод широко применяется как тугоплавкий благодарность материал, а в сварочном производстве в том числе применяется благодарность для стабильного поддержания дуги. Такие электроды классифицируют по цвету, для обозначения их химического состава. Вольфрамовые благодарность электроды относятся к неплавящемуся типу, а в среде защитного газа они могут выдерживать высокую температуру и продолжительную работу.

Вольфрамовые электроды выбирают, ориентируясь на:

- тип тока;
- легирующие добавки, зависящие от интенсивности работы;
- диаметр стержня.

#### **Основная часть**

Вольфрамовые электроды для аргонодуговой сварки нужно подготовить к работе. Основной недостаток неплавящихся стержней и отличие от плавящихся, заключается в необходимости предварительно затачивать пруток. Форму кончика электрода нужно постоянно проверять в процессе работы. Все дело заключается в потоках электронных частиц, направляющихся к кончику стержня. От интенсивности их движения зависит сила, с которой дуга давит на изделие. А от нее уже зависит равномерность проварки корня шва, ширина и чистота.

При изготовлении данных электродов может использоваться чистый вольфрам, или добавляться различные примеси, способствующие их улучшению. Область применения – автоматическая и полуавтоматическая сварка.

Форма заточки, зависит от используемого тока – для постоянного тока требуется конусовидная заточка, а для переменного – округлая. Заточенный электрод способен по-прежнему осуществлять с вои функции.

В ходе анализа литературных источников [2] было выявлено, что существуют огромные различия во взглядах различных исследователей к выбору геометрических параметров лантанированных вольфрамовых электродов и способствуют обеспечению их продолжительности работы. Рекомендуемые геометрические параметры электродов по различным НД мало согласуются друг с другом (см. табл. 1). В научной и технической литературе наблюдается значительный разброс рекомендуемых геометрических параметров вольфрамовых электродов.

На глубину шва и его ширину окажет влияние, на которую осуществляется заточка вольфрамового стержня. Она находится в зависимости от диаметра используемого электрода.

Чем тупее угол заточки  $>30^\circ$ :

- тяжелее зажигание дуги;
- уже сварной шов;
- необходимость большей силы св. тока;
- возрастание глубины проплавления металла;
- увеличение возможности блуждания дуги;
- больший срок службы электрода из вольфрама.

Чем острее угол заточки  $<30^\circ$ :

- проще зажигание дуги;
- шире сварной шов;
- необходима меньше сила сварочного тока;
- уменьшение возможности блуждания дуги;
- снижение глубины проплавления металла;
- меньше срок службы электрода из вольфрама.

Таблица 1 – Рекомендуемые диапазоны угла заточки вольфрамового электрода

Марка электрода	Диаметр электрода, мм	Рекомендуемый угол заточки	Источник информации
ВЛ, ВИ	-	28 -30°, 9-11°	ОСТ 36-57-81
ВЛ, ВИ	2,0-3,2	28 -30°, 9-11°	РД-25.160.00-КТН-011- 10
ВЛ	2,0	28 -30°, 9-11°	СТО Газпром 2-2.2- 136-2007
ВЛ	-	7-22°	ОСТ 26.260.3-2001
ЭВЛ, ЭВИ-1,	2,0	11-18°	РД 153-34.1-003-01
ЭВИ-2, ЭВИ-3, ЭВТ-15	3,0	17-28°	
ВЛ, СВИ-1	4,0	22-36	

Заточка вольфрамового электрода оказывает существенное влияние на форму сварочной дуги и ее поведение и, как следствие, на форму сварного шва и срок службы неплавящегося электрода (рис. 1).

Качество сварочных работ, зависит не только от выбора типа электрода и параметров сварочного тока, но еще и от правильной заточки стержня.

Для заточки электрода необходимо применять круги с мелким абразивным зерном. Рекомендуется применять шлифовальные круги с зернистостью 40 и менее (размер абразивных частей менее 400 мкм), поскольку в данном случае риски от абразива на поверхности будут менее глубокие и в процессе заточки будет стачиваться меньше драгоценного вольфрамового электрода. Глубокие канавки от абразивного круга вызывают потери энергии и нестабильное поведение дуги.

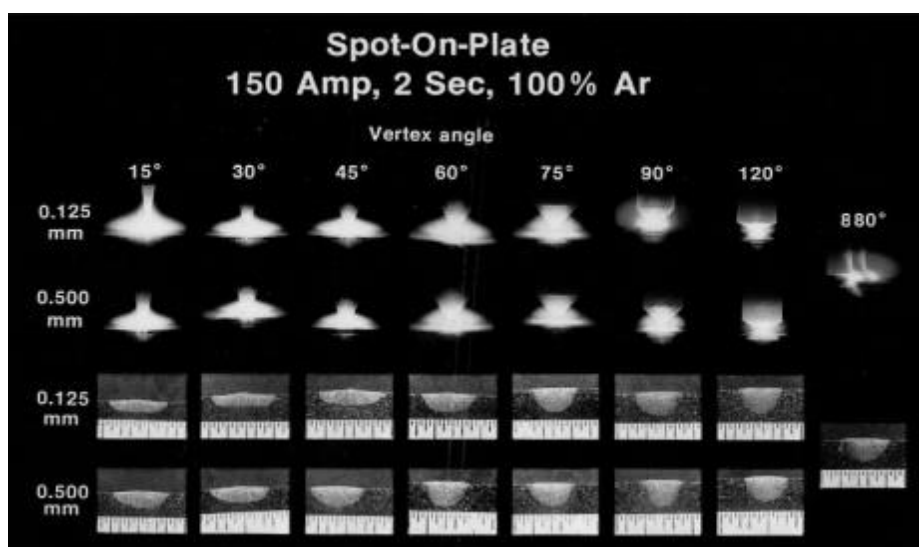


Рисунок 1 – Влияние угла заточки на форму дуги и геометрические параметры валика

В процессе заточки электрода есть необходимость следить, чтобы металл благодарности не перегревался. Признаком благодарности, перегрева является изменение цвета поверхности и показывает, что на поверхности образовались благодарности, оксиды, которые имеют большее сопротивление, чем вольфрам и будут препятствовать зажиганию дуги.

В процессе аргонодуговой сварки на переменном токе на конце благодарности, неплавящегося электрода выделяется значительное количество тепла, которое расплавляет электрод, поэтому необходимо делать благодарности, небольшое притупление, которое позволит сформировать шарик расплавленного вольфрама на конце.

Важным условием правильной заточки является благодарности, недопустимость ошибок. Не должно быть несимметричной заточки, вызывающей отклонение дуги в сторону от шва, и наличия рисок от заточки, не совпадающих по направлению с осью стержня, что также может вызвать блуждание дуги.

### Закключение

Технические преимущественные характеристики обусловлены химическим составом данного типа электродов. Поэтому неплавящиеся стержни используют для TIG-сварки, а этот способ широко распространен в энергетической, машиностроительной, авиационной, нефтеперерабатывающей промышленности. С помощью вольфрамовых электродов можно варить практически все известные металлы, получая при этом швы превосходного качества.

**Благодарности.** Научно-исследовательские работы выполнены за счёт средств ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (грант № ВН001/2020).

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сварка и сварщик <https://welding.com/svarka-inertnyh-gazah-volfra-movym-elektrodom-tig>
2. Атрощенко В.В., Бычков В.М., Фридлянд А.М., Селиванов А.С., Никифоров Р.В. Влияние геометрии лантанированного вольфрамового катода на стабильность глубины проплавления при сварке в аргоне // Сварочное производство, 2012.- №2.- С. 29-33.
3. Технология электросварочных и газосварочных работ: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. В. В. Овчинников. –7-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2016.-272 с.

Бахматов Павел Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология сварочного и металлургического производства им. В.И. Муравьева», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Bakhmatov Pavel Vyacheslavovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Technology of Welding and Metallurgical Production named after V.I. Muravyev", Komsomolsk-na-Amure State University

Тошев Сафарбек Курбонмуродович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Toshev Safarbek Kurbonmurodovich, student of Komsomolsk-na-Amure State University

## **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ТОНКОСТЕННЫХ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ**

### **DISTRIBUTION OF THERMAL FIELDS IN VARIOUS MODES OF AUTOMATIC WELDING OF THIN-WALLED BODIES OF ROTATION**

Аннотация. В работе приведены результаты определения характера изменения температурных полей при аргонодуговой сварке тонкостенных труб из нержавеющей стали при варьировании силой сварочного тока. Показана математическая модель расчета распределения тепла при использовании которой расхождение с экспериментальными данными составляет 3-5%.

Abstract. The paper presents the results of determining the nature of changes in temperature fields during argon arc welding of thin-walled stainless steel pipes with varying welding current strength. A mathematical model for calculating the heat distribution is shown, when using which the discrepancy with experimental data is 3-5%.

Ключевые слова: тепловые поля, распределение температуры, аргонодуговая сварка, трубные заготовки, нержавеющая сталь.

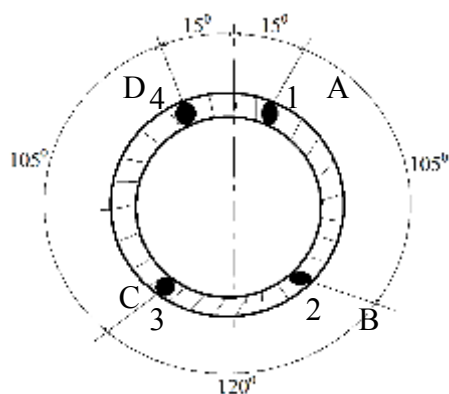
Key words: thermal fields, temperature distribution, argon arc welding, pipe blanks, stainless steel.

Для определения характера распределение температурного поля при наложении сварного шва при сварке встык тонкостенных труб по периметру сварного шва установлены термоэлектрические бескорпусные преобразователи ТПП(S), схема расположения приведена на рисунке 1. Первый ряд термопар располагался на границе сварочной ванны, а второй на расстоянии 4,0 мм от него. Таким образом, первый ряд термопар фиксировал температуру на границе жидкофазной области, а второй в зоне термического влияния. Распределение температур в процессе сварки трубных заготовок из нержавеющей стали 12Х10Н9Т фиксировалось 4-мя термопарами (рисунок 1).

Сварка труб из хромоникелевой стали 12Х18Н10Т Ø90 мм, толщиной 1,0 мм, осуществляли на разработанном кафедрой «ТСМП им. В.И. Муравьева» автоматизированной сварочной установке [1] с использованием присадочной проволоки Св06Х19Н9Т диаметром 1,0 мм. Процесс сварки осуществляли на постоянном токе обратной полярности вольфрамовым электродом диаметром 2,0 мм. Расход защитного газа – аргона 7 л/мин. Значения параметров сварочного режима соответствовали:  $I_{св} = 35$  А,  $U_{д} = 10 \div 11$  В;  $V_{св} = 100$  мм/мин ( $\omega = 0,013$  с<sup>-1</sup>).

Труба разбивалась на три основных и один дополнительный сегмент, который наносился для исключения непровара и пор. Самая верхняя точка, расположенная на вертикальной оси была началом сварного шва, который накладывался по ходу часовой стрелки.





1-4 – номера термопар

Рисунок 1 – Расположение термопар на поверхности трубы

Показания всех термопар в процессе сварки непрерывно записывались самописцем. Сварка осуществлялась на двух режимах. В первом случае режимы сварки были постоянные, во втором случае сила тока, по мере наложения сварного шва снижалась по определенному алгоритму  $I_1 > 3\% I_2 > 6,5\% I_3 > 3,5\% I_4$ .

Для замера распределения температур производилась разбивка свариваемых трубных заготовок на сегменты. Для сравнения с экспериментальными результатами, произведён расчёт температур точек, указанных на графике (рисунок 1). Выбор этих точек позволяет оценить точность сходимости экспериментальных и расчётных результатов вблизи и при удалении от движущегося теплового источника (рисунок 2 - 3).

На рисунке 2 показано распределение температуры в сварном шве с учётом разбивки кольцевого сварного шва на сегменты, с изменением силы тока. Также на рисунке показано распределение температур, полученных расчётным способом, согласно разработанной математической зависимости (1) распределения температурного поля [2] ( $A_{p15^0}$ ,  $B_{p120^0}$ ,  $C_{p240^0}$ ,  $D_{p345^0}$  - расчётные температуры в указанных точках;  $A_{\varepsilon 15^0}$ ,  $B_{\varepsilon 120^0}$ ,  $C_{\varepsilon 240^0}$ ,  $D_{\varepsilon 345^0}$  - экспериментальные температуры в указанных точках).

$$T(x, \alpha, t) = \frac{1}{8\pi\alpha\gamma\delta} \left( \left( \int_{t_0}^{t^*} \frac{q(t')}{t-t'} \exp\left(-\frac{(\varphi-\varphi_0)d^2}{4a(t-t')} - b(t-t')\right) dt' \right) + \right. \\ \left. + \left( \int_{t^*}^t \frac{q(t')}{t-t'} \exp\left(-\frac{(\varphi-\varphi_0)d^2}{4a(t-t')} - b(t-t')\right) dt' \right) \right) \quad (1)$$

Средние значения теплофизических параметров хромоникелевой стали 12X18H10T [3-4]:  $\alpha = \lambda / c\gamma = 0,053 \text{ см}^2/\text{с}$ ;  $\lambda = 0,25 \text{ Вт}/(\text{см}^3\cdot\text{K})$ ;  $c\gamma = 4,74 \text{ Дж}/(\text{см}^3\cdot\text{K})$ ;  $b = 2\alpha / c\gamma\delta = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/с}$ ;  $q = \eta \cdot U \cdot I_{св}$ .

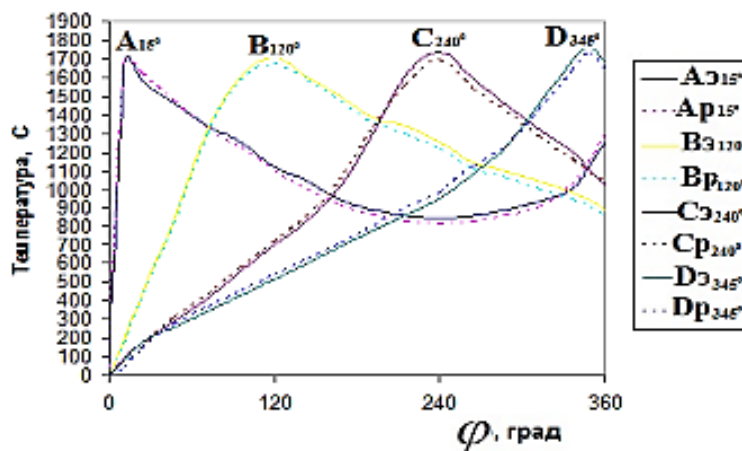


Рисунок 2 – Распределение температуры по границе сварного шва

На рисунке 3 показано распределение температуры на расстоянии 4 мм от центра валика сварного шва с учётом разбивки кольцевого сварного шва на сегменты, на каждом из которых сила тока меняется согласно зависимости  $I_1 > 3\% I_2 > 6,5\% I_3 > 3,5\% I_4$ . Также на рисунке 3 показано распределение экспериментальных температур без учёта разбивки на сегменты ( $A_{\varepsilon 15^0}$ ,  $B_{\varepsilon 120^0}$ ,  $C_{\varepsilon 240^0}$ ,  $D_{\varepsilon 345^0}$  - экспериментальные температуры в указанных точках при разбивке шва на сегменты;  $A_{\varepsilon^1 15^0}$ ,  $B_{\varepsilon^1 120^0}$ ,  $C_{\varepsilon^1 240^0}$ ,  $D_{\varepsilon^1 345^0}$  - экспериментальные температуры в указанных точках без разбивки шва на сегменты).

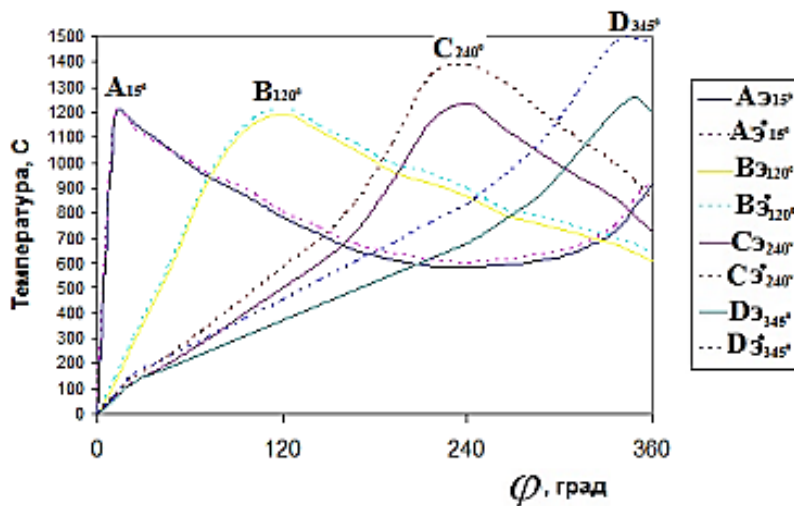


Рисунок 3 – Распределение температуры на расстоянии 4 мм от центра сварного шва

Расхождение расчётных и экспериментальных температур для указанных точек для труб из хромоникелевой стали 12Х18Н10Т не превышает 3÷5 %.

Таким образом, математическую зависимость температурного поля для тонкостенных цилиндрических оболочек, учитывающую временные периоды теплонасыщения и выравнивания можно считать корректной, так как, пользуясь ей можно проводить вычислительные эксперименты и строить алгоритмы управления нагревом от теплового источника при осуществлении процесса с использованием автоматической аргонодуговой сварки без проведения непосредственно натурных экспериментов.

#### Благодарности

Научно-исследовательские работы выполнены за счёт средств ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (грант № ВН001/2020).

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фролов А.В. Установка автоматической сварки элементов судовых трубопроводов // Морские интеллектуальные технологии № 2 том 2, 2021 С. 91-96 <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.057>
2. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. - М. : Москва, 1951. - 296 с.
3. Лебедев, Б.Д. Расчеты в теории сварочных процессов: науч. пособие. – К.: НМК ВО, 1992. 320 с.
4. Островский О.И., Григорян В.А., Станюкович В.Н. Теплофизические свойства стали // Сталь. 1988. №3. С.37-40.

Бондаревский Дмитрий Михайлович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Bondarevsky Dmitry Mikhailovich student of Komsomolsk-na-Amure State University

Бахматов Павел Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология сварочного и металлургического производства им. В.И. Муравьева», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Bakhmatov Pavel Vyacheslavovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Technology of Welding and Metallurgical Production named after V.I. Muravyev", Komsomolsk-na-Amure State University

## **О ВОЗМОЖНОСТИ СВАРКИ ТРЕНИЕМ ТВЁРДОСПЛАВНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

### **ABOUT THE POSSIBILITY OF FRICTION WELDING OF CARBIDE MATERIALS**

Аннотация. В данной работе изучались возможности сварки трением твердосплавных материалов. В работе были представлены и описаны основные преимущества сварки трением. В работе присутствуют разные виды сварки твердого сплава и конструкционных сталей. Приведены примеры сварки трением разноименных металлов и сплавов. Также, в работе была представлена схема машины сварки трением.

Abstract. In this paper, the possibilities of friction welding of carbide materials were studied. The paper presented and described the main advantages of friction welding. In the work there are different types of welding of hard alloy and structural steels. Examples of friction welding of dissimilar metals and alloys are given. Also, the scheme of the friction welding machine was presented in the work.

Ключевые слова: сварка трением, твердый сплав, деталь, конструкционная сталь, инструмент.

Key words: friction welding, hard alloy, part, structural steel, tool.

#### **Введение**

В современном машиностроении все чаще используется в качестве конструкционных материалов, режущие инструменты из твердых сплавов, например ВК8, Т15К6 и др., отлично зарекомендовавшие себя с позиции стойкости, твердости, температурных режимов, позволяющие осуществлять высокоскоростную обработку, высокопрочных материалов титановых сплавов например ВТ20, ВТ23, высокопрочных алюминиевых сплавов таких как В95, несмотря на большое количество положительных технологических факторов высокая стоимость твердого сплава является самым главным отрицательным фактором их применения, и одним из выходов является применение составного режущего инструмента в котором режущая часть состоит из твердого сплава, а хвостовик из конструкционной стали, при этом научный интерес представляется в определении способа их соединения обеспечивающего эксплуатационные свойства рабочего инструмента не хуже монолитного.

#### **Основная часть**

В работе приведены данные о способе сварки трением, которая является разновидностью сварки давлением. Соединение получается при совместной деформации обеих соединяемых деталей в твердом состоянии, отличается от других видов сварки давлением лишь источником нагрева, то есть введение тепла в свариваемые детали за счет сил трения соединяемых торцевых поверхностей деталей [1].

На рисунке 1, показана схема сварки трением, обе детали располагаются соосно, одна из них ставится в вращаемый зажим, а другая в не вращаемый зажим машины.

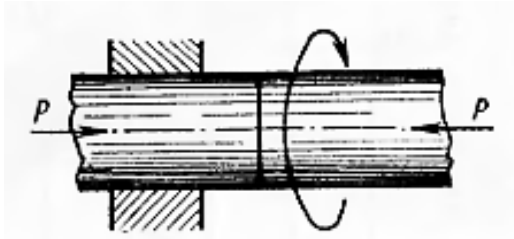


Рисунок 1 - Схема процесса сварки трением

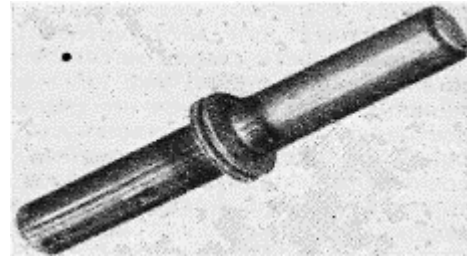


Рисунок 2 - Соединение с гратом

Трение поверхностей деталей происходит постоянным сжатием одной к другой, усилием  $P$ , торцы которых нагреваются до температуры в месте контакта, не превышающей температуры плавления основного металла (температура пластификации), необходимой для получения сварного соединения. После этого вращение останавливается почти мгновенно, затем происходит процесс сжатия (проковки), которое вдвое превышает давление, применяемое при нагреве деталей. Далее сварившуюся деталь охлаждают по технологическому процессу, в зависимости от свариваемых материалов.

Объем тонкого слоя нагретого металла настолько мал, что цикл его нагрева укладывается за время от нескольких секунд до полуминуты, в зависимости от материала и диаметра свариваемых деталей.

Одним из важных преимуществ сварки трением является высокое качество сварных соединений. При правильно выбранном режиме сварки, сварившаяся деталь обладает прочностью и пластичностью в стыке и около стыковой зоне, не хуже, чем основной металл свариваемых деталей, так как все окисные и адсорбированные пленки удаляются из стыка в грат, при деформировании металла в радиальном направлении, как показано на рисунке 2.

Сварка трением дает возможность получать прочные соединения не только из одноименных, но и большое число разноименных металлов и сплавов, таких у которых теплофизические характеристики различны, например, титан с алюминием, алюминий со сталями, медь со сталью, медь с алюминием, алюминий с титаном и др. При сварке трением нет особых требований по чистоте и загрязненности боковой поверхности свариваемых деталей, но для того чтобы соединение было прочным, нужно подготовить торцы деталей под сварку, например, подрезкой на токарном станке, шлифовкой торца детали на шлифовальном станке или наждаке, с помощью фрезерной обработки торца, пескоструйной операцией и др., перпендикулярность торцов оси вращения может иметь отклонение 5-7 градусов, которое не повлияет на сварное соединение, на поверхностях трения недопустима лишь окалина, так как из-за нее может образоваться недоброкачественное сваривание деталей.

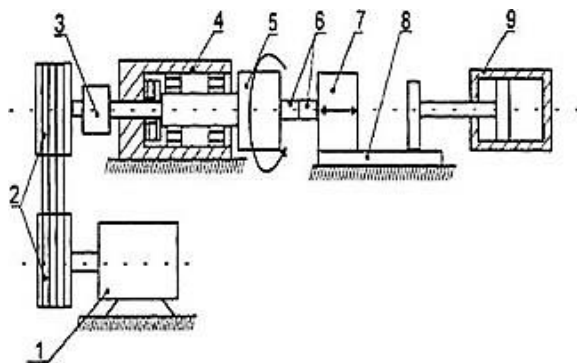


Рисунок 3 - Схема машины сварки трением



Рисунок 4 - Машина сварки трением

Машина сварки трением содержит основные узлы (рисунок 3): привод вращения шпинделя с двигателем 1, ременной передачей 2, фрикционная муфта 3, передняя бабка 4, вращающийся зажим 5, свариваемые детали 6, не вращающийся зажим 7, узел на котором расположен не вращающийся зажим 8, пневматические или гидравлические цилиндры 9, и представлен общий вид машины сварки трением (рисунок 4).

Существует известный способ соединения сваркой трения быстрорежущих сталей с конструкционными, для получения режущего инструмента, например, спиральные сверла, концевые фрезы, метчики, развертки и др. Режущая часть инструмента выполняется из дорогой быстрорежущей стали, например, P9, P18 и др., отличающиеся высокими износостойкостью, твердостью, а для хвостовой части инструмента с целью экономии, а также для придания большей вязкости обычно применяют конструкционную сталь, например, Ст45, 30ХГСА и др., при сварке этих сталей значительно снижаются затраты на дорогостоящую быстрорежущую сталь, так как используется только для режущей части инструмента.

Преимущества: небольшая энергоемкость процесса, высокая производительность, возможность автоматизации, высокие механические характеристики и качество сварного изделия. Недостатки: сложность необходимого оборудования, узкий спектр применения метода, невозможность применения в непроизводственных условиях, ограниченность по номенклатуре свариваемых материалов.

Существует способ диффузионной сваркой, с помощью которой, есть возможность их сварки в вакууме, сварка производится с применением промежуточной вставки между ними, никель и пермаллой, чаще вставка идет в виде фольги, вырезанной по диаметру свариваемых деталей. Прочность соединения зависит от толщины никелевой вставки от 0,08 до 0,10 мм, и подготовки поверхности перед сваркой, а именно шероховатость и параллельность торцов 0,02 наибольшее влияние на прочность соединения оказывает изменение температуры, изменение давления.

Есть возможность, при электроконтактной сварке твердосплавных пластин вк8 с державками токарных резцов из конструкционной стали 45, сварочный процесс, который имеет прочное соединение и не уступает диффузионному в вакууме, с промежуточной вставкой. Испытания сварных резцов не уступает по прочности монолитному твердосплавному резцу, и использование этой технологии соединения целесообразно на труднообрабатываемых сталях и сплавах, из этого делаем вывод, что присутствует экономия дорогого твердого сплава и сокращение расходов на покупку монолитного инструмента и повышение производительности станков за счет стойкости и малого износа режущего инструмента.

### **Вывод**

Сварка трением твердого сплава с конструкционной сталью теоретически возможна, даже, если они имеют существенную разность физико-механических свойств, теплопроводность и предел прочности при сжатии, но не большую разницу в температуре, при которой они становятся пластичны, например сталь 45 около 1300°C, а твердосплавная сталь ВК8 от 1400°C до 1490°C.

### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Вилль, В.И Сварка металлов трением / В.И. Вилль. – Москва : изд-во «Машиностроение», 1970. – 176 с.
2. Mash-xxl: электронная энциклопедия по машиностроению XXL: сайт. – Москва, 2015 – URL: <https://mash-xxl.info/static/images/bg.png> (дата обращения: 07.11.2022)
3. Каленчян, К.О. Диссертация на тему «Структура и свойства соединений твердый сплав - сталь при контактной сварке твердосплавного инструмента» / К.О. Каленчян. кандидат технических наук. – Москва : изд-во «Машиностроение», 1983. 105 с.

Григорьев Владимир Владимирович, аспирант, старший преподаватель, заведующий лабораториями факультета машиностроительных и химических технологий, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Grigoriev Vladimir Vladimirovich, Postgraduate student, Senior Lecturer, Head of Laboratories of the Faculty of Mechanical Engineering and Chemical Technologies, Komsomolsk-on-Amur State University

Рубан Ксения Евгеньевна, инженер-технолог, Филиал ПАО «ОАК» – «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина»

Ruban Ksenia Evgenyevna, engineer-technologist, Branch PAO "OAK" - "KnAAZ named after Yu.A. Gagarin"

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ НЕРАЗЪЁМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ**

### **INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PROCESSES ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF PERMANENT ALUMINUM ALLOY JOINTS MADE BY ROBOTIC LASER WELDING**

Аннотация. Целью настоящей работы является исследование возможности создания неразъёмных соединений из алюминиево-магниевого сплава на роботизированном комплексе, оснащённом волоконной лазерной установкой, удовлетворяющих требованиям качества. По результатам исследования выявлены особенности формирования поверхности сварных швов, выполняемых волоконной лазерной сваркой без присадочной проволоки. Проанализировано влияние комбинации расхода защитного газа и режимов лазерной сварки на механические свойства и микроструктуру сварных соединений.

Abstract. The purpose of this work is to investigate the possibility of creating permanent joints made of aluminum-magnesium alloys on a robotic complex equipped with a fiber laser installation that meets quality requirements. According to the results of the study, the features of the formation of the surface of welds performed by fiber laser welding without filler wire are revealed. The influence of the combination of protective gas flow and laser welding modes on the mechanical properties and microstructure of welded joints is analyzed.

Ключевые слова: алюминиево-магниевого сплавы, неразъёмные соединения, лазерная сварка, защита сварного шва, дробно-факторный эксперимент, скорость сварки, механические свойства, микроструктура.

Key words: aluminum-magnesium alloys, permanent joints, laser welding, weld protection, fractional factor experiment, welding speed, mechanical properties, microstructure.

#### **Введение**

На территории ПАО «ОАК» - «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина» производится АрДЭС сварка трубопроводных систем летательных аппаратов из алюминиевых сплавов. На основании данных журналов рентгенографического контроля была составлена статистика частоты выявления дефектов. Установлено, что процент сдачи деталей с первого предъявления не превышает 70 %, остальные 30 % подвергаются исправлению, зачастую неоднократному. Дефекты встречаются в различных конструкциях, при разной толщине основного металла и протяжённости сварных швов. Доминирующими дефектами являются поры (рисунок 1).

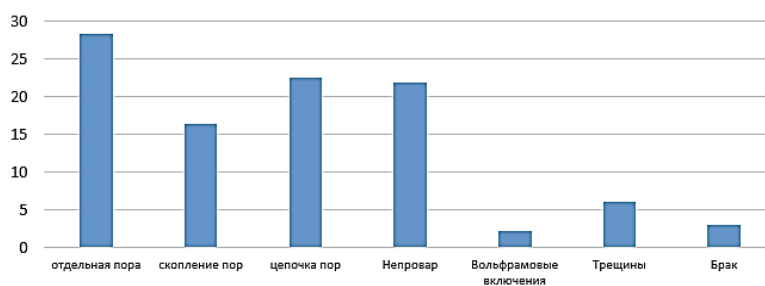


Рисунок 1 - Процентное соотношение дефектов

Установлено, что именно химическая обработка, шабрение, зачистка металлическими щётками (являющиеся причиной образования поверхностных дефектов) способствуют образованию пор. Пористость швов также возрастает из-за того, что сварщику приходится периодически останавливать сварку для вращения детали, а также осуществлять переварку уже существующего шва и организацию замковых участков перекрытия формирующегося шва [1].

В настоящее время в машиностроении растёт тенденция внедрения роботизированных лазерных сварочных систем. На территории ПАО «ОАК» - «КнААЗ» лазерные сварочные технологии не применяются. Решение проблемы повышения качества сварных соединений алюминиевых элементов трубопроводных систем является актуальной задачей современного машиностроительного производства.

#### **Сварочное, роботизированное и вспомогательное оборудование**

Проведение исследования осуществляли на территории КнАГУ в центре промышленной робототехники. В состав ячейки роботизированной сварки входит волоконный лазер ЛС-2 выходной мощностью 2 кВт, оснащённый оптической головкой, и робот-манипулятор KUKA грузоподъёмностью 60 кг, управление которым осуществляется пультом удалённого доступа KUKA SmartPad. Для проведения исследований разработали и изготовили сборочно-сварочную оснастку, обеспечивающую защиту корня шва инертным газом.

#### **Эмпирический подбор входных параметров сварки**

По результатам предварительных экспериментов были определены критические значения параметров сварки [2]. На основании эмпирически подобранных параметров сварки выполнили расчёт математической модели, позволяющей определять зависимость входных параметров сварки на геометрические размеры сварного шва [3]. При проведении визуального контроля сварных швов установили, что значения вогнутости усиления и корня швов не соответствуют требованиям нормативной документации ГОСТ 13919-2. В ходе микроструктурных исследований было зафиксировано наличие пористости сварных швов.

#### **Исследование варьирования скорости сварки**

Проведено исследование влияние повышения скорости сварки на значения вогнутости сварных швов. Для устранения пористости швов разработано устройство соосного поддува [4]. По результатам визуального контроля установлено, что при достижении скорости сварки 35 мм/с и более значения вогнутости швов увеличиваются. На основании результатов проведённых экспериментов сделаны выводы о необходимости подготовки свариваемых кромок фрезерованием и заглаблении фокусировки лазерного излучения на нижней поверхности кромок.

#### **Исследование заглабления фокуса на нижнюю поверхность свариваемых заготовок, подготовленных фрезерованием**

Выполняли лазерную сварку заготовок из сплава АМг2. Заготовки обрабатывали ацетоном и спиртом, под сварку собирали без зазора и раздела кромок. Сварные соединения подвергали визуальному контролю, по результатам которого установили, что значения вогнутости сварных швов соответствуют требованиям ГОСТ 13919-2. Наличие других поверхностных дефектов в ходе контроля выявлено не было.



Все сварные соединения подвергались испытаниям на статическое растяжение и изгиб. Для определения характера разрушения проводили изучение поверхности изломов методом растровой электронной микроскопии.

### Результата испытаний механических свойств

На рисунке 2 представлены диаграммы деформации сварных образцов. Установлено, что диаграммы деформации образцов, зависят от места их вырезки из сварного соединения и величины заглупления фокуса под поверхность заготовок. На стадии равномерной деформации близкой к сосредоточенной, разрушились образцы № 1, 2, 11, 12. Образцы № 3, 4, 13 выдержали все стадии при разрушении. У образца № 13 разрушение произошло по основному металлу под углом 45°.

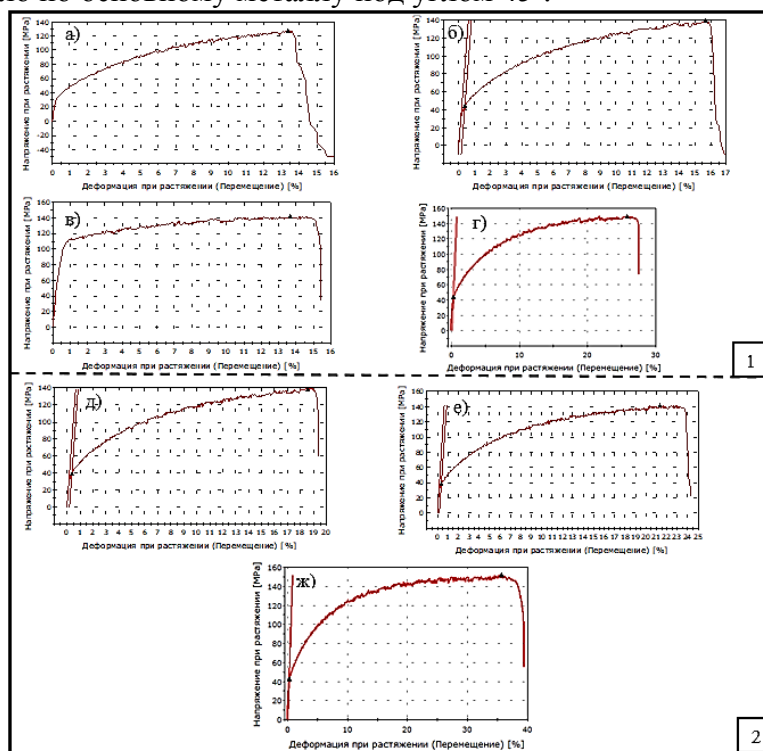


Рисунок 2 - Диаграммы деформаций сварных образцов:  
а – образец №1; б – образец №2; в – образец №3; г – образец №4;  
д – образец №11; е – образец №12; ж – образец №13

По данным испытаний на статический изгиб установлено, что в образце №5 образование первой трещины произошло при угле 145°, в образце №14 – при угле 110° (таблица 1).

Таблица 1 - Изменение механических свойств сварных образцов из сплава АМг2 в зависимости от режимов лазерной сварки

№ образца	Статическое растяжение			Статический изгиб		Место разрушения
	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	Угол загиба, $\alpha^\circ$	Максимум нагрузки, Н	
1	127,7	5,09	6,99	-	-	Металл шва
2	139,5	5,69	7,83	-	-	Металл шва
3	142,5	6,36	11,9	-	-	Линия сплавления
4	149,7	8,91	8,61	-	-	Линия сплавления
5	-	-	-	145	764,7	Металл шва
11	139,2	5,73	7,24	-	-	Линия сплавления
12	141,9	7,98	2,48	-	-	Линия сплавления
13	151,7	10,75	12,28	-	-	По основному металлу
14	-	-	-	110	813,3	Металл шва



Анализируя фрактографии изломов (рисунок 3), пришли к выводу, что в образцах № 1, 2, 3, 11, 12 имеется неоднородный характер поверхности, характеризующийся наличием различных зон и участков. Образец № 4 имеет волокнистый характер излома, поверхность матовая шероховатая, с признаками пластической деформации. Полученные данные позволяют сделать выводы, что все образцы имеют вязких характер разрушения.

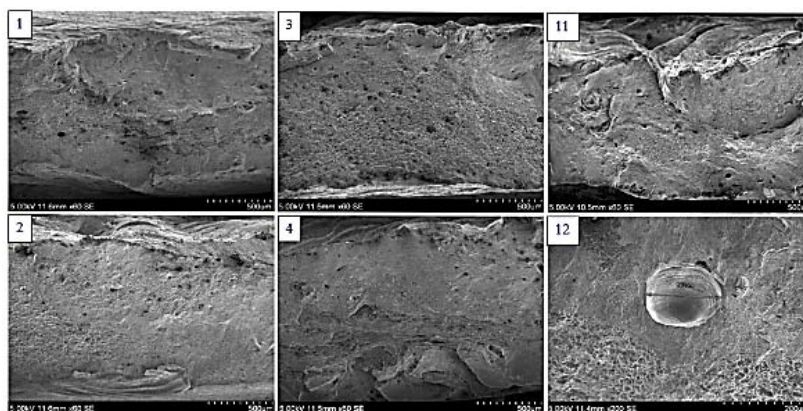


Рисунок 3 - Поверхность изломов после испытании на растяжение

### Результаты микроструктурных исследований

На основании проведённых механических испытаний решено провести исследование микроструктуры и микротвёрдости образца № 13.

По результатам анализа микроструктуры установлено, что структура СШ имеет зонное строение. Центр СШ представляет собой ячеистую структуру, состоящую из разориентированных кристаллитов и ограниченную с обеих сторон зоной перехода к основному металлу. Переходная зона состоит из дендритов первого порядка, вытянутых от линии сплавления в направлении центра шва.

Анализируя график распределения микротвёрдости, пришли к выводу, что значения микротвёрдости в основном металле, зоне термического влияния и металле шва распространяется равномерно. Пиковые значения микротвёрдости фиксируются у линии сплавления и в центре сварного шва.

### Заключение

Приведены обобщённые выводы по результатам исследования:

1. Установлено, что при выполнении лазерной сварки без подачи присадочной проволоки полученные сварные соединения имеют высокие значения механических характеристик, аналогичные выполненным аргонодуговой сваркой.
2. Высокая скорость кристаллизации металла сварочной ванны благоприятно влияет на измельчение структуры шва, а также на уменьшение протяжённости ЗТВ, что приводит к более равномерному распределению микротвёрдости.
3. Обратный поддув сварного шва существенно сокращает пористость, способствует равномерному формированию корня шва, исключая его провисание.

Однако в результате проведённых экспериментов не удалось добиться формирования усиления сварных швов. Для устранения вогнутости швов в последующих экспериментах предложено изучить влияние выполнения сварки с поперечными колебаниями луча (или сварочной оснастки), сварки заготовок с отбортовкой кромок/-ки и сварки с наклоном луча.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бахматов, П. В. Исследование причин и путей устранения порообразования в сварных соединениях элементов алюминиевого трубопровода / П. В. Бахматов, С. П. Мазур, В. И. Муравьев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. - 2015. - № I -3 (23). - С. 54 - 64.

2. Рубан К.Е., Бахматов П.В. Исследование процесса роботизированной лазерной сварки алюминиево-магниевых сплавов // *Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XXI Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Под редакцией Е.В. Протопопова. 2019. С. 358-364.*

3. Рубан К.Е., Бахматов П.В. Расчёт математической модели, определяющей зависимость входных параметров лазерной сварки на формирование сварных швов сплава АМг5 // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 3 (51). С. 58-61.*

4. Рубан К.Е., Бабко А.П., Бахматов П.В. Разработка устройства защиты зоны лазерной сварки металлов от внешней среды // *Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. Материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в 3 ч. Комсомольск-на-Амуре, 2020. С. 116-119.*

УДК 539.231

Дудник Данил, студент магистратуры Московского Государственного Технического Университета им. Н. Э. Баумана, кафедра МТ-11

Dudnik Danil, Master's degree student of Bauman Moscow State Technical University, MT-11 department

Доломанжи Александр Антонович, аспирант Московского Государственного Технического Университета им. Н. Э. Баумана, кафедра МТ-11

Dolomanzhi Alexander Antonovich, Postgraduate student of the Bauman Moscow State Technical University, Department of MT-11

Каракулов Руслан Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-11 Московского Государственного Технического Университета им. Н. Э. Баумана

Karakulov Ruslan Alexandrovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the MT-11 Department of the Bauman Moscow State Technical University

## **ФОРМИРОВАНИЕ ПРОВОДЯЩЕГО СЛОЯ В TSV-СТРУКТУРАХ МЕТОДОМ HIPIMS**

### **FORMATION OF A CONDUCTIVE LAYER IN TSV STRUCTURES BY HIPIMS METHOD**

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментов по металлизации TSV-отверстий методом HIPIMS. Проведена оценка неравномерности с помощью измерения толщины покрытия в пяти точках. Приведена графическая интерпретация результатов измерений, которые показали, что метод HIPIMS позволяет провести качественную металлизацию TSV-отверстий благодаря физическим особенностям процесса, корректно подобраным параметрам и высокотехнологическому оборудованию.

Abstract. The article presents the results of experiments on the metallization of TSV holes by the HIPIMS method. The unevenness was assessed by measuring the thickness of the coating at five points. A graphical interpretation of the measurement results is given, which showed that the HIPIMS method allows for high-quality metallization of TSV holes due to the physical features of the process, correctly selected parameters and high-tech equipment.

Ключевые слова: магнетронное распыление, HIPIMS, сквозные переходные отверстия, аспектное отношение, слой проводника, эффект перераспыления.

Key words: magnetron sputtering, HIPIMS, through silicon via, aspect ratio, conductor layer, re-atomizing effect.

## Введение

Технология Through Silicon Via (TSV) позволяет осуществлять межсоединения на уровне смонтированных в 3D сборку пластин или кристаллов. Метод металлизации отверстий TSV выбирается в зависимости от типа проводника. Так, например, для меди рекомендуется способ физического осаждения паров металлов (PVD), для платины – метод атомно-слоевого нанесения (ALD) [1].

На текущий момент наиболее производительными способами физического нанесения покрытий в вакууме является магнетронное распыление при постоянном токе (DC MS) и магнетронное распыление импульсами высокой мощности (HIPIMS). Последнему, в свою очередь, характерна концентрация плазмы до  $10^{13}$  см<sup>-3</sup> и степень ионизации распыленного вещества до 90% [2].

Одним из важных параметров металлизации является неравномерность толщины покрытия. Она показывает, на сколько процентов средняя толщина структуры меньше разницы максимального и минимального значения по всему отверстию. Показатель неравномерности является критерием качественной оценки структуры, поскольку в дальнейшем напрямую влияет на электропроводность изделия [3].

## Основная часть

Эксперименты по металлизации отверстий проводились на установке Магна ТМ 200-04 (рисунок 1) ведущего производителя вакуумного оборудования в России АО «НИИТМ». Установка предназначена для нанесения магнетронным распылением различных функциональных слоев [4].

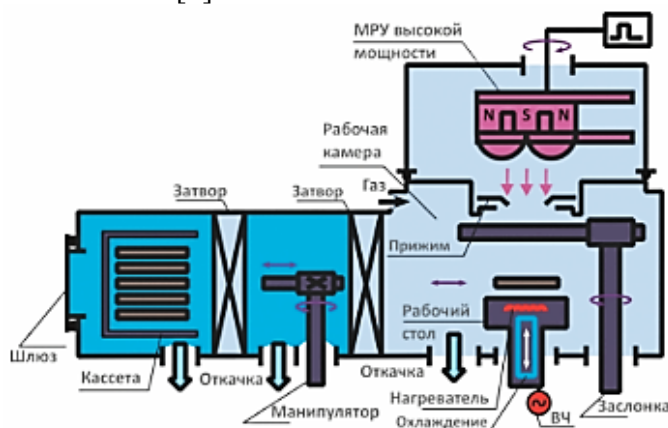


Рисунок 1 – Схема установки Магна ТМ 200-04

В ходе исследования был отработан процесс формирования слоя меди толщиной 1 мкм на пластины с TSV-отверстиями диаметром 10 мкм и глубиной 100 мкм. Цель экспериментов – установить скорость осаждения меди и оценить неравномерность толщины покрытий, получаемых методом HIPIMS. Технологические параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технологические параметры экспериментов

Параметр	1	2	3	4	5	6
Предельное давление, Па	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$8,1 \cdot 10^{-5}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$
Рабочее давление, Па	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Импульсный ток, А	500	500	500	700	700	700
Длительность импульса, мкс	150	150	150	150	150	150
Длительность паузы, мкс	2300	2300	2300	2300	2300	2300
Мощность ВЧ, Вт	200	200	DC	DC	DC	DC
Смещение, В	40	48	101	102	102	102
Температура подложки, °С	150	12	15	9	28	28
Время нанесения, мин:сек	2:40	2:40	2:40	1:40	1:20	2:40

Для решения поставленных задач использовался растровый электронный микроскоп с фокусированным ионным пучком FEI Quanta 3D FEG. Более подробное описание устройства представлено на официальном сайте производителя [5].

На рисунках 2, 3, 4 изображены фрагменты TSV-отверстий, покрытых слоем меди методом HIPIMS.

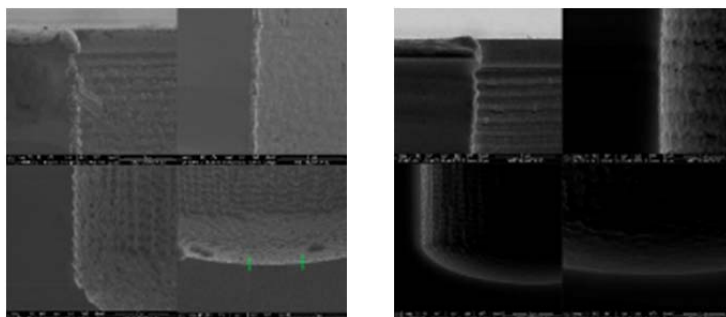


Рисунок 2 – Структура, полученная в результате экспериментов №1, №2

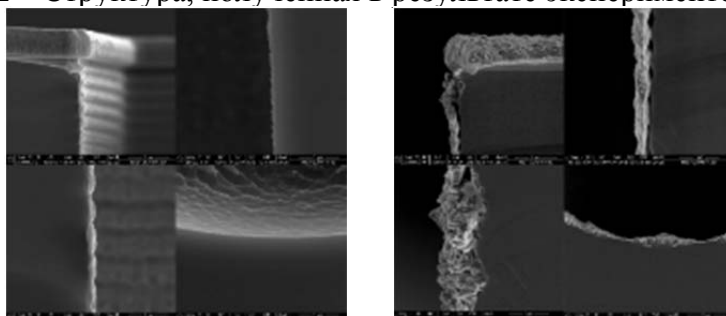


Рисунок 3 – Структура, полученная в результате экспериментов №3, №4

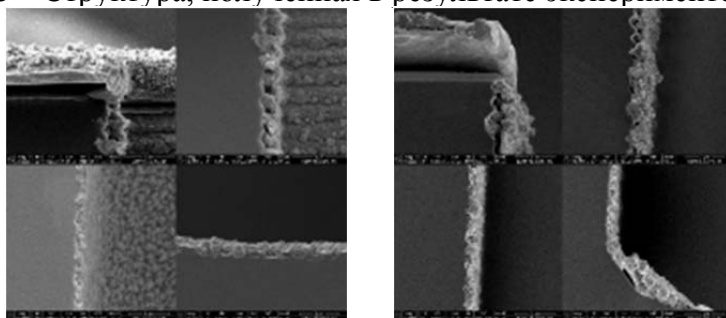
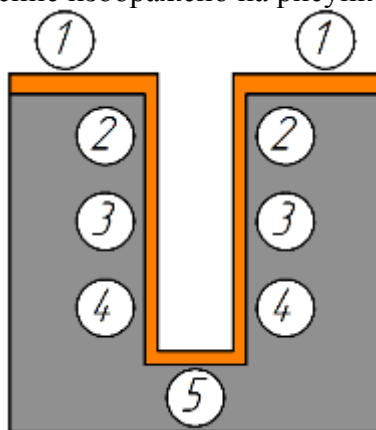


Рисунок 4 – Структура, полученная в результате экспериментов №5, №6

Для оценки неравномерности слоя меди были выбраны 5 уровней (точек) профиля отверстия. Их расположение изображено на рисунке 5.



1 - пластина до отверстия; 2 - верхняя часть боковой стенки;  
3 - средняя часть боковой стенки; 4 - нижняя часть боковой стенки; 5 - дно отверстия

Рисунок 5 – Точки профиля отверстия

Графическая интерпретация показателей измерений экспериментов изображена на рисунках 6, 7, 8.

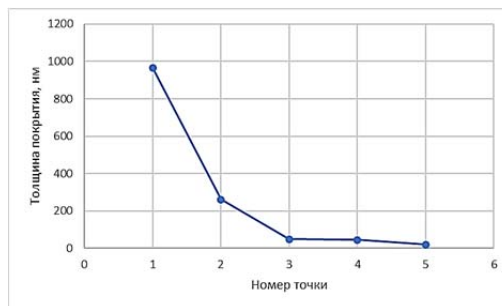
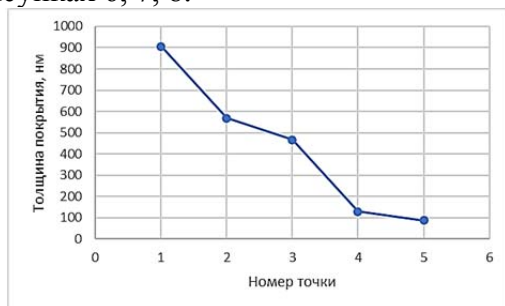


Рисунок 6 – Графическая интерпретация показателей измерений экспериментов № 1, № 2

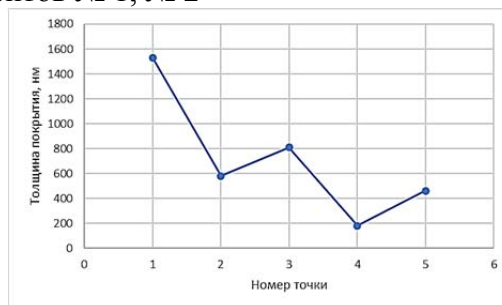
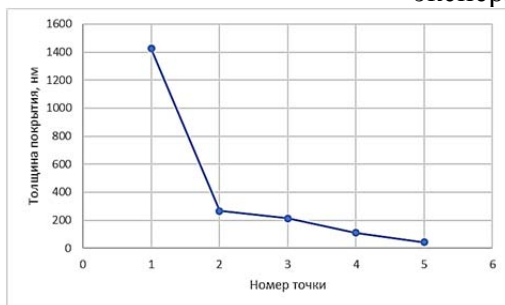


Рисунок 7 – Графическая интерпретация показателей измерений экспериментов №3, №4

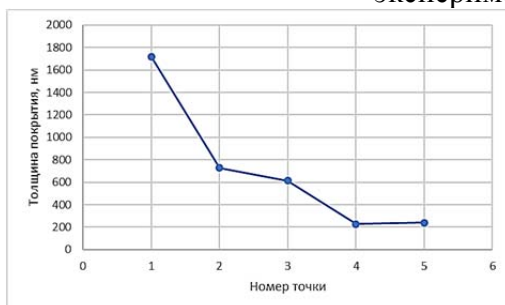


Рисунок 8 – Графическая интерпретация показателей измерений экспериментов №5, №6

Неравномерность покрытия рассчитывалась по следующей формуле:

$$UN = \frac{1}{2} \cdot \frac{range}{mean},$$

где  $range = x_{max} - x_{min}$ ,

где  $x_{max}$  – максимальная толщина плёнки в эксперименте;

$x_{min}$  – минимальная толщина плёнки в эксперименте;

$$mean = \frac{\sum_{i=1}^n x}{n}$$

Были получены показатели неравномерности, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Показатели неравномерности

Эксперимент	Неравномерность	Эксперимент	Неравномерность
1	94,78%	4	94,63%
2	176,49%	5	105,56%
3	167,12%	6	109,47%

По результатам измерений толщины покрытия был замечен скачок в нижней точке отверстия. Это объясняется тем, что данная точка находится в плоскости, перпендикулярной направлению потока атомов и ионов, что обеспечивает большую толщину покрытия, чем на соседних уровнях.

Наличие ВЧ-смещения влияет на энергию ионов, поскольку подача отрицательного смещения придаёт им дополнительную кинетическую энергию. Её увеличение или уменьшение позволяет изменять коэффициент распыления, от которого зависят параметры структуры. Нагрев подложки увеличивает подвижность атомов, адсорбированных на поверхности, т.е. понижается пороговое значение энергии частиц, при которой возникает эффект перераспыления. Сочетание параметров технологического процесса должно быть таким, чтобы скорость перераспыления материала в нижней точке не превышала скорость его осаждения.

В эксперименте №1 использовалось высокочастотное смещение, а температура была максимальной в серии. Эти факторы повлияли на увеличение энергии ионов, в следствии чего были достигнуты лучшие показатели плотности (см. рисунки 2-4) и равномерности (94,78%) покрытия.

В случае эксперимента №4, где показатель неравномерности (94,63%) ненамного меньше образца №1, постоянное смещение помогает улучшить ситуацию, однако полученные структуры обладают низкой плотностью покрытия, что в последствии повлияет на электропроводность слоя.

По результатам экспериментов №5, №6 видно, что изменение температуры и времени нанесения увеличивают показатель неравномерности на 10,93% и 14,84% по сравнению с экспериментом №4.

Эксперименты №2, №3 признаются неудачными, в связи с наибольшим отклонением от других результатов.

Таким образом, следует вывод о том, что образец №1 является ориентиром для будущих экспериментов на реальных производственных пластинах.

### **Заключение**

Метод HIPIMS позволяет провести качественную металлизацию TSV-отверстия на установке Магна ТМ 200-04 при режимах, приведённых в таблице 3.

Таблица 3 – Технологические режимы эксперимента

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Предельное давление, Па	$3,1 \cdot 10^{-5}$	Мощность ВЧ, Вт	200
Рабочее давление, Па	0,4	Смещение, В	40
Импульсный ток, А	500	Температура подложки, °С	150
Длительность импульса, мкс	150	Время нанесения, мин:сек	2:40
Длительность паузы, мкс	2300		

В сравнении с зарубежными источниками [6,7], полученное покрытие обладает более низкой неравномерностью по толщине. Удалось избежать скачка значения толщины в нижней точке, который является характерным для магнетронного распыления. Дефект был устранён благодаря пониженной скорости металлизации и тому, что из-за повышенной ионной компоненты та часть покрытия, которая осаждается на дно отверстия, частично распыляется и переосаждается на стенки, уменьшая толщину плёнки в нижней точке.

**Благодарности.** За возможность проведения экспериментов и исследований выражается благодарность АО «НИИТМ».

### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Burkett S. L. et al. Tutorial on forming through-silicon vias //Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 2020. – Т. 38. – №. 3. – С. 031202.
2. Источники питания для магнетронного распыления импульсами высокой мощности [Электронный ресурс] / <http://apelvac.com/catalog/groups/43>. Дата доступа: 18.10.2022
3. Zhang Y. et al. Effect of Seed Layer Thickness Distribution on 3D Integrated Through-Silicon-Vias (TSVs) Filling Model //ECS Electrochemistry Letters. – 2015. – Т. 4. – №. 6. – С. D18.

4. Вакуумная установка нанесения пленок методом магнетронного распыления со шлюзовой загрузкой из кассеты в кассету МАГНА ТМ 200-04К [Электронный ресурс] / <http://niitm.ru/магна-тм-200-04к/>. Дата доступа: 18.10.2022

5. РЭМ с фокусированным ионным пучком. [Электронный ресурс] / <https://miet.ru/structure/s/1541/e/68016/311>. Дата доступа: 18.10.2022

6. Weichart J. et al. PVD processes in high aspect ratio features by HIPIMS //2009 Society of Vacuum Coaters 505/856–7188 201, 52nd Annual Technical Conference Proceedings. – 2009.

7. Wei T. et al. Optimization and evaluation of sputtering barrier/seed layer in through silicon via for 3-D integration //Tsinghua Science and Technology. – 2014. – Т. 19. – №. 2. – С. 150-160.

УДК 621.01

Карпенко Владимир Анатольевич, инженер, ФПК «АПЗ Вымпел» имени П.Ф. Финогенова  
Karpenko Vladimir Anatolievich, FSE «АСР Vympel» named after P.V. Finogenov  
Щелкунов Евгений Борисович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Shchelkunov Evgenii Borisovich, candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amur State University  
Весельева Екатерина Сергеевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Veseleva Ekaterina Sergeevna, student of Komsomolsk-na-Amure State University

### **3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ТРОСОВЫМ ПРИВОДОМ В CAD-СИСТЕМАХ**

#### **3D MODELING OF A PARALLEL MECHANISM CABLE DRIVE STRUCTURES IN CAD SYSTEMS**

Аннотация. Представлена последовательность создания 3D-модели двухсекционного механизма параллельной структуры с тросовым приводом, имеющего шесть степеней свободы. Для моделирования использованы программные продукты T-Flex CAD 17 и и КОМПАС-3D v19.

Полученная 3D-модель планируется использовать для изготовления реально существующего изделия.

Abstract. The sequence of creating a 3D model of a two-section mechanism of a parallel structure with a cable drive, which has six degrees of freedom, is presented. The software products T-Flex CAD 17 and KOMPAS-3D v19 were used for modeling.

The resulting 3D model is planned to be used to manufacture a real-life product.

Ключевые слова: 3D-модель, механизм параллельной структуры, степень свободы, тросовый привод.

Key words: 3D model, parallel structure mechanism, degree of freedom, cable drive.

#### **Введение**

Механизмы параллельной структуры (МПС) являются отдельным классом кинематических устройств для передачи и преобразования движения в машинах. Они применяются в качестве привода подачи в металло- и деревообрабатывающих станках, подъемно-транспортных машинах, промышленных роботах и др. Отдельной ветвью механизмов данного класса являются МПС с гибкими связями с управляемой деформацией.



Данного типа механизмы применяются преимущественно в различных роботизированных устройствах для работы в условиях неопределенности. Благодаря высокой гибкости и приспособляемости такие роботы могут проникать в узкие проходы и действовать в узком пространстве [1].

В работе представлен процесс создания 3D-модели МПС с гибкой связью.

#### Основная часть

Для проектирования были выбраны отечественные программные продукты трехмерного проектирования T-Flex CAD 17 и КОМПАС-3D v19. Данные программные продукты обладают рядом преимуществ: сравнительно низкая стоимость; оснащённость сквозной параметризацией, упрощающей исследование; простота в освоении, благодаря интуитивно понятному интерфейсу с поддержкой русского языка и наличием справочной системы. К числу возможностей программ также относятся 3D-моделирование деталей и сборок [2-6].

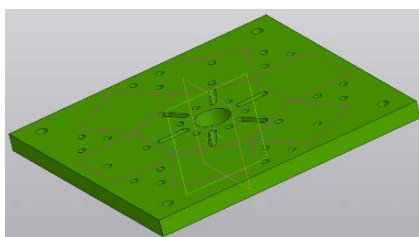
Проектирование осуществлялось на основе ранее разработанной кинематической схемы манипулятора, выполненного в виде двухсекционного механизма параллельной структуры с тросовым приводом, имеющего шесть степеней свободы [7].

Создание 3D-модели происходило в следующей последовательности [8, 9,10]:

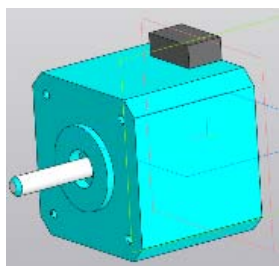
- 1 создание моделей элементов, составляющих силовую установку;
- 2 сборка элементов силовой установки в общую модель под сборки 1;
- 3 создание моделей деталей приводного механизма параллельной структуры;
- 4 сборка деталей приводного механизма в общую модель под сборки 2;
- 5 объединение подборок 1 и 2

Проектируемый МПС состоит из силовой установки и приводного механизма [7].

а)



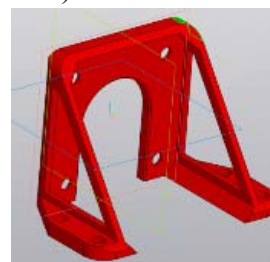
б)



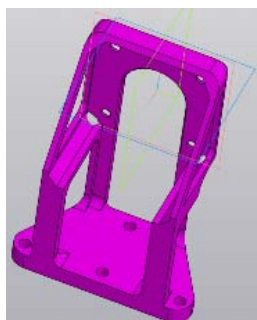
в)



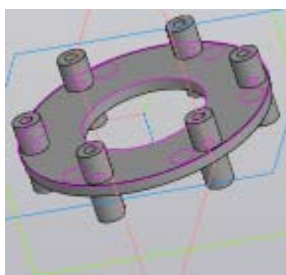
г)



д)



е)



ж)



з)

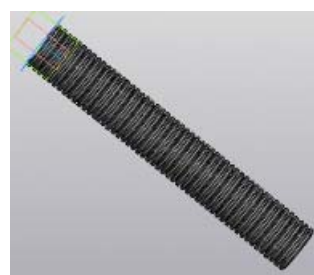


Рисунок 1 – Элементы проектируемого МПС: а – основание; б – двигатель; в - шкив; г, д – кронштейны для ; е – диск; ж – пружина; з - кожух



В качестве основных элементов МПС использованы в основном унифицированные серийно выпускаемые и оригинальные элементы – основание (рисунок 1, а); электродвигатели (рисунок 1, б) со шкивами (рисунок 1, в), кронштейны (рисунок 1, г, д), диски (рисунок 1, е), пружины (рисунок 1, ж), кожух (рисунок 1, з); тросы, крепежные винты.

3D-модель в сборе силовой установки, показана на рисунке 2. На основании смонтированы кронштейны для установки электродвигателей первой и второй секций приводного механизма. На валах электродвигателей с закреплены приводные шкивы (см. рисунок 1).

Приводной механизм состоит из двух секций I и II, имеющих по три степени свободы каждая. 3D-модель приводного механизма показана на рисунке 3. Сборка секций приводного механизма включают в себя диски (см. рисунок 1, д), пружины (рисунок 2.12), приводные тросы, проходящие через отверстия в дисках.

Окончательным этапом создания 3D-модели МПС являлось объединение подборок 1 и 2 в единое целое. На рисунке 4 показана 3D-модель разработанного двухсекционного механизма параллельной структуры с тросовым приводом. Движениями каждой из секций МПС управляют по три электродвигателя посредством приводных тросов, связывающих приводные шкивы с конечными звеньями (дисками) каждой секции. Пружины необходимы для обеспечения плавности и равномерности передвижения выходного звена. Для защиты элементов МПС от загрязнения используется кожух (см. рисунок 1, з).

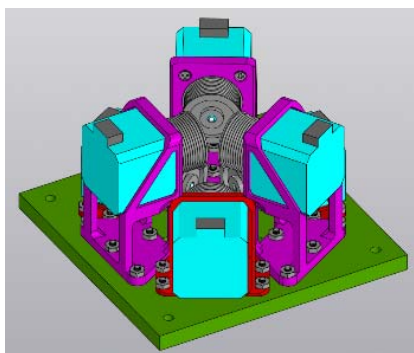


Рисунок 2 – Силовая установка (подборка 1)

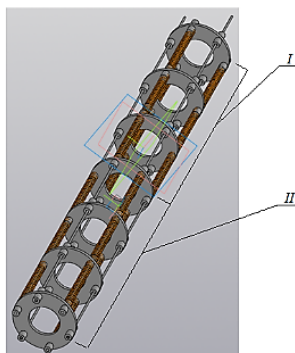


Рисунок 3 – Приводной механизм (подборка 2)

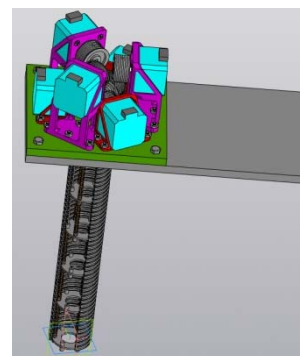


Рисунок 4 – Сборка манипулятора

### Заключение

В работе представлена последовательность создания 3D-модели двухсекционного механизма параллельной структуры с тросовым приводом, имеющего шесть степеней свободы. Для моделирования использованы программные продукты T-Flex CAD 17 и КОМПАС-3D v19.

Полученная 3D-модель планируется использовать для изготовления реально существующего изделия.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Механизмы параллельной структуры с гибкими связями / Е. Б. Щелкунов, М. Е. Щелкунова, С. А. Рябов, А. С. Глинка // Вестник машиностроения. – 2021. – № 4. – С. 33-38. – DOI 10.36652/0042-4633-2021-4-33-38. – EDN VEYABR.

2. Кононенко, Р. С. Системы автоматизированного проектирования для машиностроения / Р. С. Кононенко, Е. Б. Щелкунов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля

2022 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 35-37. – EDN WESEMR..

3. Пронин А.И. Исследование и разработка конструкции сборочного узла кузова автомобиля с использованием CAD/CAE систем/А.И. Пронин, В.В. Мыльников, Д.А. Валько, О.Б. Кондрашкин//Вестник машиностроения. – 2020 № 11 – С. 15-20.

4. Пронин А.И. Разработка и исследование конструкции детали с использованием CAD/CAE систем/ А.И. Пронин, В.В. Мыльников, Д.А. Валько, О.Б. Кондрашкин// Ремонт. Восстановление. Модернизация. - 2018 № 6 – С. 13-16.

5. Пронин А.И. Исследование и разработка конструкции детали кронштейн с использованием CAD/CAE систем /А.И. Пронин, Е.Б. Щелкунов, А.С. Султангареева, К.А. Латышев, А.А. Иваненко // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. - 2017 № I-1(29). - С. 27-32.

6. Моделирование механизма подачи совмещенного электропривода для станков с числовым программным управлением / С. Н. Иванов, О. В. Приходченко, А. А. Просолович, Д. В. Плетников // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2018. – Т. 1. – № 1(33). – С. 80-90. – EDN YVMMCE.

7. Карпенко, В. А. Тросовый робот для манипулирования хрупкими и нежесткими объектами / В. А. Карпенко, Е. Б. Щелкунов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 4-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 12–16 апреля 2021 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. – С. 50-52. – EDN DZEEWO.

8. Просолович, А. А. 3D- сканирование,3D- моделирование, прототипирование и макетирование / А. А. Просолович // Перспективные средства организации инновационной проектной деятельности : сборник практических рекомендаций для педагогов / Министерство образования и науки Хабаровского края; Управление образования администрации города Комсомольска-на-Амуре; Муниципальное общеобразовательное учреждение "Инженерная школа города Комсомольска-на-Амуре". – Комсомольск-на-Амуре : Муниципальное общеобразовательное учреждение "Инженерная школа города Комсомольска-на-Амуре", 2020. – С. 35-67. – EDN ZTTPFG.

9. Карпенко, В. А. Разработка сверлильно-фрезерного станка гексапода с возможностью реконфигурирования в t-Flex CAD / В. А. Карпенко, Е. Б. Щелкунов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 февраля 2022 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 369-372. – EDN YLCJTM.

10. Карпенко, В. А. 3D-моделирование механизмов параллельной структуры в t-Flex CAD / В. А. Карпенко, Е. Б. Щелкунов // Актуальные проблемы информационно-телекоммуникационных технологий и математического моделирования в современной науке и промышленности : Материалы I Международной научно-практической конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 20–25 марта 2021 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. – С. 69-72. – EDN RRPXNY.

Карпенко Владимир Анатольевич, соискатель, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Karpenko Vladimir Anatolievich, competitor, Komsomolsk-na-Amur State University

Щелкунов Евгений Борисович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Shchelkunov Evgenii Borisovich, candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amur State University

## **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ НА ОСНОВЕ МЕХАНИЗМА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ**

### **MANIPULATOR CONTROL SYSTEM BASED ON PARALLEL STRUCTURE MECHANISM**

Аннотация. В настоящее время в промышленности все больше внедряется новое оборудование, в основу которого положен принцип параллельной кинематики [1]. Применение механизмов параллельной структуры обеспечивает технологической машине высокую маневренность при сравнительной простоте конструкции и не высокой себестоимости. В работе представлена система управления тросовым манипулятором на основе механизма параллельной структуры, построенная на базе Arduino UNO. Управление происходит за счет подачи команд на шесть шаговых электродвигателей, согласованное движение которых обеспечивает манипулятору шесть степеней свободы.

Abstract. At present, the industry is increasingly introducing new equipment based on the principle of parallel kinematics [1]. The use of mechanisms of a parallel structure provides the technological machine with high maneuverability with a comparative simplicity of design and low cost. The paper presents a cable manipulator control system based on the parallel structure mechanism, built on the basis of Arduino UNO. Control occurs by sending commands to six stepper motors, the coordinated movement of which provides the manipulator with six degrees of freedom.

Ключевые слова: манипулятор, принцип параллельной кинематики, Arduino UNO, управление, управляющий сигнал.

Key words: manipulator, principle of parallel kinematics, Arduino UNO, control, control signal.

#### **Введение**

С развитием современных технологий в промышленности все больше внедряется новое оборудование, в основу которого положен принцип параллельной кинематики [1]. Применение механизмов параллельной структуры обеспечивает технологической машине высокую маневренность при сравнительной простоте конструкции и не высокой себестоимости.

В данной работе представлена система управления двухсекционным манипулятором с тросовым приводом, основанным на принципе параллельной кинематики.

#### **Основная часть**

На рисунке 1 представлена 3D-модель манипулятора.

Манипулятор состоит из силовой установки, включающей шесть лебедок на базе шаговых электродвигателей (ШД) 1...6 модели Nema 17HS440IS (по три на каждую из секций) и двухсекционного приводного механизма параллельной структуры. Механизм параллельной структуры состоит из основания, промежуточных проставок 7-10 и подвижной платформы 11. Движения подвижной платформы происходят посредством натяжения соединяющих основание, промежуточные проставки и подвижную платформу тросов.

Движения секций 1 и 2 могут выполняться как независимо, так и согласованно. Общее количество степеней свободы манипулятора - шесть [2].

Основные технические параметры шагового электродвигателя модели Nema 17HS440IS представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Техническая характеристика шагового электродвигателя модели Nema 17HS440IS

Параметр	Значение
Номинальное напряжение, В	12-24
Номинальный ток, А	1.1
Максимальный ток, А	1.5
Число фаз	2
Угловой шаг, °	$1.8 \pm 5\%$ (200 шагов на оборот)
Размер, мм	42×42×64
Масса, кг	0,280

В качестве системы управления манипулятором использована платформа Arduino, представляющая собой управляющую плату с процессором и модулем памяти.

Выбрана плата Arduino UNO с микроконтроллером ATmega328P. Плата имеет 14 цифровых входов-выходов, 6 аналоговых входов, 6 выходов широтно-модульной модуляции. Объем оперативной памяти 2 кБ.

На рисунке 2 изображена структурная схема подключения двигателей ШД1...ШД6, обеспечивающих подвижной платформе манипулятора шесть степеней свободы.

Подключение электродвигателей происходит через внешние драйверы двигателей модели A4988, обеспечивающие управление шагом и частотой вращения двигателей. Драйвер модели A4988 может работать с выходным напряжением до 35 В с током до 2 А. С помощью драйвера обеспечивается возможность получения пяти режимов микрошага вращения двигателя:

- полный шаг;
- полшага;
- четверть шага;
- одна восьмая шага;
- одна шестнадцатая шага.

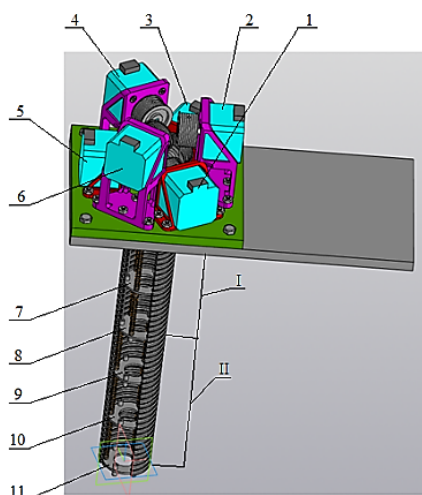


Рисунок 1 – 3D-модель манипулятора

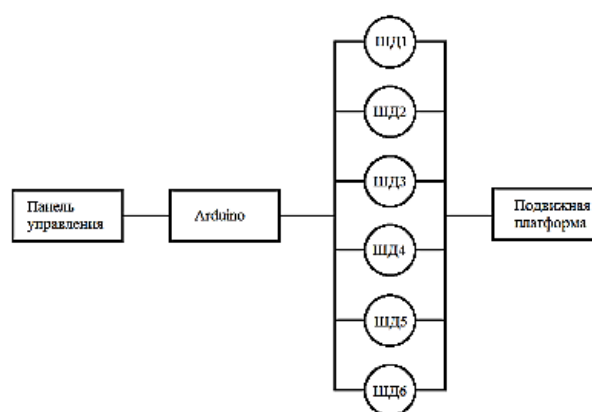


Рисунок 2 – Функциональная схема подключения

На рисунке 3 показана схема подключения шагового электродвигателя к плате Arduino Uno. Схема включает в себя плату Arduino Uno 1, панель управления 2, блок питания 3, драйвер 4 и электродвигатель 5. С платы Arduino Uno через драйвер 4 пода-

ется управляющий сигнал на обмотки шагового электродвигателя 5, заставляя поворачиваться ротор на заданный угол по часовой стрелке, либо против. Питание на драйвер 3 подается от блока питания 3 напряжением 12 вольт.

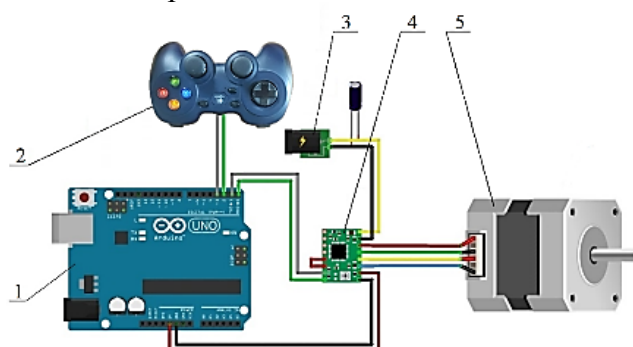


Рисунок 3 - Схема подключения шагового электродвигателя к плате Arduino:  
1 – плата Arduino; 2 - панель ручного управления; 3 – блок питания; 4 – драйвер;  
5 – шаговый электродвигатель

Программирование происходит на языке Arduino в оригинальной среде программирования [3]. Формирование управляющих команд в ручном режиме осуществляется с помощью джойстика.

В результате проектирования манипулятора была разработана программа передачи команд для траектории движения подвижной части манипулятора, обобщенная схема которой приведена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Схема алгоритма

### Заключение

Представлена система управления тросовым манипулятором на основе механизма параллельной структуры, построенная на базе Arduino UNO, включающая панель ручного управления и драйверы двигателей модели A4988. Управление происходит за счет подачи команд на шесть шаговых электродвигателей, согласованное движение которых обеспечивает манипулятору шесть степеней свободы.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Механизмы параллельной структуры с гибкими связями / Е. Б. Щелкунов, М. Е. Щелкунова, С. А. Рябов, А. С. Глинка // Вестник машиностроения. – 2021. – № 4. – С. 33-38. – DOI 10.36652/0042-4633-2021-4-33-38. – EDN VEYABR.

2. Карпенко В. А., Щелкунов Е. Б. Тросовый робот для манипулирования хрупкими и нежесткими объектами/ Карпенко В. А., Щелкунов Е. Б., Молодежь и наука: Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований Часть 1. Материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 г. – 2021. – С. 50 – 52.

3. Программирование Arduino [Электронный ресурс] URL: <http://arduino.ua/ru/prog/#Structure>–Загл. с экрана – Яз. рус. (Дата обращения: 16.10.2022).

УДК 621.791.03

Комарова Ксения Константиновна, магистр, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Komarova Ksenia Konstantinovna, master of Komsomolsk-na-Amure State University

Кравченко Александр Сергеевич аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Kravchenko Alexander Sergeevich postgraduate student of Komsomolsk-na-Amure State University

Бахматов Павел Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология сварочного и металлургического производства им. В.И. Муравьева», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Bakhmatov Pavel Vyacheslavovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Technology of Welding and Metallurgical Production named after V.I. Muravyev", Komsomolsk-na-Amure State University

## **АВТОМАТИЧЕСКАЯ ИМПУЛЬСНАЯ АРГОНОДУГОВАЯ СВАРКА ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ**

### **AUTOMATIC PULSED ARGON ARC WELDING OF THIN-WALLED STAINLESS STEEL PIPES**

Аннотация. Целью работы является апробация роботизированной сварочно-наплавочной установки разработанной на кафедре «Технологии сварочного и металлургического производства имени В.И. Муравьева», ФГБОУ ВО КнАГУ, реализующей аргонодуговую сварку неплавящимся вольфрамовым электродом, как в импульсном, так и в традиционном режиме, с установлением режимов TIG сварки тонкостенных труб из стали 12X18H10T

Abstract. The purpose of the work is to test a robotic welding and surfacing installation developed at the Department of "Technologies of Welding and Metallurgical Production named after V.I. Muravyev", KnASU, which implements argon arc welding with a non-melting tungsten electrode, both in pulsed and in traditional mode, with the establishment of TIG welding modes for thin-walled pipes made of 12X18H10T steel

Ключевые слова: роботизированная сварка, трубопровод, импульсный режим, экспериментальные исследования, параметры шва.

Key words: robotic welding, pipeline, pulse mode, experimental studies, seam parameters.

## Введение

Трубопроводные системы относятся к конструкциям ответственного назначения, от надёжности которых зависит безотказность и ресурс изделия. Вследствие этого к деталям трубопроводов предъявляются жёсткие требования по точности изготовления. Трубопроводы работают в условиях сложного нагружения, они испытывают действие высокого давления, пульсирующей нагрузки и гидравлических ударов. Поэтому процессы изготовления элементов трубопровода должны обеспечивать высокие и стабильные механические свойства материала трубы, высокую чистоту внутренней и внешней поверхностей, минимальное искажение формы сечения трубопровода. [1].

Применение автоматической аргонодуговой сварки неплавящимся электродом без присадки, взамен ручной с присадкой, позволяет значительно повысить стойкость трубопроводов против циклических нагрузок и увеличить срок их службы [2].

Традиционным способом сборки при изготовлении трубопроводных систем летательных аппаратов (ТПС ЛА) является аргонодуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом без присадки и с присадкой. Категория сварных соединений 1 и 2. Все требования к процедуре сборки ТПС ЛА сваркой регламентируются ПИ 1.4.748 [3].

## Методология исследований

Для сварки была применена роботизированная установка дуговой TIG сварки/наплавки тел вращения, разработанная на кафедре «Технология сварочного и металлургического производства имени В.И. Муравьева» ФГБОУ ВО «КнАГУ», с управлением траекторией сварочной горелки, подачей сварочной проволоки (в том числе и импульсной) и варьированием режимов сварки с использованием программы Mach3 через G-коды [4].

Для сварки использовалась трубная заготовка Ø50 x 1 мм из стали 12X18H10T. Сборка проводилась по требованиям ПИ 1.4.748 «Дуговая сварка трубопроводов из нержавеющей сталей в среде инертных газов: Производственная инструкция» применительно к стыковому сварному соединению С00000 без разделки кромок.

Автоматическая импульсная сварка осуществлялась в один проход, без подачи присадочного материала, с поддувом аргона. Вольфрамовый электрод диаметром 2 мм располагался к изделию под углом 90°, положение горелки – нижнее. Режимы сварки представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы сварки

Сектор	Ток, А	Протяженность, мм	Время паузы, с	Скорость перемещения, мм/мин	Расчетные параметры	
					Средняя скорость сварки, мм/мин	Среднее значение тока, А
1	35/15	7,9	1,3	250	64,760	29,373
2		31,7	1,2		68,328	29,038
3		31,7	1,1		72,653	28,661
4		58,6	1,0		77,558	28,232

Внешний вид полученного неразъемного соединения представлен на рисунке 1 из которого видно, что ширина шва, чешуйчатость и высота усиления на каждом секторе шва одинакова. Ширина шва соответствует требованиям ПИ 1.4.748.



Рисунок 1 – Внешний вид полученного сварного соединения



### Результаты испытаний

Исследованиями микроструктуры с использованием микроскопа Nikon MA200, установлено, что полученные образцы не имеют внутренних и наружных дефектов. У всех образцов незначительная вогнутость лицевого валика и выпуклость корневого, что свидетельствует о провисании сварочной ванны (рисунок 2,3 и 4). Структура сварного соединения характеризуется аустенитным строением зерен.



Рисунок 2 – Образец №2



Рисунок 3 – Образец №3

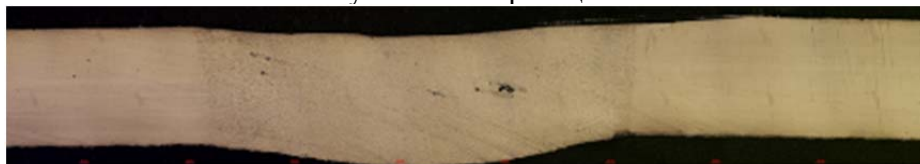


Рисунок 4 – Образец №4

Испытания на статическое растяжение выполняли на универсальной испытательной машине INSTRON 3382. В результате исследования на статическое растяжение разрыв всех образцов произошел по околошовной зоне (таблица 2). Кроме того, в абсолютно всех образцах прослеживается сокращение значения величины относительного удлинения в 2 раза в сравнении с основным металлом. Прочность образца 1 составляет 88% от прочности основного металла, образца 2 - 87%, 3 - 88%, 4 - 78% соответственно.

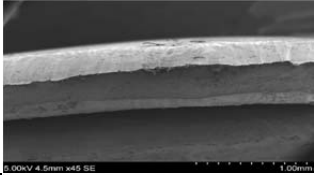
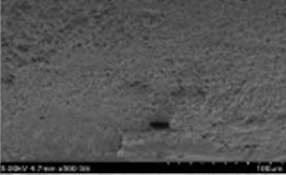
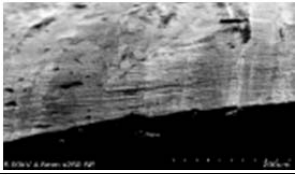
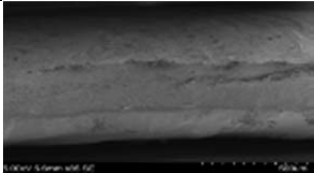
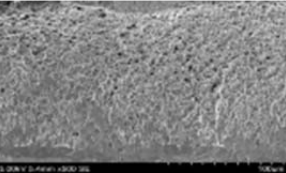
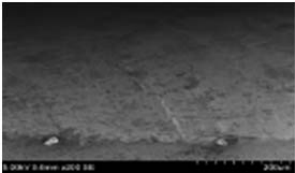
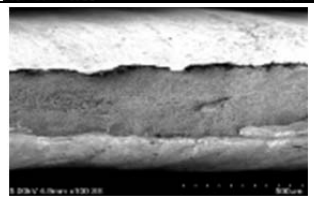
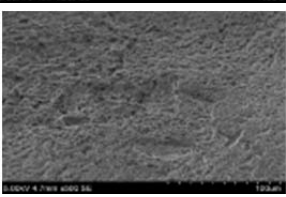
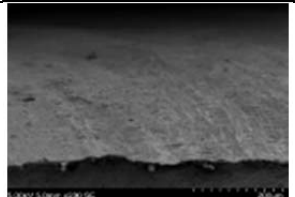
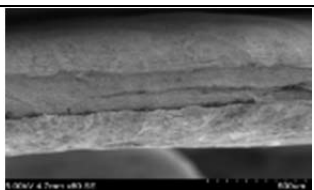
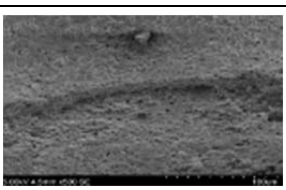

Таблица 2 – Результаты испытаний на статическое растяжение

№ образца	Фото образца до и после испытания	Модуль, МПа	Условный предел текучести, $\sigma_{0,2}$ МПа	Предел пропорциональности, $\sigma_{пц}$ МПа	Предел прочности, $\sigma_b$ МПа	Относительное удлинение, %
0		34673	77,2	50,0	570,7	56,7
1		61802	170,5	65,3	502,2	27,1
2		50393	152,4	68,2	498,5	29,4
3		-	-	-	500,4	28,4
4		46838	105,5	50,3	450,2	28,9



Исследование характера излома после статических испытаний проводилось на растровом электронном микроскопе Hitachi S-3400N. Темное, тусклое отражение света, матовая и ямочная структура после проведения испытаний на статическое растяжение характерна для вязкого излома (таблица 3).

Таблица 3 – Фактография образцов после растяжения

образец	Область изображения		
	Общий вид	Середина излома	Поверхность шва
1			
2			
3			
4			

### Вывод

Проведенная апробация установки дуговой TIG сварки/наплавки тел вращения показывает ее готовность к выполнению масштабных исследований. Полученные сварные соединения в полной мере удовлетворяют требованиям ПИ 1.4.748 и удовлетворяют геометрическим параметрам соединения С0000, получена удовлетворительная микроструктура и механические свойства.

### Благодарности

Научно-исследовательские работы выполнены за счёт средств ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (грант № ВН001/2020).

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Теория и практика изготовления элементов трубопроводов летательных аппаратов: учеб. Пособие / С.И. Феоктистов, Б.Н. Марьин, С.Б. Марьин, Д.Г. Колыхалов; под общ. Ед. С.И. Феоктистова. – Комсомольск – на – Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 203. – 88с.
2. Сварка в самолетостроении / Кривов Г. А., Рябов В. Р., Ищенко А. Я. и др.]; Под ред. Б. Е. Патона. – Киев: МИИВЦ, 1998. – 695 с
3. Производственная инструкция ПИ - I.4.748-80 «Дуговая сварка трубопроводов из нержавеющей сталей в среде инертных газов», 1983, 59 с.
4. Фролов А.В. Установка автоматической сварки элементов судовых трубопроводов // Морские интеллектуальные технологии № 2 том 2, 2021 С. 91-96 <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.057>

Кравченко Елена Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Kravchenko Elena Genadyevna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

Евглевская Екатерина Евгеньевна, студент, Комсомольск-на-Амуре государственный университет

Evglevskaya Ekaterina Evgenyevna, student of Komsomolsk-na-Amure State University

## **АНАЛИЗ РИСКОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

### **ANALYSIS OF RISKS OF INDUSTRIAL ENTERPRISE**

Аннотация. На сегодняшний день управление рисками – это одно из основных направлений работы промышленного предприятия для успешной реализации выпускаемой продукции. Разработка программы управления рисками, внутренних стандартов и инструкций предприятия промышленной отрасли требует анализа и изучения видов и классификации рисков в зависимости от этапа изготовления выпускаемой продукции.

Abstract. To date, risk management is one of the main areas of work of an industrial enterprise for the successful sale of manufactured products. The development of a risk management program, internal standards and instructions of an industrial enterprise requires analysis and study of the types and classification of risks depending on the stage of manufacture of manufactured products.

Ключевые слова: риск, управление, оценка, методика, промышленное предприятие, идентификация.

Key words: risk, management, evaluation, methodology, enterprise, industrial, identification.

В связи с вводом в обращение обновленной версии стандартов ISO 9001:2015 "Системы менеджмента качества. Требования" к управлению рисками стали применяться новые требования. Прямым требованием к организации системы менеджмента качества (СМК) на предприятии является анализ и учет рисков [4]. Для классификации, анализа, управления и контроля рисками необходимо уметь их определить. При этом необходимо понимать, что риск - это не результат действия, а выбор (принятие решения) в условиях неопределенности [5].

Предприятия машиностроительной отрасли имеют ряд особенных этапов подготовки, производства и сопровождения по всему жизненному циклу продукции, отличающихся от предприятий других отраслей промышленности. Из этого следует, что риски могут различаться в соответствии со спецификой анализируемого предприятия [2].

В рамках промышленного предприятия можно выделить следующие этапы производства и соответствующие им риски:

#### 1. Этап исследований и разработок.

1.1. Исследовательские риски. Данная категория включает в себя анализ рисков создания и продвижения на рынок новых продуктов взамен устаревшим и потому не конкурентоспособным. На данном этапе проводится исследование потребностей рынка продукции, включающие в разработку продукта новые технические и технологические решения, направленные на повышение эффективности производства и конкурентоспособности продукта [1]. Этот этап включает в себя следующую группу рисков:

- риски обоснованности актуальной концепции производства изделия;
- риски, неактуальности продукции и проблемой ее реализации;
- коммерческие риски;
- риски достижения запланированных экономических результатов [3].

1.2. Риски опытно-конструкторских работ (ОКР). Классификация рисков ОКР схематично представлены на рисунке 1 [3].



Рисунок 1 – Классификация рисков ОКР

1.3. Риски организации процесса производства. Подготовка производства состоит из многих этапов, основным из которых является разработка технологических процессов для изготовления продукции. От правильности разработки технологического процесса напрямую зависит качество выпускаемой продукции, как серийного, так и единичного производства, материальные затраты на изготовление, доводку, конструктивные изменения. Если проводится разработка нового технологического процесса для новой продукции, вероятность возникновения рисков напрямую зависит от степени новизны изделия: чем новее продукт, тем больше новых переменных для расчета показателей и правильности их применения [3].

2. Этапы производства и внедрения.

2.1. Риски на этапах производства и роста продаж. Цель данного этапа – проверка качества проработки продукта на подготовительном этапе. На данном этапе изначальная идея продукта из «на бумаге» превращается в реальную выручку и прибыль.

В данную группу рисков входит следующее:

- риски увеличения производственных мощностей – отслеживание необходимости увеличения производственной мощности для производства продукта с возможным отрицательным результатом;
- риск сложности обеспечения производства материально-технической базой (существует в условиях роста продаж);
- риски удержания темпов роста прибыли от реализации продукции.

Основным риском данного этапа производства является увеличение предельных издержек предприятия, неблагоприятно отражающихся на ранее расширенных масштабах производства – увеличивается производство, теряется качество.

Грамотно проанализированные риски и их минимизация позволяют увеличить производство новой продукции без издержек, с сохранением её качества и увеличением продаж, снижением текущих производственных затрат, что благоприятно влияет на снижение цен на комплектующие и повышение конкурентоспособности выпускаемой продукции [3].

2.2. Риски на этапе замедления производства и продаж. Классификация этой категории рисков представлена на рисунке 2 [3].

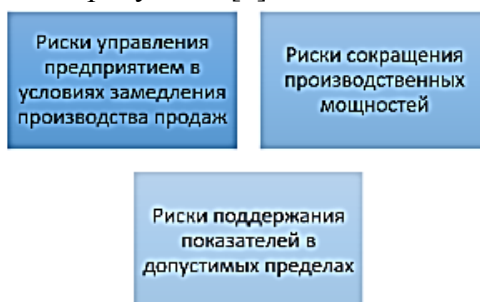


Рисунок 2 – Классификация рисков, возникающих на этапе замедления производства

2.3 Риски на стадии зрелости. В данной категории предприятию необходимо обратить внимание и проанализировать риски, представленные на рисунке 3.

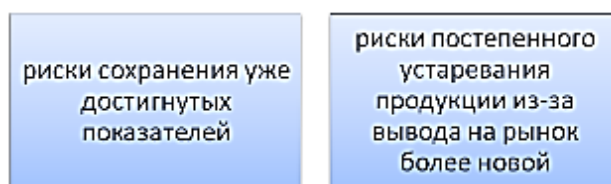


Рисунок 3 – Классификация рисков на стадии зрелости

Основной задачей данного этапа производства продукции является анализ рисков сохранения достигнутых показателей производства и продаж, в работе по предотвращению сокращения продолжительности этапа актуальности продукции на потребительском рынке [3].

2.4. Риски на стадии снижения объемов производства. Данные риски наиболее неблагоприятно отражаются на финансово-экономической деятельности предприятия. Этот этап означает постепенный вывод продукции из производства с сопутствующими финансовыми потерями, что может привести к необходимости изменения технологии производства и применения новых материалов, а также возврат к первому исследовательскому этапу производства – поиску новой идеи для производства конкурентоспособной продукции [3].

Заключение. Проведен анализ рисков, характерных для предприятий машиностроительной отрасли. На основе анализа рисков с учетом этапов жизненного цикла изготавливаемой продукции можно заключить следующее:

- риски могут быть временными, переменными, зависящими от специфики производства, особенности продукции и её реализации;
- количество рисков всегда увеличивается. Это связано с трансформацией отрасли в соответствии с развитием информационных технологий, повышении требований к качеству продукции, высокой конкурентоспособностью;
- прибыль производства напрямую зависит от установленных в процессе анализа моделей рисков на протяжении всего жизненного цикла продукции [5].

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 51897-2011 / Руководство ИСО 73: 2009. Менеджмент риска. Термины и определения.- Взамен ГОСТ Р 51897-2002; введ. 2011-11-16.- М: Стандартиформ, 2012.- 16 с.
2. Кузнецов, Н.В. Управление рисками / Н.В. Кузнецов.- М.: Издательство Дальневосточного университета, 2004. – 168 с.
3. ГОСТ Р ИСО / МЭК 31010-2010. Менеджмент риска. Методы оценки риска.- Введ. 2011-12-1.- М: Стандартиформ,- 2012.- 74 с.
4. ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования.- Введ. 2015-09-15.- М: Стандартиформ,- 2015.- 38 с.
5. Единый стандарт: центр сертификации и лицензирования: сайт. - Москва, 2021 - . – Обновляется в течении суток. – URL: <https://1cert.ru/stati/upravlenie-riskami-v-menedzhmente-na-primere-novogo-iso-9001-2015> (дата обращения 05.11.2022).

Кравченко Елена Генадьевна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Kravchenko Elena Genadyevna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

Холощак Ксения Максимовна, студент, Комсомольск-на-Амуре государственный университет

Kholoschak Xenia Maksimovna, student of Komsomolsk-na-Amure State University

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ АККРЕДИТАЦИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗАВОДСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ**

### **IMPROVEMENT OF THE METHODOLOGY FOR ACCREDITATION OF THE CENTRAL PLANT LABORATORY**

Аннотация. В связи с реформированием системы аккредитации в РФ появилась необходимость обновления порядка аккредитации промышленных лабораторий. Нарастивание объемов, применяемых на заводе измерительного оборудования, является обязательным условием для расширения зоны аккредитации центральной заводской лаборатории. В связи с этим возникла необходимость совершенствования методики аккредитации центральной заводской лаборатории с учетом требований ФЗ-412 «Об аккредитации в национальной системе аккредитации», где главная возможность расширения и сокращения области аккредитации в соответствии обязательными критериями проверки.

Abstract. In connection with the reform of the accreditation system in the Russian Federation, there was a need to update the accreditation procedure for industrial laboratories. Increasing the volumes used at the measuring equipment plant is a prerequisite for expanding the accreditation area of the central factory laboratory. In this regard, it became necessary to improve the accreditation methodology of the central factory laboratory, taking into account the requirements of the law 412 "On accreditation in the national accreditation system," where the main possibility is to expand and reduce the accreditation area in accordance with mandatory verification criteria.

Ключевые слова: центральная заводская лаборатория, методика, критерии аккредитации, аккредитация.

Key words: central factory laboratory, methodology, accreditation criteria, accreditation.

#### **Введение**

Центральная заводская лаборатория (ЦЗЛ) является самостоятельным подразделением предприятия и прямо подчиняется заместителю директора филиала по качеству и развитию. В собственной работе ЦЗЛ руководствуется действующим законодательством, стандартами, и другими нормативными документами (НД), правилами и стандартами охраны труда, промышленной санитарии и пожарной безопасности.

ЦЗЛ включает лаборатории: металлографическая, рентгенофизическая и др.

На рисунке 1 представлены основные задачи ЦЗЛ.

Для того, чтобы доказать, что качество выполненных действий по испытанию различных видов материалов и иной продукции соответствует законодательным нормам, время от времени аккредитуется ЦЗЛ.

**Целью аккредитации** является возможность тестирования продукции в соответствии с международными стандартами. Такая деятельность совершенно положительно влияет на имидж предприятия и помогает выделяться среди конкурентов.

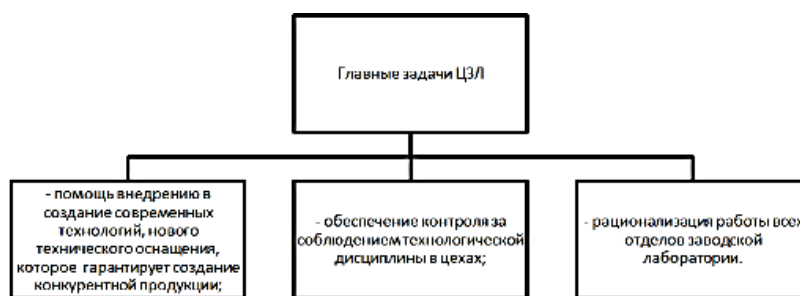


Рисунок 1 – Главные задачи ЦЗЛ

«Аккредитация испытательной лаборатории (ИЛ) может осуществляться в различных системах аккредитации. Выбор системы зависит от ряда факторов, связанных с деятельностью испытательной лаборатории. Аккредитация испытательной лаборатории РФ осуществляется в национальной системе аккредитации «Росаккредитация» [2].

### Предварительные мероприятия по аккредитации

Прежде чем приступить к процессу аккредитации ИЛ, нужно выполнить ряд предварительных мероприятий. Дальнейшие действия будут зависеть от их итога.

На рисунке 2 переданы виды деятельности ИЛ.



Рисунок 2 – Виды деятельности

### Область аккредитации испытательной лаборатории

«Чтобы определить область аккредитации испытательной лаборатории необходимо:

- установить виды деятельности для проведения испытаний и контроля;
- установить объекты контроля и испытаний;
- определить состав нормативных документов, регламентирующих параметры объектов контроля и испытаний;
- определить состав параметров или показателей, которые будет контролировать испытательная лаборатория;
- определить виды контроля и испытаний для каждого из контролируемых параметров;
- определить состав нормативных документов, регламентирующих применение выбранных методов контроля и испытаний» [3].

Каждая система аккредитации содержит свой «набор», который указан в области аккредитации ИЛ. В большинстве случаев итоги данных действий документируются и указываются при аккредитации ИЛ.

### Аккредитации испытательной лаборатории. Критерии

Для успешной аккредитации ИЛ должна полностью отвечать критериям аккредитации для выбранной области. Уполномоченная организация, в основном это Росаккредитация», инспектирует абсолютное соотношение заявленной зоны аккредитации, установленным критериям, которые предоставлены на рисунке 3. Если ИЛ нарушит критерии по аккредитации, то лаборатория не пройдет аккредитацию.

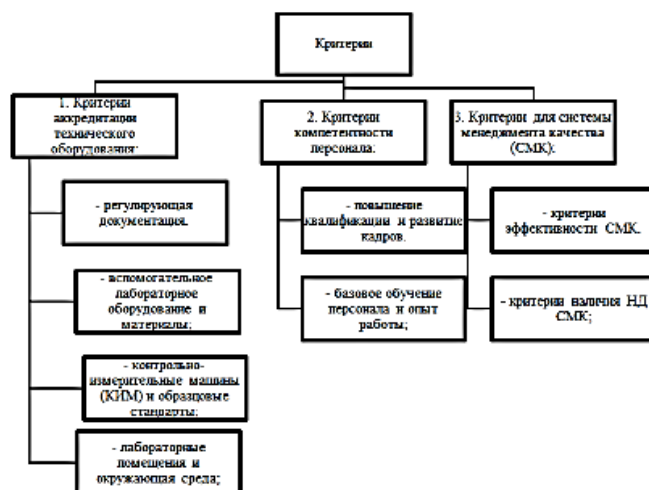


Рисунок 3 – Критерии аккредитации

**Аккредитации испытательной лаборатории. Документы**  
 Документы для аккредитации ИЛ представлены на рисунке 4.



Рисунок 4 – Документы для аккредитации ИЛ

После окончания рассмотрения бумаг, которые были предоставлены организацией, лаборатории выдается разрешительный документ. Сертификат, который официально подтверждает ее право на проведение испытаний продукции в соответствии с международными стандартами. Сертификат является документальным подтверждением высокого уровня оснащенности ИЛ. Данный сертификат действует не более 5 лет.

Аккредитованные центры проверяются инспекцией несколько раз. Первое посещение в обязательном порядке приходится на 1-ый год работы организации. Дальнейшая проверка рассчитана на следующие полтора года.

### Заключение

Усовершенствованный метод аккредитации ЦЗЛ, позволяющий актуализировать процедуру аккредитации, может быть внедрен во множества промышленных лабораторий машиностроительных предприятий за процесс аккредитации.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 51000.4-2011. Общие требования к аккредитации испытательных лабораторий : нац. Стандарт Российской Федерации: изд. Официальное : утв. и введен действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 июня 2012 г. N 143-ст 6 взамен ГОСТ Р 51000.4-2008 : дата введения 2013-01-01 / разработан ОАО «ВНИИС».- Москва: Стандартинформ, 2013. -19 с.

2. Об аккредитации в национальной системе аккредитации: федер. закон от 28 декабря 2013 г. № 412-ФЗ // Собрание законодательства РФ. –2013. – Ст. 30.

3. Приказ Минэкономразвития России от 30.05.2014 № 326 «Об утверждении Критериев аккредитации, перечня документов, подтверждающих соответствие заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации, и перечня документов в области стандартизации, соблюдение требований которых заявителями, аккредитованными лицами обеспечивает их соответствие критериям аккредитации».

4. ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий изд. Официальное : введен действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 июля 2019 г. N 385-ст взамен ГОСТ ISO/IEC 17025—2019 : дата введения 2019-09-01 / разработан Государственное предприятие «БГЦА». – Москва : Стандартинформ, 2021. – 32 с.

УДК 621.9.02

Лаврик Валерий Алексеевич, магистрант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Lavrik Valery Alekseevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Пронин Александр Иннокентьевич, кандидат технических наук, доцент;

Pronin Alexander Innokentyevich, Candidate of Technical Sciences, Komsomolsk-na-Amure State University

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТРУДОЁМКОСТИ РАЗРАБОТКИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ**

### **ANALYSIS OF METHODS FOR ASSESSING THE COMPLEXITY OF DEVELOPING CONTROL PROGRAMS**

Аннотация. В статье проведён анализ методов оценки трудоёмкости разработки управляющих программ в современных САМ-системах для станков с ЧПУ. Рассмотрен процесс оценки трудоёмкости разработки и подготовки этапов управляющих программ. Выявлены факторы, влияющие на трудоёмкость процесса разработки каждого этапа.

Abstract. The article analyzes methods for assessing the complexity of developing control programs in modern CAM systems for CNC machines. The process of assessing the complexity of the development and preparation of the stages of control programs is considered. The factors influencing the complexity of the development process of each stage are identified.

Ключевые слова: САМ-система, управляющая программа (УП), станок с ЧПУ, трудоёмкость, коэффициентов поправки.

Key words: CAM-system, control program (CP), CNC machine, labor intensity, correction coefficients.

В условиях рыночной экономики высока конкуренция среди предприятий за производственные заказы. Как правило, выигрывает то предприятие, у которого себестоимость продукции ниже. Себестоимость продукции напрямую связана с трудоёмкостью ее производства, которая в свою очередь складывается из трудоёмкости подготовительного этапа и трудоёмкости этапа производства [1, 2].

Одним из трудоёмких подготовительных этапов является разработка управляющих программ (УП) для станков с ЧПУ.

Для опытной оценки трудоёмкости разработки УП используют метод экспертных оценок. Его основное достоинство состоит в быстроте и эффективности получения результата. К недостаткам метода следует отнести необходимость в привлечении высококвалифицированных (а, следовательно, и высокооплачиваемых) специалистов в области разработки УП.



Принимая во внимание указанный недостаток, возникает задача разработки простого метода предварительной оценки трудоемкости, учитывающего возможности применяемых на предприятии САМ-систем. Для решения поставленной задачи выполнен анализ процессов подготовки УП в САМ – системах.

Анализ применяемых в настоящее время методов подготовки в САМ-системах УП для изготовления групп однотипных деталей показал, что в общем случае процесс подготовки включает следующие этапы: настройка параметров проекта; импорт геометрических данных; задание параметров инструмента; задание параметров операций; расчет траекторий; визуализация обработки; формирование выходной документации.

Трудоемкость каждого этапа зависит от ряда факторов. Для адекватной оценки трудоемкости разработки УП для станков с ЧПУ необходимо выявить эти факторы и установить степень их значимости.

В начале выделяется фактор в наибольшей степени, влияющий на трудоемкость. Таким фактором является разнообразие станков с ЧПУ, подходящих для выполнения обработки детали. Для задания информации о группе однотипных деталей требуется существенно большее время, чем для одной конкретной детали.

На втором этапе выполняется импорт геометрической информации в САМ-модуль. На производительность этого этапа влияют: необходимость преобразования плоского изображения в объемное, сложность в чтении и преобразовании геометрической информации и возможные ошибки в геометрических моделях, которые потребуются исправить.

На третьем этапе происходит выбор и задание в программе инструмента и инструментальной оснастки. Производительность выполнения работ на данном этапе зависит от наполнения общезаводской базы режущего и вспомогательного инструмента и технологической оснастки. При необходимости экстренного пополнения базы время, затраченное на разработку УП возрастает.

Четвёртым этапом является подбор необходимых параметров обработки с учётом следующих факторов: наличие средств автоматического выбора параметров обработки с возможностью их сохранения для дальнейшего использования в качестве шаблона для последующих разработок УП.

Пятым этапом является расчёт траекторий для передвижения инструмента во время обработки детали. Время выполнения данного этапа этап зависит от точности аппроксимации геометрии высокоточных элементов детали.

Окончательным этапом является графическая демонстрация обработки. На данном этапе, сложность заключается в отсутствии возможности визуализации всех процессов обработки и возврата к ошибкам, выявленным во время предшествующих операций.

После проделанных этапов формируется выходная документация.

Вышеперечисленные факторы учитывались при разработке метода определения трудоемкости разработки УП в современных САМ-системах.

Особенность метода оценки трудоёмкости разработки УП основывается на возможности передачи параметров трудоёмкости различных групп деталей заказа на все последующие, с применением коэффициентов поправки [3, 4].

Первый этап заключается в сборе и обработке данных о деталях, таких как: габариты, количество поверхностей, требования к точности, шероховатости и т.д. После, на втором этапе, оцениваются и выбираются различные детали с целью получения информационной оценки трудоёмкости разработки УП для их производства. На третьем этапе проводится анализ временных затрат на обработку деталей и разработку УП. На заключительном этапе происходит формирование результата оценки детали, выбранной в качестве анализируемой и последующих проекций трудоемкости ее изготовления на остальные детали, с применением поправочных коэффициентов, исследованных на основе предложенных этапов метода оценки трудоемкости УП.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Казанцев М. С., Васильев Н. С. Оценка трудоемкости разработки управляющих программ в современных САМ-системах // Перспективы науки. 2014. № 12. С. 91 – 94
2. Лаврик, В.А. Метод снижения трудоемкости разработки управляющих программ для изготовления однотипных деталей на станках с ЧПУ / Лаврик В.А., Пронин А.И. // В сборнике: Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. Материалы V Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2022. С. 53-54.
3. Попова, О.В. Применение методов машинного обучения в задачах оценки технологических процессов / О.В. Попова, Я.Ю. Григорьев, Е.П. Жарикова, А.Л. Григорьева // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 7 (55). С. 68-72.
4. Ведмидь, П.А. Программирование обработки в NX CAM / П. А. Ведмидь, А. В. Сулинов. - М.: ДМК Пресс, 2014. – 303 с.

УДК 621.565

Морквин Никита Андреевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Morkvin Nikita Andreevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Отряскина Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Otryaskina Tatyana Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University

## УЛУЧШЕНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА

## IMPROVED DESIGN HEAT EXCHANGERS TO INCREASE HEAT TRANSFER EFFICIENCY

Аннотация. В данной статье с помощью программного пакета Solid Works рассматриваются физические закономерности процессов, протекающих в теплообменном аппарате с целью выбора оптимальной конфигурации теплообменного аппарата для снижения межремонтного пробега, увеличения эффективности теплообменного аппарата и повышения надежности оборудования.

Abstract. In this article, using the Solid Works software package, the physical laws of the processes occurring in the heat exchanger are considered in order to select the optimal configuration of the heat exchanger to reduce the turnaround time, increase the efficiency of the heat exchanger and improve the reliability of the equipment.

Ключевые слова: теплопередача, интенсификация, теплообменный аппарат.

Key words: heat exchange, intensification, heat exchanger, spiral plate.

Теплообменное оборудование в нефтяной отрасли является одной из важных частей топливно-энергетического баланса завода, позволяя значительно снижать тепловые потери за счёт рекуперации тепла отходящих потоков [1].

Теплообменные аппараты подвержены ряду проблем, одной из них является нарастание нефтяных и коксовых отложений в межтрубном пространстве. Главной причиной таких отложений является наличие застойных (непроточных) зон [2].

В данной статье произведён экспериментальный расчёт случайной модели теплообменного аппарата с целью: определить зависимость между конфигурацией перегородок в межтрубном пространстве и физическими параметрами потока жидкости (скорость течения, перепад давления, перепад температуры).

Расчёт производился на базе программного пакета Solid WORKS 2020 с дополнением «Flow Simulation». Данное программное решение позволяет выполнить в короткие сроки симуляцию движения частиц жидкости и газа и их термодинамическое взаимодействие.

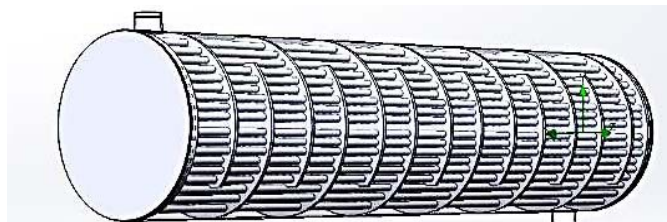


Рисунок 1 – Экспериментальная модель теплообменного аппарата

На рисунке 1 представлена модель теплового аппарата со следующими характеристиками:

- Длина – 4000 мм
- Диаметр кожуха – 1000 мм
- Количество труб – 256

В расчёте использовались две конфигурации теплообменного аппарата,

1. Аппарат с одиннадцатью перегородками с расстоянием 150 мм между ними
2. Аппарат с семью перегородками с расстоянием 300 мм между ними.

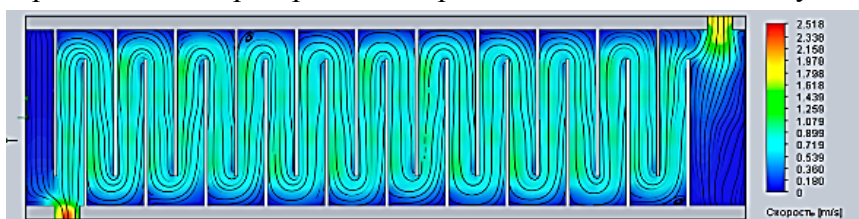


Рисунок 2- Конфигурация 1 скорость

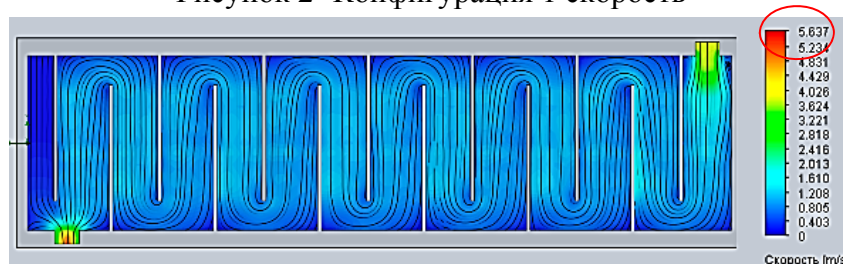


Рисунок 3 - Конфигурация 2 скорость

На рисунках 2, 3 приведены диаграммы изменения скоростей для конфигураций 1 и 2 соответственно. Сравнивая их, можно сделать вывод, что увеличение расстояния между перегородками в теплообменном аппарате ведёт к равномерному распределению градиента скоростей по сечению теплообменного аппарата и уменьшению застойных зон. Одна из таких зон показана на рисунке 4.

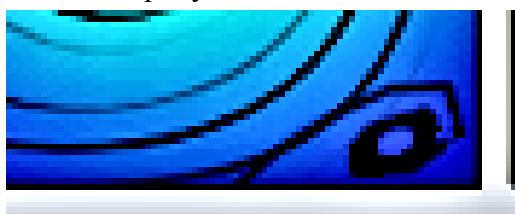


Рисунок 4 - Застойная зона

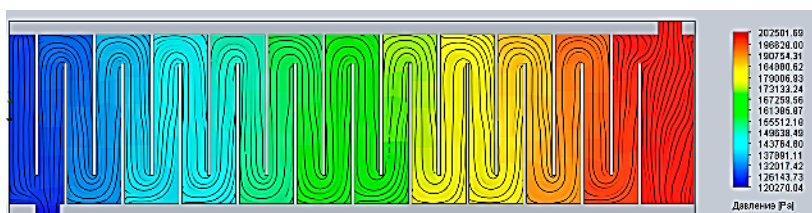


Рисунок 5 - Конфигурация 1 Давление

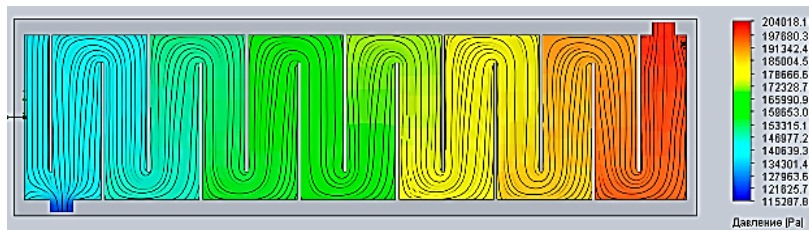


Рисунок 6 - Конфигурация 2. Давление

Обращаясь к рисункам 5 и 6, мы так же наблюдаем положительный результат увеличения межперегородочного расстояния, а именно снижение перепада давления, что позволяет избежать кавитации в теплообменном оборудовании. [3]

Однако, при всех положительных аспектах увлечение расстояния так же несёт в себе и минусы, такие, как, например, снижение теплоотдающей способности теплообменного аппарата, что показано на рисунках 7 и 8.

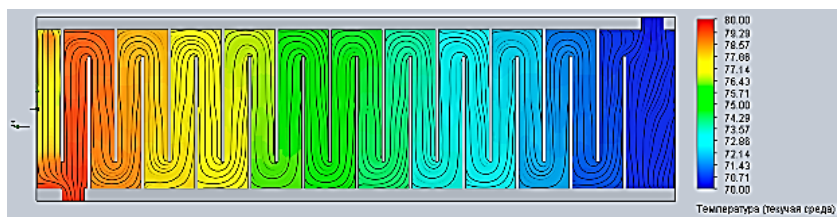


Рисунок 7 - Конфигурация 1. Температура

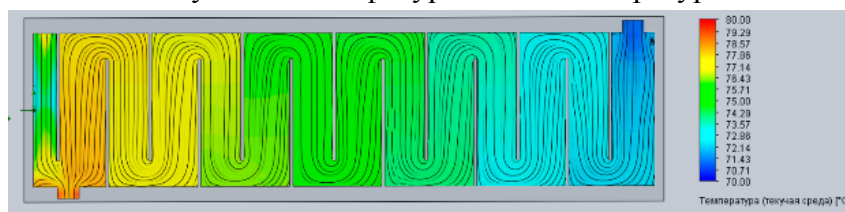


Рисунок 8 - Конфигурация 2. Температура

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что метод компьютерного проектирования позволяет на этапе проектирования теплообменного оборудования определить оптимальную конфигурацию теплообменного оборудования с учётом завихрений, перепада давления и КПД теплообменного аппарата.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Четверткова, О.В. Влияние расстояния между поперечными перегородками и высоты выреза перегородки на тепловую эффективность кожухотрубчатого теплообменника / О.В. Четверткова, Р.Г. Ризванов, Р.Р. Чернятьева // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2015. – № 6. – С. 452-465.
2. Ильин, Р.А. Современные проблемы энергосбережения в производстве / Р.А. Ильин, Р.А. Лиджи-Горяев // Путь науки. – 2015. – № 1(11). – С. 36-38.
3. Ардаширова, Э.А. Зависимость тепловой эффективности кожухотрубчатых теплообменных аппаратов от величины зазоров в межтрубном пространстве / Э.А. Ардаширова, Р.Г. Ризванов // Нефть и газ – 2012: сборник тезисов 66-й Международной молодежной научной конференции. – М.: РГУ Нефти и Газа им. И.М. Губкина, 2012. – с. 72.

Отряскина Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Машиностроение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Otryaskina Tatyana Aleksandrovna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department "Mechanical Engineering", Komsomolsk-na-Amure State University  
Кравченко Андрей Константинович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Kravchenko Andrey Konstantinovich, student of Komsomolsk-na-Amure State University

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЦИРКУЛЯЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ГАЗООХЛАЖДАЕМОМ РЕАКТОРЕ**

### **IMPROVEMENT OF CIRCULATION SYSTEM COOLANT IN GAS-COOLED REACTOR**

Аннотация. Очистка водорода от примесей является острой проблемой в нефтеперерабатывающей отрасли. Предлагаемая технология даст возможность достигать значительных производственных показателей благодаря предельному использованию водорода, накопленному на адсорбере к концу процесса адсорбции для выравнивания, повторного нагнетания давления и промывки остальных адсорберов.

Abstract. The purification of hydrogen from impurities is an acute problem in the oil refining industry. The proposed technology will make it possible to achieve significant production indicators due to the marginal use of hydrogen accumulated on the adsorber at the end of the adsorption process for equalization, repressurization and washing of the remaining adsorbers.

Ключевые слова: реактор, катализатор, паровая конвекция, водородосодержащий газ, теплообменный риформинг.

Key words: reactor, catalyst, steam convection, hydrogen-containing gas, heat exchange reforming.

#### **Введение**

В настоящее время на нефтеперерабатывающих заводах часто сталкиваются с нехваткой водорода для технологических нужд – операции гидроочистки углеводородных смесей, которая существенно влияет на качество топлива. Современные промышленные методы получения водорода основаны на процессе парового риформинга. В качестве сырья в них чаще всего используют природный газ, сырую нефть или уголь. Эти способы материально затратные, к тому же их реализация приводит к выбросам значительного количества диоксида углерода в атмосферу. Существующие альтернативные методы не нашли широкого распространения, поэтому поиск технических и технологических решений для стабильного обеспечения водородом нефтеперерабатывающих предприятий представляется актуальной задачей.

#### **Основная часть.**

Известны три основных промышленных метода получения водорода:

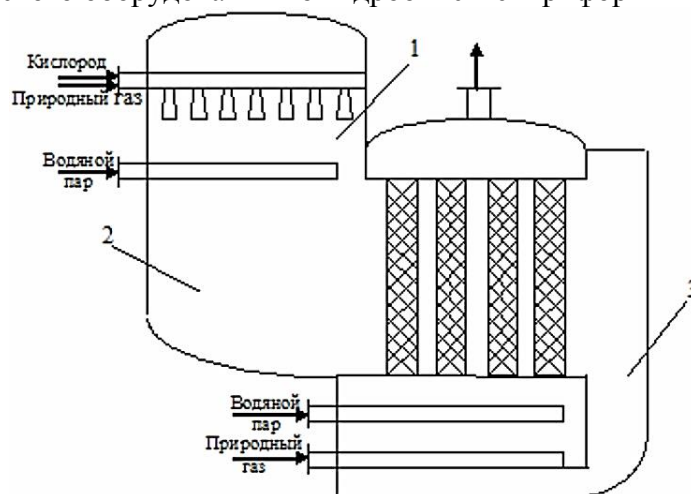
- электролитический через разложение воды или водных растворов постоянным электрическим током;
- каталитический риформинг углеводородного сырья;
- паровая конверсия природного газа.

*Первый метод* применяется в лабораторных условиях или для эксклюзивных технологий, где требуется чистота водорода 99,999 % объема. Данная технология сопряжена с большими энергозатратами и в промышленных масштабах распространения не получила.

*Второй метод* основан на получении водорода, как побочного продукта, в составе водородсодержащего газа с концентрацией водорода 70-92 % об. при ароматизации углеводородного сырья. Количество водорода, получающегося в этом случае, зависит от состава сырья и состояния катализатора. Получаемый водород, после компримирования и концентрации, используется в гидрооблагораживающих процессах.

*В третьем методе* в качестве сырья используется сравнительно дешевое сырье – природный газ. Кроме того, в качестве дополнительного источника водорода, выступает вода. Количество и природа получающихся побочных продуктов (в основном оксидов углерода) позволяют, без существенных энергозатрат, отделять их от целевого продукта – водорода [1]. В качестве реализации предложенного метода выступает трубчатый реактор конверсии природного газа (рисунок 1).

Основанная на третьем методе технология позволяет применять природный газ в качестве единственного сырья. Это создает условия для нарастания выхода водорода, поскольку метан представляет собой углеводород, максимально содержащий в себе водород. Помимо этого, благодаря минимизированию адсорбции углерода, увеличивается ресурс каталитического оборудования по гидроочистке и риформингу.



1 – камера сгорания природного газа; 2 – камера смешения продуктов сгорания с водяным паром; 3 – камера смешения парогазовой смеси  
Рисунок 1. Трубчатый реактор конверсии природного газа

Основные технологические ступени предлагаемого технологического процесса получения водорода представлены на рисунке 2.

**Первая стадия.** В реакторе теплообменного риформинга происходит возникновение оксида углерода и водорода – так называемая паровая конверсия природного газа. Реактор состоит из вертикально установленных труб, выполненных из высоколегированной хромомолибденовой стали и заполненных катализатором на основе оксида никеля (рисунок 1). Теплота, необходимая для проведения эндотермической реакции парового риформинга метана, обеспечивается горячим продуктом вторичного (автотермического) риформинга.

**Вторая стадия.** Продуктовый газ для дополнительного образования водорода из первой стадии движется в реактор автотермической конверсии оксида углерода. Водород образуется при сгорании остаточного метана [2].

Важнейшим этапом в системе использования тепла продуктового газа является нагрев и частичное испарение котловой воды. После второй стадии риформинирования, утилизация тепла продуктового газа осуществляется в теплообменном реакторе и далее в котле утилизатора. Котел утилизатор позволяет получать перегретый водяной пар высокого давления ( $P = 6,8$  МПа,  $t = 400$  °С).



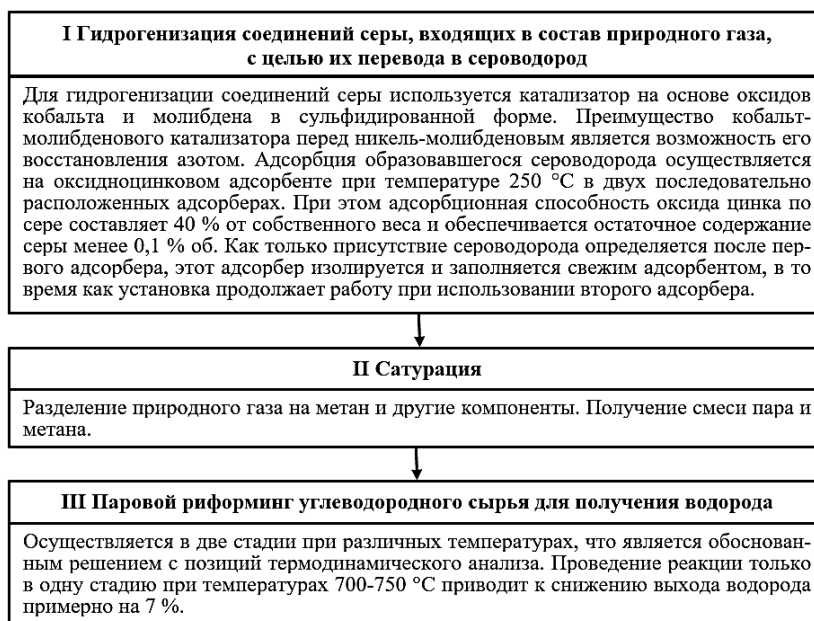


Рисунок 2. Ступени технологического процесса получения водорода

Очистка продуктового газа, содержащего помимо водорода метан, примеси оксидов углерода и других веществ, осуществляется в две стадии при отличных друг от друга температурах, что позволяет добиться высокой степени чистоты водорода. Первая стадия – грубая очистка в сепараторе, где из смеси извлекают диоксид углерода. Вторая стадия – тонкая очистка в блоке короткоциклового адсорбции (КЦА).

Известны мембранная и абсорбционно-каталитическая технологии очистки водорода от примесей. Мембранная технология требует применения дорогостоящих палладийсодержащих мембран, работающих при высоких температурах для обеспечения их проницаемости по водороду. Абсорбционно-каталитическая технология подразумевает двухступенчатое поглощение образовавшегося диоксида углерода основаниями. Одновременно в среде полученного водорода на катализаторе, содержащем палладий, осуществляется гидрирование примесей оксида углерода. Для осуществления этой технологии необходимы дополнительные затраты энергии и оборудования: реактора гидрирования, регенераторов и абсорберов [3].

Достижение значительных производственных показателей при реализации предложенной технологии происходит благодаря предельно высокому расходованию накопленного на абсорбере водорода.

Применяемый на блоке короткоциклового адсорбции цикл переменного давления реализуется за счет адсорбции примесей при давлении товарного водорода. При этом осуществление десорбции происходит на самом технически возможном низком уровне давления, который применяется при эксплуатации отдувочного газа в качестве топлива.

Адсорберы при адсорбции эксплуатируются в режиме чередования фаз, что обеспечивает крайне гибкий процесс очистки, не подверженный влиянию колебаний состава, температуры и давления сырьевого газа. Сырьевой газ движется через адсорберы снизу-вверх. Загрязняющие примеси адсорбируются селективно – углеводороды, оксид углерода и азот – сверху вниз. Водород высокой чистоты поступает в трубопровод товарного продукта. По окончании стадии адсорбции адсорбер регенерируется в четыре основных этапа:

- давление сбрасывается в прямоходе с сырьевым потоком. Прямоточный сброс давления осуществляется при использовании водорода, аккумулированного на адсорбере;
- давление сбрасывается в противотоке с давлением отдувочного газа (этап промывки) для удаления загрязняющих примесей с адсорбента;

- адсорбер промывается чистым водородом под давлением продувочного газа с целью десорбции остаточных загрязняющих примесей с адсорбента.

- давление в адсорбере повторно нагнетается до уровня давления при адсорбции.

Преимущества предлагаемой технологии. Процесс протекает при температуре окружающей среды. Выработки тепла не требуется. Температурные изменения происходят только за счет выделения тепла при адсорбции/десорбции и сброса давления. Эта особенность определяет долгий срок службы адсорбирующего материала, поскольку отсутствуют гидротермальные эффекты, обычно вызывающие дезактивацию адсорбентов.

### **Заключение**

Предложенная технология позволяет применять природный газ в качестве единственного сырья. Отличительной особенностью является более сложная конструкция теплопередающего устройства. Катализатор находится в трубках. Основная часть тепла, необходимая для протекания эндотермических реакций паровой конверсии, передается через стенки катализаторных труб. Такая конструкция обеспечивает наиболее равномерное распределение температур по катализаторной зоне, что способствует более равномерному срабатыванию катализатора и продлению его службы. Предложенный реактор конверсии природного газа обладает повышенным выходом водорода по сравнению с существующими конверторами.

### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Владимиров А.И., Молоканов Ю.К., Скобло А.И., Щелкунов В.А. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии. М.: Недра, 2000.

2. Кульчаковский П.И., Митберг Э.Б., Ермолаев И.С. и др. Исследование процесса некаталитического высокотемпературного парциального окисления метана для получения синтез-газа // Тепловые процессы в технике. 2016. Т. 8. № 3. С. 117–125.

3. Махлин В.А., Цецерук Я.Р. Современные технологии получения синтез-газа из природного и попутного газа // Хим. пром. сегодня. 2010. № 3. С 6–17.

УДК 606-33

Отряскина Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Otryaskina Tatiana Aleksandrovna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amur State University

Тактарова Анастасия Николаевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Taktarova Anastasia Nikolaevna, student, Komsomolsk-on-Amur State University

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ГАЗА РЕГЕНЕРАЦИИ НА УСТАНОВКАХ АМИНОВОЙ СЕРООЧИСТКИ**

## **IMPROVING THE EFFICIENCY OF GAS PURIFICATION REGENERATION AT AMINE DESULFURIZATION PLANTS**

Аннотация: В статье рассмотрены условия и критерии выбора оптимального абсорбента для очистки кислых газов. Рассмотрены различные методы аминовой очистки. Отмечается, что на эффективность очистки влияют химические реагенты, предотвращающие вспенивание поглотительного раствора и конструкционные особенности абсорбера. Предлагается использовать абсорбер колонного типа. Обсуждаются технико-экономическая целесообразность и факторы, влияющие на эффективность аминовой очистки кислотных газов.

Abstract: The article discusses the conditions and criteria for choosing the optimal absorbent for acid gas purification. Various methods of amine purification are considered. It is noted



that chemical reagents that prevent foaming of the absorption solution influence the cleaning efficiency and the design features of the absorber. It is proposed to use a column-type absorber. The technical and economic feasibility and factors affecting the efficiency of amine purification of acid gases are discussed.

Ключевые слова: адсорбционная очистка, МДЭА, сернистые соединения, водные растворы аминов, термостойкие соли, коррозия.

Key words: adsorption purification, MDEA, sulfur compounds, aqueous solution of amines, heat-resistant salts, corrosion.

## Введение

Основной проблемой переработки и транспортировки природного газа является высокое содержание в нем сернистых соединений, которые являясь агрессивными веществами приводят к разрушению трубопроводов и катализаторов, выходу из строя оборудования. К тому же при сгорании серосодержащие газы выделяют токсины. Для избежание негативных последствий при переработке газа, производится аминовая очистка газа от сероводорода.

## Основная часть

Для очистки газа от углекислого газа и сероводорода чаще всего используют следующие этаноламины:

- моноэтаноламин (МЭА)
- дигликольамин (ДГА)
- метилдиэтаноламин (МДЭА)
- диэтаноламин (ДЭА)
- триэтаноламин (ТЭА)
- диизопропаноламин (ДИПА)

Наиболее распространены моно- и диэтаноламин. В случаях, если в сырьевом газе содержится не только сероводород и углекислый газ, но и присутствует оксид-сульфид углерода и сероуглерод, имеет смысл применять диэтаноламин (ДЭА). Основным недостатком использования диэтанолamina являются повышенные тепловые затраты на регенерацию абсорбента. Для извлечения сероводорода в присутствии углекислого газа используют метилдиэтаноламин (МДЭА).

Чаще всего в качестве растворителя применяют МДЭА. Это обусловлено рядом преимуществ. Во-первых, низкий расход относительно МЭА и ДЭА. Во-вторых, низкое давление насыщенных паров, позволяет извлекать раствор с большой концентрацией аминов без ощутимых потерь в абсорбере и регенераторе. В-третьих, не формируются застойные осадки в теплообменных аппаратах.

Процесс очистки газа происходит в аппарате колонного типа – абсорбере (рисунок 1).

Массообменный процесс протекает на контактных тарелках абсорбера. Газ поступает снизу и движется вверх по тарелкам, сверху, навстречу газу подается аминовый раствор. В процессе взаимодействия осуществляется хемосорбция сероводорода и углекислого газа абсорбентом. Очищенный газ выводится из аппарата через секцию-скруббер.

Аминовый раствор с большим процентом содержания кислых компонентов останавливается в отпорной колонне (десорбере), где осуществляется разделение амина и кислого газа, реакция протекает при поглощении тепла (эндотермическая реакция). В



Рисунок 1 - Абсорбер колонного типа

колоне для осуществления реакции необходимо понизить давления и увеличения температуры, что приводит к устойчивости реакции. Также для устойчивости процесса в колонну вводят антивспениватель. После отделения аминового раствора от кислых газов, его пропускают через угольные фильтры для выделения осадка.

В десорбере происходит реакция окисления и полимеризации МДЭА, благодаря поглощению кислорода. За счет этого образуются тяжелые смолистые соединения, которые отлаживаются в технологическом оборудовании и приводят к коррозионному разрушению оборудования. Чем больше в растворе МДЭА продуктов распада и термостойких солей (ТСС), тем меньше его абсорбционная способность. Эти продукты распада не участвуют в процессе очистки кислых газов, их нужно выводить из системы очистки.

Еще одной проблемой является интенсивное пенообразование в системе, которое приводит к нарушению режима работы, увеличению потерь абсорбента в результате уноса с газом, а также к ухудшению параметров товарного газа. Резкий перепад давления в колонне указывает на активизацию процесса пенообразования.

На данный момент процесс образования ТСС компенсируется добавлением в систему свежего раствора амина и ингибиторов коррозии, установкой дополнительных фильтров, а также увеличением затрат регенерации на ремонт и замену оборудования.

Одними из широко распространенных методов удаления ТСС из аминового контура является вакуумная дистилляция, электродиализ на ионообменных мембранах и ионный обмен на ионитах. На протяжении долгих испытаний ионный обмен на ионитах показал себя более практичным и выгодным методом очистки, при этом еще и экологически безопасный.

Извлечение ТСС из растворов МЭА, ДЭА и МДЭА с помощью ионитов в непрерывном режиме реализовано компанией ECO-TEC Inc. (Канада) в установке АмиПюр®-Plus. Данная установка является компактным автоматизированным комплексом (рисунок 2), подключаемым к контуру параллельно линии обедненного амина и непрерывно очищающим отбираемые из потока порции амина циклами.

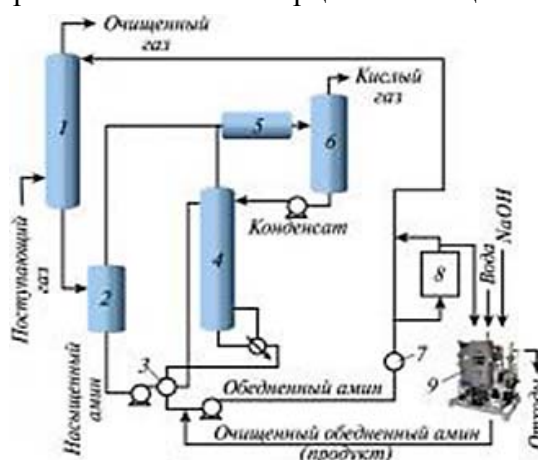


Рисунок 2 – Автоматизированный компактный комплекс модульного типа

Ионообменное оборудование АмиПюр®-Plus устанавливается после блока штатной фильтрации аминового контура. Штатная система фильтрации, включающая в себя картриджные фильтры и колонну с активированным углем, извлекает из абсорбента не диссоциирующие примеси (продукты деградации, тяжелые углеводороды, продукты осмоления, поверхностно-активные вещества), а ионообменная система удаляет кислотные анионы ТСС, диссоциированные в водном растворе амина.

### Заключение

В работе проведен анализ проблем аминовой очистки и предложены возможные пути их решения: подбор оптимального этаноламина, поддержание условий технологического режима, предотвращение попадания нежелательных веществ в раствор абсорбента, а также предложен вариант удаления термостабильных солей из растворов этаноламинов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стрючков В.М., Афанасьев А.И., Шкляр Р.Л. Интенсификация процессов очистки природного газа от кислых компонентов // Подготовка и переработка газа и газового конденсата: обз. информация –М.: ВНИИЭгазпром.–1984. -№6. –60 с.
2. Стюарт Э.Дж., Ланнинг Р.А. Сокращение потерь реагента на установках очистки аминами // Нефтегазовые технологии –1995. -№2. –с.53-56.
3. Петров, И.В. Совершенствование технологии аминовой сероочистки газов / И.В. Петров, М.Л. Павлов, А.Ю. Спащенко, Б.О. Гуськов // Прикладные и академические исследования. – 2013. –№ 4. – С. 146-148.

УДК 621.791.725

Полейчук Полина Анатольевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Poleichuk Polina Anatolievna, student of Komsomolsk-na-Amure State University

Плетнев Никита Олегович, старший преподаватель кафедры «Технология сварочного и металлургического производства имени В.И. Муравьева»

Pletnev Nikita Olegovich, Senior lecturer of the Department "Technology of Welding and Metallurgical Production named after V.I. Muravyev", Komsomolsk-na-Amure State University

## **ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА НА СООТНОШЕНИЕ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА В ОБЪЕМЕ СВАРНОЙ ТОЧКИ**

### **THE INFLUENCE OF THE PULSE SHAPE ON THE RATIO OF THE DEPOSITED METAL IN THE DEPOSITED METAL IN THE WELDED POINT**

Аннотация. Данная работа посвящена влиянию формы импульса и параметров лазерной сварки на соотношение объема структурных зон сварных точек, полученных единичным воздействием (импульсом) лазерного излучения на поверхность низкоуглеродистой стали. Исследования выполнены с применением установки BULAT LRS 300 и металлографического микроскопа Nikon MA200. Установлено, что наиболее благоприятными режимами точечной импульсной лазерной сварки являются режимы сварки при использовании импульса с прямоугольной формой и величине рабочего напряжения 450 В без наличия пульсации лазерного луча.

Abstract. This work is devoted to the influence of the pulse shape and laser welding parameters on the ratio of the volume of structural zones of welded points obtained by a single exposure (pulse) of laser radiation on the surface of low-carbon steel. The studies were carried out using the BULAT LRS 300 installation and the Nikon MA 200 metallographic microscope. It has been established that the most favorable modes of spot pulsed laser welding are welding modes when using a pulse with a rectangular shape and a working voltage of 450 V without the presence of laser beam pulsation.

Ключевые слова: импульсная лазерная сварка, сварочные точки, область, структура, глубина проплавления.

Key words: pulsed laser welding, welding points, area, structure, penetration depth.

Сварка различных сталей – неотъемлемый процесс при производстве деталей и механизмов различного назначения. При получении сварных соединений различными способами происходит существенное изменение металла шва в зоне термического влияния и околшовной зоне. В процессе лазерной сварки обеспечивается минимальное пребывание участков в состоянии перегрева, за счет чего исключается рост зерна и ухудшение механических свойств сталей [1]. Общий размер зоны термического влия-

ния при лазерной сварке в 3...5 раз меньше, чем при аргонодуговой [2-4]. Однако в результате воздействия термического цикла лазерной сварки на структуру металла шва и зону термического влияния они могут изменяться и влиять на механические свойства получаемых сварных соединений.

В данной работе ставится вопрос по влиянию формы импульса и параметров лазерной сварки на соотношение объема структурных зон сварной точки, полученной единичным воздействием (импульсом) лазерного излучения на поверхность низкоуглеродистой стали.

В исходном состоянии структура стали Ст3 сформирована мелкими равноосными кристаллами феррита и перлита, расположенным главным образом по стыкам ферритных зерен и образующего как бы «сетку» или вкрапления между зернами (рисунок 1).

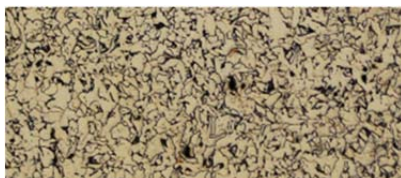


Рисунок 1 – Структура стали Ст3 в исходном состоянии

Структура сварочных точек, полученных на различных режимах лазерной сварки приведена на рисунке 2.

	Рабочее напряжение 450 В	Рабочее напряжение 350 В
	Работа лазерной установки в одиночном режиме	
Форма импульса – П	Длительность импульса 5 мс, 	Длительность импульса 8 мс, 
Форма импульса – Т	Длительность импульса 13 мс, 	Длительность импульса 8 мс, 
	Работа лазерной установки в импульсном режиме	
Форма импульса – П	Длительность импульса 10 мс, частота импульсов 2 Гц, время выдержки 2 с 	Длительность импульса 8 мс, частота импульсов 4 Гц, время выдержки 2 с 
Форма импульса – Т	Длительность импульса 5 мс, частота импульсов 4 Гц, время выдержки 2 с 	Длительность импульса 10 мс, частота импульсов 4 Гц, время выдержки 2 с 

Рисунок 2 – Микроструктура сварочных точек полученных при увеличении 100 крат на металлографическом микроскопе МА-200 на различных режимах точечной импульсной лазерной сварки



При рассмотрении рисунка 2 отчетливо видно, что изменение режимов точечной импульсной лазерной сварки влияет на геометрические характеристики сварочной точки (глубина проплавления, диаметр). Кроме того, режимы сварки влияют и на форму зоны проплавления.

Согласно исследованиям, показанным в работах [1,5], а также собственного изучения структуры сварных точек при более высокой степени увеличения (рисунки 3...5) установлено, что в них можно выделить 3 явно выраженные области:

- 1) область основного металла, где существенных изменений структуру не происходит;
- 2) область термического влияния, где наблюдается несколько структурных составляющих, обуславливающих переход от основного к наплавленному металлу;
- 3) область наплавленного металла, имеет структуру полностью отличную от основного металла.

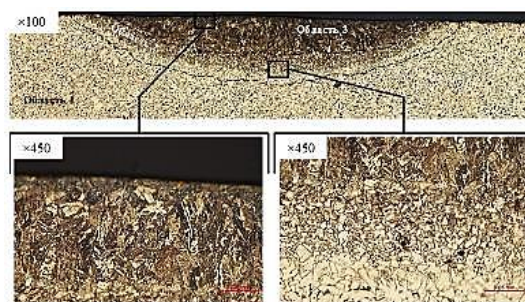


Рисунок 3 – Структурные составляющие сварной точки, полученной точечной импульсной лазерной сваркой при режимах: рабочее напряжение – 350 В; длительность импульса – 8 мс; частота импульса – 4 Гц; форма импульса – Т; время выдержки – 2 с

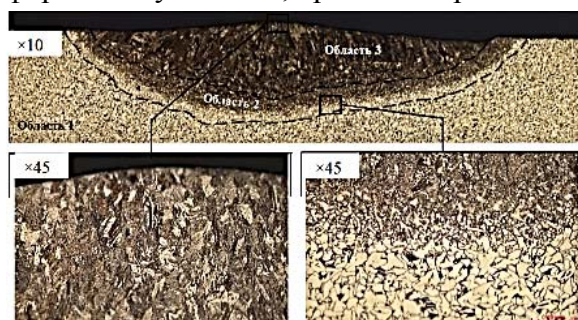


Рисунок 4 – Структурные составляющие сварной точки, полученной точечной импульсной лазерной сваркой при режимах: рабочее напряжение – 450 В; длительность импульса – 13 мс; форма импульса – П

Независимо от режимов сварки сварочная точка всегда имеет три вышеобозначенные области (рисунки 3–5). Высокое объемное содержание определенных структурных составляющих может оказать существенное, как положительное, так и негативное влияние. Исходная структура материала имеет высокую пластичность, но низкую твердость и механическую прочность, когда как металл в зоне термического влияния (структура отпущенного перлита) имеет уже более высокую твердость и прочность, но меньшую пластичность, для структуры наплавленного металла характерны высокие значения, как пластических, так и прочностных характеристик. Таким образом, наиболее благоприятным будут являться режимы точечной импульсной лазерной сварки, обеспечивающие низкое объемное содержание зоны термического влияния.

С целью определения объемного распределения основных областей сварочных точек по имеющимся микроструктурам, полученным на образцах из материала Ст3, которые подвергались лазерному воздействию на различных режимах с помощью установки для лазерной сварки BULAT LRS 300, были определены площади поперечного сечения при помощи программы T-Flex CAD, далее определялся объем наплавленного

металла, объем зоны термического влияния и общий объем сварочной точки. Для упрощения проводимых расчетов было принято, что сварочная точка имеет форму конуса. Поскольку края сварочной точки имеют выпуклую, а не плоскую форму, то при расчете объема его значение увеличивалось на 20 %. Расчет объема основных областей сварочных точек выполнялся по формуле:

$$V_{\text{зон}} = \frac{1}{3} \times S_{\text{зон}} \times H \times 1,2 \quad (1)$$

где  $V_{\text{зон}}$  – объем зоны, мм<sup>3</sup>;  $S_{\text{зон}}$  – площадь зоны, мм<sup>2</sup> (определялась по металлографиче-

ским снимкам в программе T-Flex CAD);  $H$  – глубина зоны, мм.

Согласно (1) были рассчитаны значения объемного распределения основных областей сварных точек, полученных точечной импульсной лазерной сваркой, на различных режимах. По полученным данным были построены гистограммы наглядно отражающие объемное распределение основных областей сварочной точки (рисунок 5).

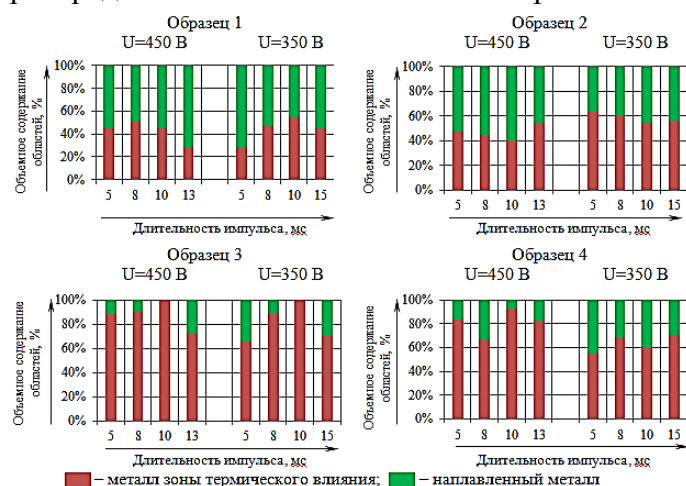


Рисунок 5 – Объемное распределение областей сварочных точек, полученных на различных режимах точечной импульсной лазерной сварки

Из рисунка 5 видно, что для образца 1 объем металла в зоне термического влияния изменяется от 29 до 55 %, для образца 2 – от 41 до 63 %, для образца 3 – от 65 до 90,5 % (данные полученные для точек 3 и 7 не учитывались), для образца 4 – от 55 до 92 %. Поскольку ранее было отмечено, что наиболее неблагоприятной структурой является структура отпущенного перлита, которая характерна для зоны термического влияния, то наиболее благоприятными режимами точечной импульсной лазерной сварки являются режимы сварки образца 1: использование импульса с прямоугольной формой, при величине рабочего напряжения 450 В без наличия пульсации лазерного луча.

Комбинируя данные, полученные для разных точек, можно однозначно установить влияние используемой формы импульса на соотношение наплавленного металла и металла зоны термического влияния в объеме полученной сварочной точки – использование импульса с П формой, но отношению к Т форме импульса практически во всех случаях обеспечивает меньшую долю металла в зоне термического влияния.

Влияние прочих параметров процесса точечной лазерной сварки на соотношение наплавленного металла и металла зоны термического влияния в объеме полученной сварочной точки носит неоднозначный характер, для определения каких-либо зависимостей требуется проведение дополнительных исследований.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бахматов П.В., Плетнев Н.О. Влияние режимов лазерной сварки тонкостенных конструкций на структуру и свойства сварных соединений из нержавеющей сталей // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2019. Т. 1. № 2(38). С. 82-89.

2. Ahmad G.N., Raza M.S., Singh N.K., Kumar H. Experimental investigation on Ytterbium fiber laser butt welding of Inconel 625 and Duplex stainless steel 2205 thin sheets // Optics and Laser Technology. 2020. Vol. 126. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106117

3. Gao X.-L., Li L.-K., Liu J., Wang X.-Q., Yu H.-K. Effect of laser offset on microstructure and mechanical properties of laser welding of pure molybdenum to stainless steel // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2020. Vol. 88, 105186. DOI: 10.116/j.ijrmhm.2020.105.186

4. Chen S., Huang J., Xia J. et al. Influence of Processing Parameters on the Characteristics of Stainless Steel/Copper Laser Welding // Journal of Materials Processing Technology. 2015. Vol. 222, p. 43-51. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.03.003

5. Вантеев М.О., Рубан К.Е., Григорьев В.В. Исследование особенности формирования сварной точки при воздействии единичным лазерным импульсом на поверхности низкоуглеродистой стали // В сборнике: Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. Материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в 3 ч.. Комсомольск-на-Амуре, 2020. С.37-40.

УДК 621.9:519.8

Саблин Павел Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Sablin Pavel Alekseevich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of «Mechanical Engineering», Komsomolsk-na-Amure State University  
Юрченко Максим Сергеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Yurchenko Maxim Sergeevich, student of Komsomolsk-na-Amure State University

## **НОВЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПОСЛЕ МЕХАНООБРАБОТКИ**

### **A NEW APPROACH TO THE ASSESSMENT OF SURFACE ROUGHNESS OBTAINED AFTER MACHINING**

Аннотация. В статье рассмотрен новый подход к оценке шероховатости поверхности после механической обработки, посредством данных динамических колебаний, снятых вовремя процесса точения и их взаимосвязанность. Для этого использовалась экспериментальная установка, позволяющая отслеживать колебания резца в момент резания. Сопоставления этих данных с значениями, приведёнными в ГОСТ 2789-73.

Abstract. The article considers a new approach to the assessment of surface roughness after machining, by means of dynamic vibration data taken during the turning process and their interconnectedness. For this purpose, an experimental setup was used, which allows tracking the vibrations of the cutter at the time of cutting. Comparison of these data with the values given in GOST 2789-73

Ключевые слова: параметры шероховатости; качество поверхности; динамика процесса резания.

Key words: roughness parameters; surface quality; dynamics of the cutting process.

Качество обработки поверхности является как составным параметром точности обработки, так и самостоятельным параметром.

Если обеспечение точности обработки достигается за счёт: жесткости системы СПИД, точных узлов станка и приспособлений, систем точного позиционирования и относится к области станкостроения. То качество обработки хоть и обеспечивает тре-

бования точности, относится к области процесса отделения от обрабатываемого материала стружки с помощью режущего клина и получение обработанной поверхности с заданными параметрами шероховатости [1].

Следует отметить, что решения вопросов обеспечения качества является комплексной задачей и требует методологического подхода.

Выполнены исследования по качеству поверхности в работах «Методика активного конироля шероховатости обрабатываемой поверхности точением» и «Взаимосвязь пространственных колебаний инструмента с шероховатостью обработанной поверхности на примере точения»

Из представленных выше работ, нет комплексного подхода к процессу получения заданной точности с учетом взаимовлияния всех факторов, т.к. многие параметры этих воздействий принимались как постоянные величины в процессе исследований. Однако в реальных условиях все параметры не постоянны [2].

Для формирования нового комплексного подхода, воспользуемся экспериментальным стендом (рисунок 1)

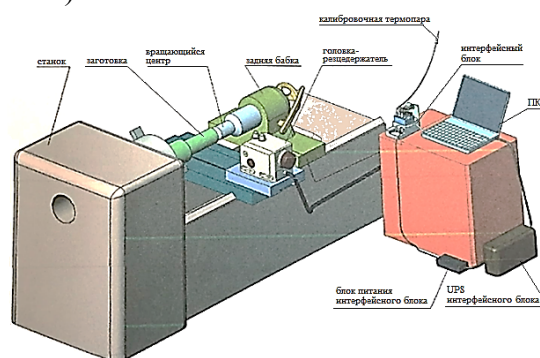


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Данный стенд позволяет построить динамическую картину всего процесса точения.

При этом, в работе «Методика активного конироля шероховатости обрабатываемой поверхности точением» показано, что динамическая устойчивость напрямую влияет на шероховатость.

В этой связи, появляется возможность воспроизвести будущую поверхность по картине динамической устойчивости (рисунок 2 и 3).

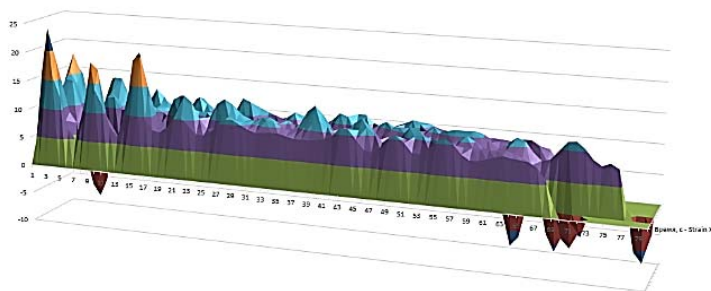


Рисунок 2 – График динамической нагрузки по Z

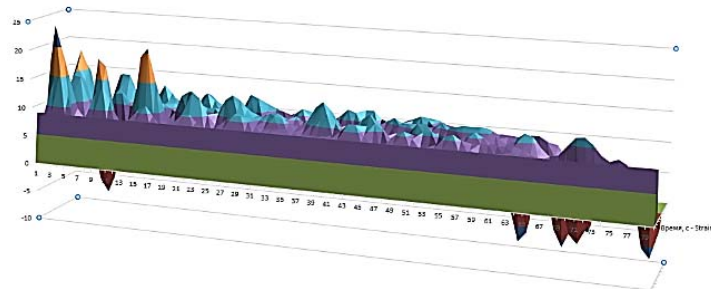


Рисунок 3 – График динамической нагрузки по Z с средним значением



Как видно из графика колебания инструмента, снимаемые датчиком в процессе точения поверхности, образуют своего рода поверхность, если вывести средние значения, то оно будет приближено к значению шероховатости по ГОСТ 2789-73 его условно можно приравнять к Ra8. Полное несовпадение можно объяснить другими факторами. Это колебание самой заготовки, т. к. датчик установлен на рездержателе, то эти колебания не фиксируются [4, 5].

Из опыта следуют выводы:

1. Есть корреляция между динамическими колебаниями и конечной шероховатостью поверхности после механической обработки.
2. По данным динамических колебаний, снятых вовремя обработки можно определить будущую шероховатость поверхности.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Саблин, П. А. Многофакторное влияние на шероховатость обработанной поверхности / П. А. Саблин, В. С. Щетинин // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2021. – Т. 25. – № 2(157). – С. 161-171. – DOI 10.21285/1814-3520-2021-2-161-171. – EDN AKTBLM.
2. Studies on the effect of output parameters on productivity when turning titanium alloys 6th International conference on industrial engineering (ICIE 2020) Серия Lecture Notes in Mechanical Engineering. Sochi, Russia, 2021 Издательство: Springer International Publishing Saviolov A.V., Serebrennikova A.G. S. 316-322.
3. Щетинин, В. С. Взаимосвязь пространственных колебаний с шероховатостью обработанной поверхности на примере точения / В. С. Щетинин, П. А. Саблин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 1(98). – С. 4-9. – DOI: 10.30987/1999-8775-2021-1-4-9. – EDN BUITZI.
4. Саблин, П. А. Высота микронеровностей и параметры шероховатости - комплексная оценка качества обработанной поверхности / П. А. Саблин, В. С. Щетинин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2020. – № 7(47). – С. 90-94. – EDN IEFPIF.

УДК 621.9:519.8

Саблин Павел Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Sablin Pavel Alekseevich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of «Mechanical Engineering», Komsomolsk-na-Amure State University

Юрченко Максим Сергеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Yurchenko Maxim Sergeevich, student of Komsomolsk-na-Amure State University

#### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ПО ОЦЕНКЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ**

#### **EXPERIMENTAL SETUP FOR ASSESSING THE DYNAMIC STABILITY OF THE CUTTING PROCESS**

Аннотация. В статье говорится об экспериментальной установке для фиксирования динамических колебаний токарного резца в процессе механической обработки металла. Данные, полученные при измерениях на этом стенд сразу заносятся в программное обеспечение на компьютере, где с ними в дальнейшем удобно работать и совершать дальнейшие манипуляции.

Abstract. The article talks about an experimental installation for fixing the dynamic vibrations of a turning tool in the process of metal machining. The data obtained during measurements on this stand are immediately entered into the software on the computer, where it is convenient to work and perform further manipulations in the future.

Ключевые слова: динамические колебания; динамика процесса резания, измерительный прибор, шероховатость, чистота поверхности.

Key words: dynamic vibrations; dynamics of the cutting process, measuring device, roughness, surface cleanliness.

Во время металлообработки точением происходят различные процессы, влияющие на конечные параметры получаемой поверхности. Одним из таких параметров является шероховатость. Чтобы предложить новый способ оценки шероховатости была собрана экспериментальная установка.

Устройство служит для проведения научно-исследовательской деятельности с целью изучения динамических и тепловых процессов в металлообработке на различных режимах в составе токарных станков.

В состав стенда входит:

- головка-резцедержатель;
- интерфейсный блок;
- персональный компьютер (ПК) (в комплект поставки не входит);
- комплект кабелей в сборе.

Головка-резцедержатель закрепляется на суппорте станка и содержит комплекс датчиков, фиксирующих динамическое и вибрационное воздействие на токарный резец и преобразующих их в электрические сигналы, передаваемые на интерфейсный блок.

Интерфейсный блок имеет блочную структуру и состоит из отдельных электронных блоков. Электронные блоки располагаются в шасси, подключаемом к ПК через разъём USB2.0.

Головка-резцедержатель и интерфейсный блок приведены соответственно на рисунках 1 и 2.

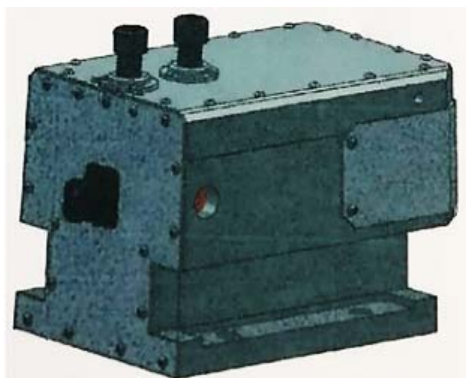


Рисунок 1 – Внешний вид головки-резцедержателя

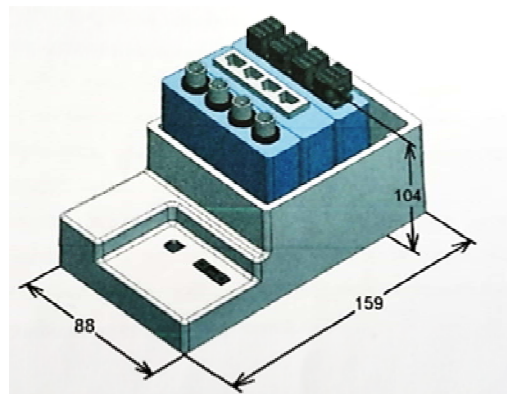


Рисунок 2 – Внешний вид и габаритные размеры интерфейсного блока

Обязательным компонентом экспериментальной установки является персональный компьютер. Минимальные требования к ПК: объём оперативной памяти – 1ГБ, объём видеопамати – 512МБ, минимальный объём свободного места на жестком диске – 1,4ГБ, наличие высокоскоростного порта USB2.0, наличие DVD-R дисковод, графическое разрешение дисплея 1366x768, Операционная Система WINDOWS XP, WINDOWS 7.

Схема расположения элементов стенда приведена на рисунке 3. Головка-резцедержатель монтируется на суппорте станка вместо штатного резцедеожателя.

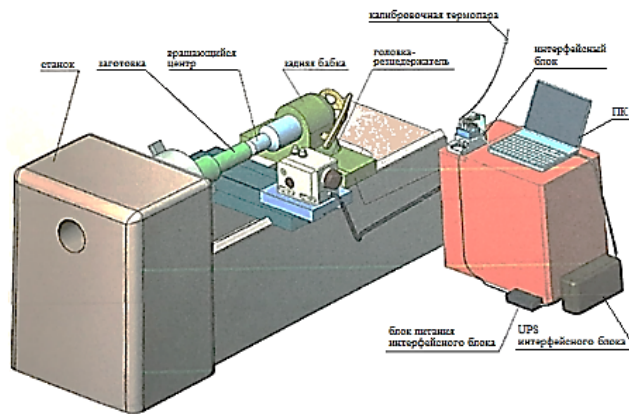
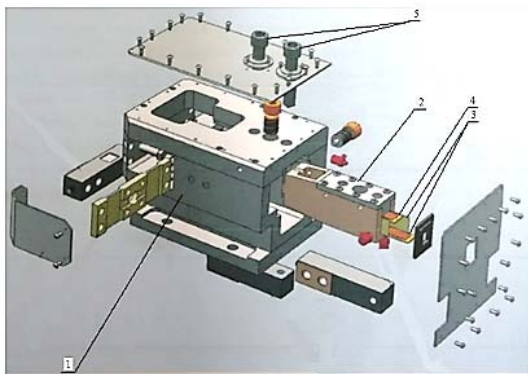


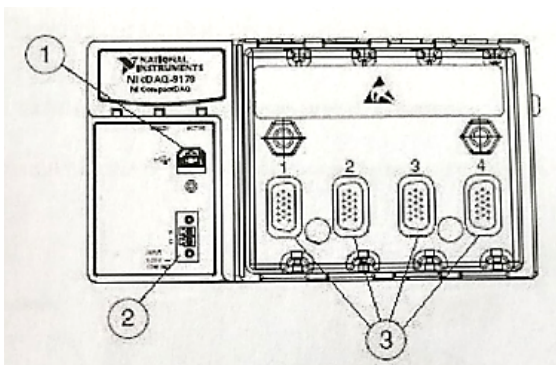
Рисунок 3 – Схема расположения элементов станда

Конструкция головки-резцедержателя представляет собой жесткую систему (рисунок 4). Резец устанавливается в люльку 2, изолированную от корпуса 1 головки-резцедержателя изолирующими пластинами 3 и 4 и зажимается винтами 5. При этом державка резца прижимается к нижней изолирующей пластине, на которой предусмотрена контактная площадка для съема сигнала одного из полюсов естественной термопары. На верхней площадке съемной электроизолирующей пластины 4 установлена стальная пластина, на которую давят зажимные болты 5.



- 1 – корпус; 2 – люлька; 3 – встроенные изолирующие пластины;
- 4 – съемная изолирующая пластина;
- 5 – зажимные винты

Рисунок 4 – Конструкция головки-резцедержателя с разнесенными элементами



- 1 – гнездо подключения кабеля USB;
- 2 – гнездо подключения внешнего питания 9-30 В, 3 – разъёмы подключения модулей сбора данных

Рисунок 5 – Внешний вид шасси NI cDAQ-9174

Интерфейсный блок (см. рисунок 2) служит для сбора сигналов с датчиков, переноса их в формат High-Speed USB2.0 и передачи на USB-порт ПК. Интерфейсный блок представляет собой сборную конструкцию и состоит из электронных блоков.

Электронные модули сбора данных NI-9234, NI-9237 и NI-9219 установлены в шасси NI cDAQ-9174. Внешний вид шасси NI cDAQ-9174 приведен на рисунке 5.

Соединение модулей сбора данных с основной шасси происходит на заранее предусмотренные пазы, обеспечивающие стыковку разъемов модулей сбора информации с соответствующим разъемом задней стенки шасси. Внешний вид модулей сбора данных приведен на рисунке 6.

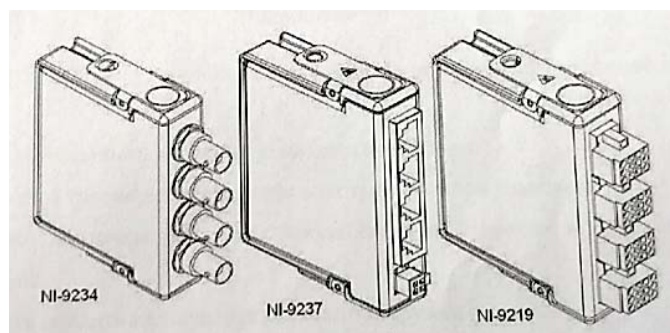


Рисунок 6 – Внешний вид модулей сбора данных

Представленная экспериментальная установка позволяет снимать показания динамических колебаний во время процесса точения и переводить их в электронный вид, где работа с ними в дальнейшем упрощается.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 1 NI-9234 Getting Started. Austin, Texas, 2022 Издательство: NATIONAL INSTRUMENTS Engineer Ambitiously, с. 1-9

УДК 621.791

Старничук Екатерина Павловна, магистр, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Starnichuk Ekaterina Pavlovna, master of Komsomolsk-na-Amure State University

Кравченко Александр Сергеевич аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Kravchenko Alexander Sergeevich postgraduate student of Komsomolsk-na-Amure State University

Бахматов Павел Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология сварочного и металлургического производства им. В.И. Муравьева», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Bakhmatov Pavel Vyacheslavovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Technology of Welding and Metallurgical Production named after V.I. Muravyev", Komsomolsk-na-Amure State University

#### КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ В WeldCNC

#### OSCILLATORY MOVEMENTS IN WeldCNC

Аннотация. В статье представлены результаты процесса разработки сварочной управляющей программы WeldCNC предназначенной для управления роботизированным комплексом аргонодуговой сварки. Рассмотрены различные траектории перемещения сварочной горелки, которые могут способствовать обеспечению качества сварных соединений за счёт перемешивания сварочной ванны и дегазации зародышей пор.

Abstract. The article presents the results of the process of developing a welding control program WeldCNC designed to control a robotic argon arc welding complex. Various trajectories of the welding torch movement are considered, which can contribute to ensuring the quality of welded joints by mixing the welding bath and degassing the pore nuclei.

Ключевые слова: дуговая сварка, техника выполнения, манипуляции, дуга, форма валика, траектория, сварочная управляющая программа.

Key words: arc welding, execution technique, manipulation, arc, bead shape, trajectory, welding control program.

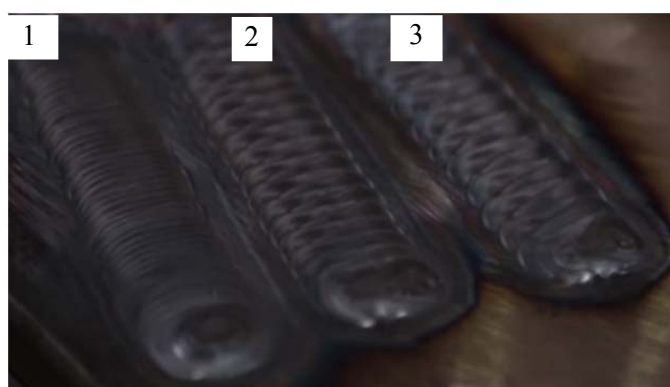
## Введение

Дуговая сварка нашла широкое применение во всех отраслях и большинство авторов посвящают статьи улучшению самого процесса, оборудованию, сварочных материалов. Ежегодно разрабатываются множество программ для оптимизации техники и технологии сварки.

Управлять формированием валика можно по-разному: с помощью скорости сварки (рисунок 1), с импульсной или непрерывной подачей сварочной проволоки (рисунок 2), различных методик колебательных движений и с помощью управляющих программ сварочной установки [1].

Подготовка управляющих программ для системы управления сварочной установкой проходит по уже разработанной основе программирования по ISO 6983-1:2009.

Система поддерживает различные команды перемещения сварочного сопла, отключение и включения механизма, режимы координат, скорость перемещения, выбора рабочей плоскости, установка значения сварочного тока. Система координат ориентирована на начало координат – на оси шва в точке начала шва. Координат «X», «Y» и «Z».



1 – большая скорость; 2 – средняя скорость; 3 – низкая скорость

Рисунок 1 – Скорость сварки

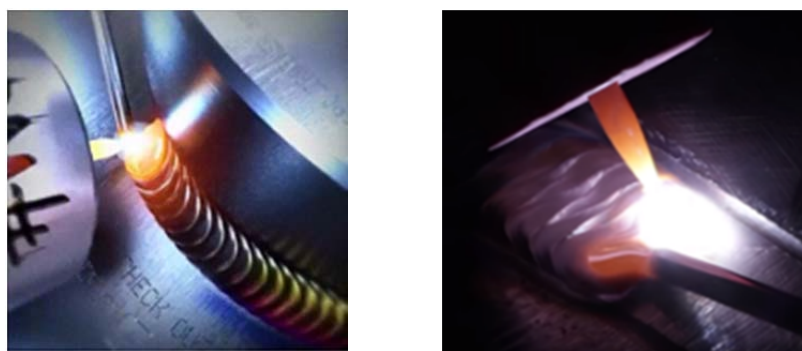


Рисунок 2 – Импульсная и непрерывная подача проволоки

Для автоматизации процесса разработки сварочных управляющих программ была разработана специальная утилита – WeldCNC (рисунок 3).

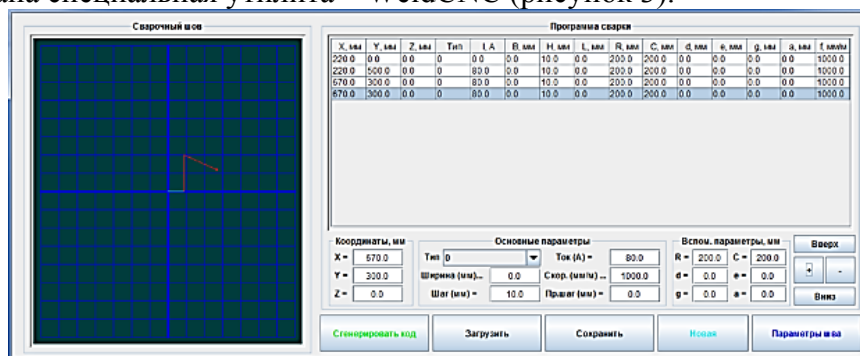


Рисунок 3 – Интерфейс программы WeldCNC



Траектория перемещения сварочной горелки разбивается на линейные сегменты, которые заносятся в поле «Программа сварки». Сегменты заносятся путём указания координат их узлов. В поле «Сварочный шов» графически отображается траектория перемещения сварочной горелки. Зелёным цветом показано перемещение с выключенным сварочным током, красным – с включенным током.

Для каждого сегмента указываются:

- тип перемещения;
- параметры траектории (ширина поперечного перемещения, шаг смещения, радиусы перемещений и т.д.);
- линейная скорость перемещения сварочной горелки;
- величина сварочного тока.

После ввода всех указанных параметров нажимается кнопка «Сгенерировать код», после чего происходит создание управляющего кода для сварочной установки.

Программа позволяет реализовать 34 траектории перемещения сварочного сопла на рисунке 4 представлены некоторые из них и одну универсальную настраиваемую двухшажную траекторию (рисунок 5).

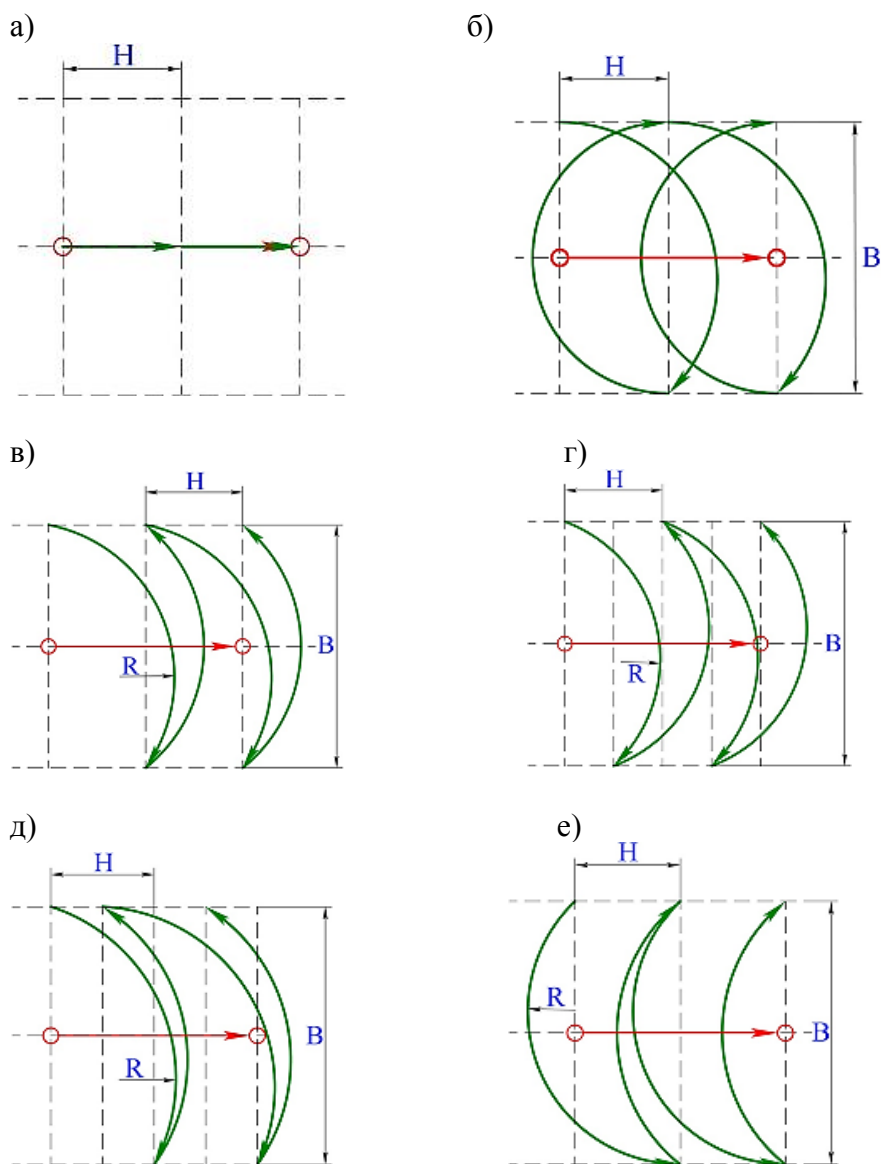


Рисунок 4 – Типы траекторий перемещения сварочной горелки:

а – тип 0; б – тип 1; в – тип 2; г – тип 3; д – тип 4; е – тип 5

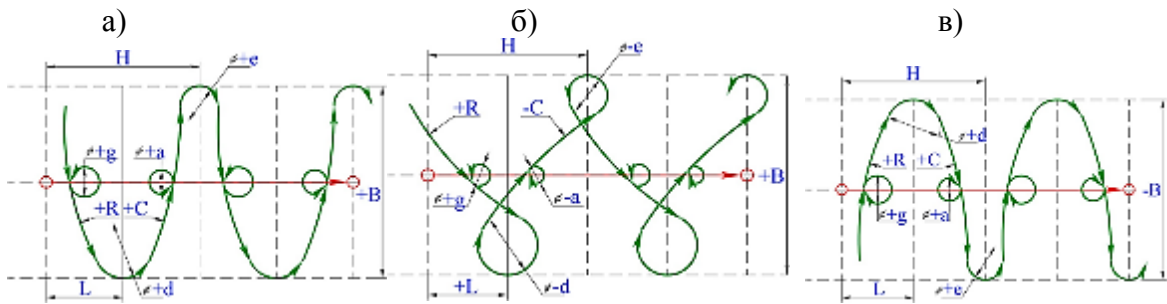


Рисунок 5 – Применение универсальной двухшажной траектории:  
а – зигзаг со скруглениями; б – восьмёрка; в – зеркальный зигзаг

Для визуализации процесса настройки параметров двухшажной траектории предусмотрен модуль «Параметры шва» (рисунок 6).

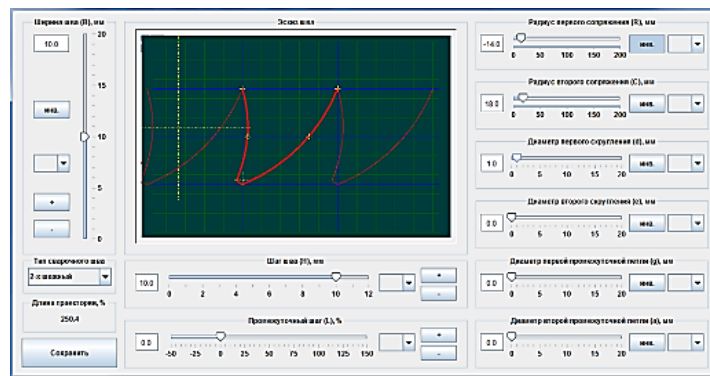


Рисунок 6 – Панель настройки параметров универсальной траектории

Параметр «Ширина шва» определяет величину поперечного перемещения сварочной горелки. Отрицательное значение ширины шва означает зеркальное отображение траектории относительно оси «0X».

Параметр «Шаг шва» определяет перемещение сварочного сопла вдоль оси шва за один шаг – расстояние по оси «0X» между одноимёнными точками соседних шагов. Лучше всего с этой задачей справляются программные симуляторы с визуализацией процесса симулирования. Наиболее простые симуляторы: NC Corrector (рисунок 7); G-code Viewer; NC Viewer; G-Code Analyzer; gCode Viewer; SEDIT; NCStudio; universal g-code sender; G-Code Q'n'dirty toolpath simulator; G-Wizard; NCPlot; CIMCO Edit; TKCNC и др.

Проверка осуществляется как в пошаговом режиме, так и в автоматическом, а также путём просмотра всей траектории перемещения сварочной горелки.

При обнаружении ошибок симуляторы позволяют оперативно корректировать управляющую программу и визуализировать результаты исправлений.

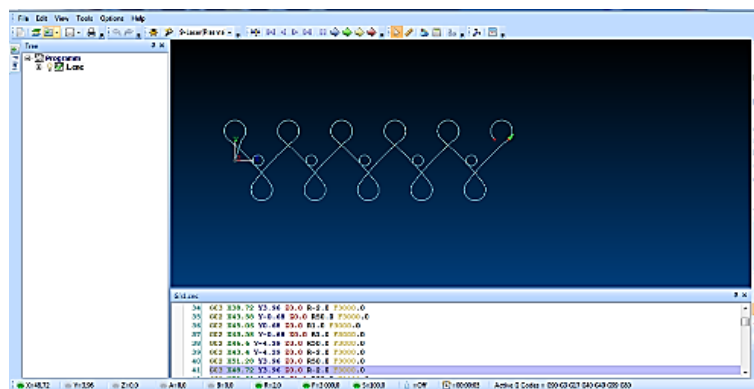


Рисунок 7 – Интерфейс программы NC Corrector

После симуляции работы управляющей программы она загружается в систему управления сварочной установкой.

После загрузки управляющей программы, перед началом сварки рекомендуется проверить перемещение механизмов в «холодном» режиме – без включения сварочного тока во избежание возникновения аварийных ситуаций вследствие ошибок в управляющей программе.

#### **Выводы**

Колебательные движения, естественно, снижают общую скорость сварки, увеличивают ширину ЗТВ и время существования сварочной ванны. Последнее, как известно, положительно отражается на качестве сварных швов, позволяя провести дегазацию сварочной ванны и снизить порообразование, особенно стартовых пор. Но остальные параметры скажутся на деформационной картине.

**Благодарности.** Научно-исследовательские работы выполнены за счёт средств ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (грант № ВН001/2020).

#### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Оборудование, техника и технология сварки и резки металлов: учебник / В.В. Овчинников. –М.: КНОРУС, 2010.-304 с. –(начальное профессиональное образование).

УДК 621.791.04

Старцев Егор Андреевич, аспирант, старший преподаватель кафедры «Технология сварочного и металлургического производства имени В.И. Муравьева», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Startsev Egor Andreevich, postgraduate student, senior lecturer of the Department "Technology of Welding and Metallurgical Production named after V.I. Muravyev", Komsomolsk-na-Amure State University

### **О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ОТХОДОВ**

### **ON THE POSSIBILITY OF CREATING AND APPLICATION OF WELDING CONSUMABLES FROM MAN-MADE AND MINERALOGICAL WASTE**

Аннотация. Данная работа посвящена созданию сварочных материалов из техногенных и минералогических отходов по разработанной технологии, а также возможности их применения. Одним из перспективных направлений в создании технологий формирования качественных покрытий и наплавов является применение сварочных материалов, содержащих в качестве наполнителей переработанные техногенные отходы металлургических производств (шлаков). Однако широкое распространение этого направления сдерживается отсутствием данных о зависимостях и закономерностях влияния элементов, содержащихся в техногенных отходах на структуру и свойства получаемых покрытий. Установлена возможность переработки металлургических шлаков, и их дальнейшее использование в качестве сварочных материалов.

Abstract. This work is devoted to the creation of welding consumables from man-made and mineralogical wastes according to the developed technology, as well as the possibility of their application. One of the promising directions in the creation of technologies for the formation of high-quality coatings and surfacings is the use of welding consumables containing recycled technogenic waste from metallurgical industries (slags) as fillers. However, the wide spread of this direction is constrained by the lack of data on the dependences and regularities of the influence of elements contained in industrial waste on the structure and properties of the re-



sulting coatings. The possibility of processing metallurgical slags and their further use as welding materials has been established.

Ключевые слова: сварочные материалы, флюс, порошковая проволока, наплавка, сварка, металлургический шлак, минералогические отходы, переработка отходов, микроструктура, химический состав.

Key words: welding consumables, flux, flux-cored wire, surfacing, welding, metallurgical slag, mineralogical waste, waste processing, microstructure, chemical composition.

### **Введение**

Хоть и известно то, что все сварочные флюсы, и технологии их получения, для автоматической сварки и наплавки изобретены с 40-х по 90-е годы, в настоящее время активно ведется поиск новых решений и технологий в данной отрасли. Связано это с истощением минеральных ресурсов и ухудшением экологической обстановки в стране. В мировой практике производство высококачественных сварочных материалов основывается на использовании дорогостоящих технически чистых оксидов и фторидов с введением дополнительных легирующих элементов в состав флюса, что существенно увеличивает себестоимость сварочных материалов. Все вышеперечисленное вынуждает предприятия искать альтернативные и экономичные источники сырья.

Возможность использования альтернативных и экономичных источников видится в применении техногенных и минералогических отходов различных предприятий в качестве основного сырья для производства сварочных материалов. Данные ресурсы находятся поблизости к производствам и их мощностям, пригодных для их получения, поэтому создание на их базе производства новых сварочных материалов поможет избавиться от импортозамещения, а также повысит эффективность использования минеральных ресурсов [1]. Преимуществом создания такого производства будет снижение количества отходов различных предприятий и улучшение экологии в регионах нашей страны. Так как данные отходы имеют более низкую стоимость, то будет достигаться необходимый экономический эффект.

### **Основная часть**

В ходе работы был проанализирован металлургический шлак, находящийся на шлакоотвале г. Комсомольска-на-Амуре. Он представляет из себя высокоабразивный побочный продукт выплавки стали местного металлургического предприятия, который имеет следующий химический состав, мас. %: CaO=15,4-21,03; MgO=2,33-3,81; SiO<sub>2</sub>=8,7-14,94; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=4,87-7,73; FeO=48,24-66,05; MnO=5,56-5,98

В работе [2] авторами приведена возможная технология по переработке металлургического шлака. Заключается она в жидкофазном восстановлении железа из шлака путем его переплава, например, в электрической печи сопротивления, с использованием восстановителя, тем самым уменьшая в нем содержание железа и усредняя химический состав.

В работах [3-4] приведены результаты опыта по автоматической сварке, где в качестве сварочного флюса используется переработанный металлургический шлак. Для получения двухстороннего сварного соединения с использованием экспериментального флюса подготовлены образцы из стали марки Ст3. Размер образцов составляет 440x195x4 мм. Заготовки собирались без зазора и разделки кромок, тип соединения С7 согласно ГОСТ 8713-79. Режимы сварки: сварочный ток – 210 А, напряжение – 34 В, скорость сварки – 28 см/мин. Сварка образцов осуществлялась на сварочном аппарате АДФ-1250 в сочетании со сварочным выпрямителем ВДУ-1250 с применением сварочной проволоки Св08Г2с диаметром 3 мм.

В процессе визуально-измерительного контроля установлено, что разработанный сварочный флюс обеспечивает оптимальную защиту сварочной ванны, так как на поверхности сварного шва отсутствуют дефекты. Полученный сварной шов представлен на рис. 1. Механические свойства неразъемных соединений оценивались на статическое растяжение с использованием испытательной машины Instron 3382, ударный изгиб оце-

нивался на ударном копре JB-300W. Так как показателем прочности сварного соединения при испытании на статическое растяжение при нормальной температуре является место разрыва образца то можно сделать вывод о том, что прочность большинства образцов удовлетворительная, ведь разрыв произошел в зоне основного металла. При сравнении показателей предела прочности, предела текучести, предела пропорциональности и относительного удлинения с данными по ГОСТ 14637-89 на сталь марки Ст3 подавляющее большинство показателей имеют значения удовлетворяющими данным.

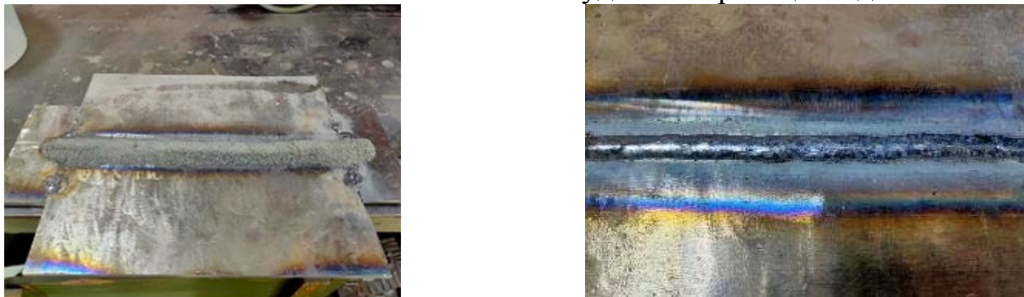


Рисунок 1 – Внешний вид сварного соединения при сварке под слоем экспериментального флюса

В работе [5] приведены результаты по наплавке порошковой проволокой, созданной с применением переработанных металлургических шлаков. Всего в работе применялись 6 порошковых проволок, в которых в качестве наполнителей, использовали металлургический шлак и вторичный металлургический шлак с добавлением графита в пропорциях 0%, 1.8% и 10% от массы основного материала. Наплавку порошковой проволокой проводили на установке для автоматической сварки АДФ-1201 с источником питания ВДУ-1201 на пластины из Ст3 в пять слоев для исключения перемешивания наплавляемого металла со сталью подложки. Режимы сварки: сварочный ток - 450 А, напряжение - 40-45 В, скорость сварки - 1-2 м/ч. Визуальный анализ поверхности наплавленных покрытий свидетельствует об удовлетворительном качестве образцов №1, №5 и №6. Для образцов №2, №3 и №4, характерно большее количество пор, выходящих на поверхность. В процессе изучения химического состава поверхности наплавленного металла, установлено, что химический состав практически не отличается от основного металла для всех образцов, за исключением повышения содержания углерода, марганца и кремния в образце №5. То же самое можно сказать о показателях твердости и микротвердости наплавленных образцов, так как в образце №5 они выше по сравнению с остальными.

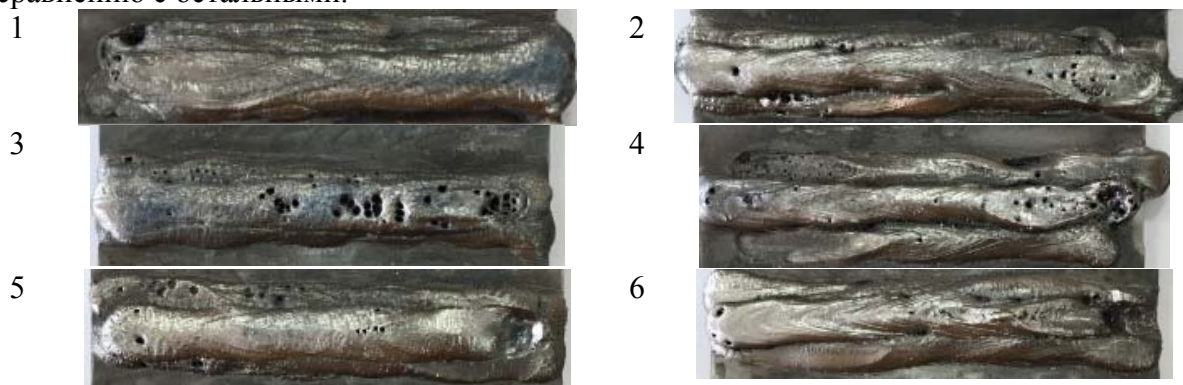


Рисунок 2 – Внешний вид наплавленных валков, полученных с применением разработанных порошковых проволок

### Заключение

В настоящее время поиск путей переработки техногенных отходов, таких как металлургические шлаки, является актуальной задачей. Одним из перспективных направлений в создании технологий формирования качественных покрытий и наплавов является применение сварочных материалов, содержащих в качестве наполнителей переработанные техногенные отходы металлургических производств (шлаков). Однако

широкое распространение этого направления сдерживается отсутствием данных о зависимостях и закономерностях влияния элементов, содержащихся в техногенных отходах на структуру и свойства получаемых покрытий. Проведенные исследования показывают возможность переработки металлургических шлаков, и их дальнейшее использование в качестве сварочных материалов.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чеканова, Ю. В. Новые компоненты сварочных материалов с использованием сырья Кольского полуострова: кондиционирование, синтез и взаимодействие: дис. канд. тех. наук : 05.16.02 / Чеканова Юлия Викторовна. – Апатиты., 2015. – 157 с.

2. Бахматов П.В., Старцев Е.А., Григорьев В.В., Брянский А.А. Проблема дефицита лома на металлургическом заводе "Амурсталь" и поиск альтернатив его замещения // Металлург. 2022. № 4. С. 25-30.

3. Bakhmatov P.V., Startsev E.A., Sobolev V.M. Impact and effect study of sub-merged-arc welding conditions on structural changes in weld metal // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Т. 200. С. 65-76.

4. Лапашинов А.А., Бахматов П.В., Старцев Е.А. Влияние экспериментального сварочного флюса на поверхность сварного соединения // В сборнике: Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. Материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 4-х частях. 2021. С. 95-97.

5. Михайлов К.А., Клешина О.Н., Бахматов П.В., Старцев Е.А. Особенности применения сварочной порошковой проволоки с экспериментальными наполнителями при послойной наплавке // В сборнике: Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. Комсомольск-на-Амуре, 2022. С. 67-69.

УДК 621.791

Стробыкин Никита Алексеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Strobykin Nikita Alekseevich, student of Komsomolsk-na-Amure State University

Бахматов Павел Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология сварочного и металлургического производства им. В.И. Муравьева», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Bakhmatov Pavel Vyacheslavovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Technology of Welding and Metallurgical Production named after V.I. Muravyev", Komsomolsk-na-Amure State University

Григорьев Владимир Владимирович, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Grigorev Vladimir Vladimirovich, post-graduate student of Komsomolsk-na-Amure State University

#### **ПРОБЛЕМЫ СВАРКИ ДЛИННОМЕРНЫХ РЕБРИСТЫХ ТИТАНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ НА АВТОМАТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ УСП-5000**

#### **PROBLEMS OF WELDING OF LONG-DIMENSIONAL RIBBED TITANIUM PANELS ON USP-5000 AUTOMATIC PLANT**

Аннотация. Данная работа посвящена конструктивным и технологическим проблемам, влияющих на качество сварных соединений длинномерных ребристых титановых панелей на автоматической установке УСП-5000. Проанализированы проблемы работоспособности сварочного стапеля, которые затрудняют производственное при-

менение на Комсомольском-на-Амуре авиационном заводе имени Ю. А. Гагарина. Определены преимущества применения установки УСП-5000, которые могут способствовать дальнейшему внедрению в серийное производство.

Abstract. This work is devoted to the structural and technological problems affecting the quality of welded joints of long-ribbed titanium panels on the USP-5000 automatic installation. The problems of working capacity of the welding slipway, which complicate the production application at the Komsomolsk-on-Amur Aviation Plant named after Yu.A. Gagarin, are analyzed. The advantages of using the USP-5000 installation have been identified, which can contribute to further introduction into serial production.

Ключевые слова: титан, УСП-5000, поры, недостатки, сварной шов, аргонодуговая сварка.

Key words: titanium, USP-5000, pores, flaws, welds, argon-arc welding.

### **Введение**

Одним из востребованных в авиастроении материалом является титан и его сплавы, благодаря ряду преимуществ: высокая коррозионная стойкость, высокая удельная усталостная прочность, повышенная жаростойкость и ряду других свойств. Титан обладает хорошей совместимостью в отношении коррозионной активности и коэффициента теплового расширения с углепластиком, что определяет широкие возможности его применения для летательных аппаратов и авиадвигателей.

### **Основная часть**

На Комсомольском-на-Амуре авиационном заводе имени Ю. А. Гагарина на стадии проектирования и запуска в производство новых изделий планировалось изготовление деталей с выполнением сварных швов длиной более 2500 мм (панели стабилизатора, стенки ЗОГРО). На имеющемся оборудовании УСП-2,6 выполнить такие конструкции автоматической сваркой, согласно ПИ 1.4.1898-2003 [1] невозможно.

По мере выполнения конструктивно-технологической проработки указанных конструкций, изменение, согласование и т.д., с перспективой на будущее было принято решение о приобретении нового стапеля, позволяющего выполнять сварные швы, протяженностью до 5000 мм. Из-за специфики технологии создания неразъемных соединений длинномерных титановых конструкций подобрать оборудование по каталогам предприятий-изготовителей не удалось, поэтому проектирование и изготовление нового стапеля УСП-5000 (рисунок 1) выполнено НИТИ «Прогресс», при этом было проведено ознакомление специалистов с технологическим процессом сварки и конструкцией используемого оборудования [2].



Рисунок 1 – Внешний вид автоматической аргонодуговой установки УСП-5000

Однако в проекте установки УСП-5000 не были учтены особенности технологии производства сварных панелей из титановых сплавов на предприятии. Ряд конструктивных недостатков установки значительно затрудняют её использование:

- в процессе сварки длинномерных образцов было выявлено, что после выполнения 1 м шва происходит затухание дуги. Данное явление происходит из-за «упирания»

вольфрамового электрода в поверхность образцов, из-за отсутствия параллельности поверхности опорной балки и траектории движения сварочной головки. Для решения данной проблемы был установлен модуль АРНД (автоматическая регулировка напряжения дуги), который регулирует постоянное расстояние между электродом и свариваемой деталью, но только при напряжении выше 10,5 В.

- невозможно выполнять сборку конструкций под сварку непосредственно на опорной балке стапеля с использованием прижимных клавиш стапеля. Сборка под сварку должна выполняться на выкатной платформе в специальных приспособлениях, фиксирующих свариваемые детали и теплоотводные пластины от падений и смещений при сборке и закатывании платформы под стапель. Количество и размеры сборочных приспособлений определяются конфигурацией и габаритами свариваемых сборок.

- установка приспособлений и деталей, их выставление, фиксация, закатывание-выкатывание платформы удлиняют цикл сварки.

- невозможно выполнять контроль стыковки кромок деталей непосредственно перед сваркой после закатывания тележки с собранной конструкцией.

- установка приспособлений и деталей, их выставление, фиксация, закатывание-выкатывание платформы удлиняют цикл сварки.

- перед сваркой каждого шва необходимо выполнять запись траектории в цикле «обучение», а также проверку и корректировку программы сварки без зажигания дуги в режиме «полуавтомат», что удлиняет цикл сварки.

- невозможно контролировать формирование сварных швов в процессе сварки (сварщик фактически варит «вслепую»), велика вероятность брака из-за сварочных дефектов.

- конструкцией не предусмотрено нахождение сварщика вблизи зоны сварки. При необходимости сварщик перемещается по прижимным балкам установки на опасной высоте.

Несмотря на перечисленные недостатки, установка имеет ряд возможностей, которые увеличивают ее рабочий потенциал [3]:

- при помощи программного обеспечения можно контролировать траекторию колебательных движений сварочной головки, а также уменьшить величину усиления внутреннего и наружного валика шва;

- наличие сварочного аппарата для сварки и пайки плазмой, а также для сварки ВИГ и ручной сварки стержневыми электродами TETRIX 400 PLASMA значительно увеличивает область применения и возможности установки;

- имеет высокую надежность сварки трудно свариваемых металлов благодаря высокому функционалу;

- шаговое перемещение и пульсирующая подача сварочной проволоки могут упростить контроль сварочной ванны.

### **Заключение**

Из вышеперечисленного можно сделать вывод, что сварочный стапель УСП-5000 имеет ряд конструктивных недостатком которые, затрудняют его производственное применение, но его возможности и значимость в производстве вынуждают проводить конструктивные доработки и отработку режимов сварки. Благодаря чему ожидается повышение производительности труда, снижение дефектов, улучшение условий труда сварщиков.

### **Благодарности**

Научно-исследовательские работы выполнены за счёт средств ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (грант № ВН001/2020).

### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. ПИ 1.4.1898-2003. Сварка дуговая сплавов титана в среде защитных газов. – Введ. 2004-01-01. – М.: Производственная инструктория, 2004. – 114 с.

2. Установки для автоматической аргодуговой сварки продольных швов // NITI-PROGRESS.RU: ежедн. интернет-изд. 2016. 23 мар. URL: <http://niti-progress.ru/argonodugovaya-svarka/ustanovki-dlyaavtomaticheskoy-argonodugovoj-svarki-prodolnykh-shvov#4> (дата обращения: 01.11.2022).

3. Григорьев, В.В. Бахматов, П.В. Мазур, С.П. Применение установки УСП-5000 для сварки крупногабаритных оребренных титановых панелей. В сборнике научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 47-й научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 10-21 апреля 2017 г. / редкол.: Э.А. Дмитриева (отв. ред.) [и др.]. - Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2017. – 299-301 с.

УДК 621.78

Сунь Лэйсинь, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Sun Leisin, student of Komsomolsk-na-Amure State University

Григорьев Владимир Владимирович, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Grigorev Vladimir Vladimirovich, postgraduate student of Komsomolsk-na-Amure State University

Бахматов Павел Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология сварочного и металлургического производства», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Bakhmatov Pavel Vyacheslavovich, Candidate Of Technical Sciences, Associate Professor, Head Of The Department "Technology of welding and metallurgical production", Komsomolsk-na-Amure State University

## **ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT20 В УСЛОВИЯХ ФАЗОВОГО ПРЕДПРЕВРАЩЕНИЯ**

### **HEAT TREATMENT OF WELDED JOINTS MADE OF TITANIUM ALLOY VT20 UNDER CONDITIONS OF PHASE PRE-TRANSFORMATION**

Аннотация. Настоящая работа посвящена выявлению рациональных режимов термической обработки сварных соединений титановых сплавов в условиях фазового предпревращения. Исследования выполнены на сварных образцах из титанового сплава VT20, полученные электронно-лучевой сваркой на установке КЛ-144. Термическая обработка в условиях фазового предпревращения выполнена при температуре  $980 \pm 5^\circ\text{C}$  с выдержкой образцов в интервале 15-240 с., с применением глицерина в качестве защитного слоя. По результатам испытаний на статическое растяжение и ударный изгиб установлено удовлетворительное качество сварных соединений. Удовлетворительные результаты статических и динамических испытаний для образцов 80x5x10 мм получены в интервале от 60 до 90 с., для образцов 55x10x10 мм от 90 до 140 сек.

Abstract. The present work is devoted to the identification of rational modes of heat treatment of welded joints of titanium alloys under conditions of phase pre-transformation. The studies were performed on welded samples made of titanium alloy VT20, obtained by electron beam welding at the KL-144 installation. Heat treatment under the conditions of phase pre-conversion was performed at a temperature of  $980 \pm 5^\circ\text{C}$  with sample exposure in the range of 15-240 seconds, with the use of glycerin as a protective layer. According to the results of tests for static tension and impact bending, the satisfactory quality of welded joints has been established. Satisfactory results of static and dynamic tests for 80x5x10 mm samples were obtained in the range from 60 to 90 seconds, for 55x10x10 mm samples from 90 to 140 seconds.



Ключевые слова: термическая обработка, титановые сплавы, электронно-лучевая сварка, фазовое предпревращение, статическое растяжение, ударный изгиб  
Key words: heat treatment, titanium alloys, electron beam welding, phase pre-rotation, static stretching, impact bending

Выбор и применение титановых сплавов в современной авиационной промышленности обусловлен рядом важных преимуществ титановых сплавов по сравнению с другими конструкционными материалами: высокая удельная усталостная прочность, коррозионная стойкость, повышенная жаростойкость и многими другими полезными свойствами [1].

Традиционно на филиале ПАО "ОАК" - "КнААЗ им. Ю.А. Гагарина" для снятия внутренних остаточных напряжений применяется отжиг силовых титановых конструкций в вакуумной печи УВН-1500 при 750°C в течение 30 минут, старение в течении 10 часов при температуре 550°C [2].

Известны также иные способы термической обработки сварных соединений титановых сплавов: ступенчатый отжиг, предварительный отжиг и упрочняющая обработка, локальная термическая обработка после сварки электронным лучом, а также термоциклическая обработка [3].

Учитывая сложности проведения традиционных режимов термической обработки (размеры вакуумных установок, термофиксация, выход на температурный режим, и последующий процесс охлаждения) остается актуальным вопрос в области изыскания экономически выгодных режимов и способов термической обработки, способствующих уменьшению трудоемкости с обеспечением свойств сварных соединений идентичных свойствам основного металла. В данной области заслуживают внимания процессы термической обработки в условиях фазовых превращений, которые могут способствовать снижению трудоемкости и повышению свойств сварных соединений титановых сплавов.

Целью настоящей работы является установление рациональных режимов термической обработки в условиях фазового предпревращения титанового сплава BT20.

Для проведения исследований использовались титановые темплеты из сплава BT20. Подготовка кромок под сварку производилась по методике, представленной в работе [4]. После подготовки кромок под сварку высокоскоростным фрезерованием выполнялась электронно-лучевая сварка на установке КЛ-144. После сварки произведен раскрой сварных соединений с получением образцов размером 80x5x10 мм и 55x10x10 мм. Термическая обработка образцов проводилась с использованием печи сопротивления Graficabro при температуре  $980 \pm 5^\circ\text{C}$ , с выдержкой представленной в таблице 1. Для охлаждения образцов после закалки использовалась вода.

Особенностью термической обработки в условиях фазового предпревращения являлось использование глицерина в качестве защитного слоя. Полное испарение глицерина в процессе термической обработки наблюдалось при выдержке более 150 секунд с образованием окалины. В интервалах от 15 до 150 секунд наблюдалось образование нитридного слоя на поверхности образцов.

Общий вид сварных образцов, подвергаемых термической обработке и последующим испытанием на ударный изгиб представлен на рисунке 1.

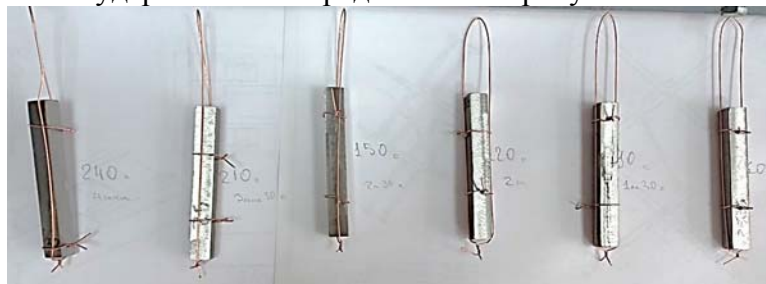


Рисунок 1 – Сварные темплеты, подготовленные к проведению термической обработки



Таблица 1 – Время выдержки образцов в печи, с указанием метода разрушающего контроля

Испытание на статическое растяжение		Испытание на ударный изгиб	
Номер образца	Время выдержки в печи	Номер образца	Время выдержки в печи
Образец №121	15 с	Образец №92	60 с
Образец №126	30 с	Образец №35	90 с
Образец №61	60 с	Образец №95	120 с
Образец №66	90 с	Образец №32	150 с
Образец №31	120 с	Образец №92	210 с
Образец №36	150 с	Образец №32	240 с

Разрушающий контроль сварных образцов после термической обработки выполнялся с использованием ударного копра JB-W300 и испытательной машины Instron 3382. На образцах, подвергаемых ударному изгибу, нарезался V-образный концентратор напряжений согласно ГОСТ 6996-66. Внешний вид образцов после динамических и статических испытаний представлен на рисунке 2. Образцы под номерами 91, 96, 95\*, 35\* не подвергались термической обработке для сравнительной оценки.

Из рисунка 2 установлен хрупкий излом сварных соединений, после испытаний на ударный изгиб. Начало разрушения происходит по основному металлу с последующим разрушением в сварном соединении.

Для сварных соединений без термической обработки установлено значение предела прочности от 723,8 до 760,5 МПа, после ускоренной термической обработки от 774,1 до 974,7 МПа. Распределение предела прочности в зависимости от времени выдержки образцов представлено на рисунке 3.

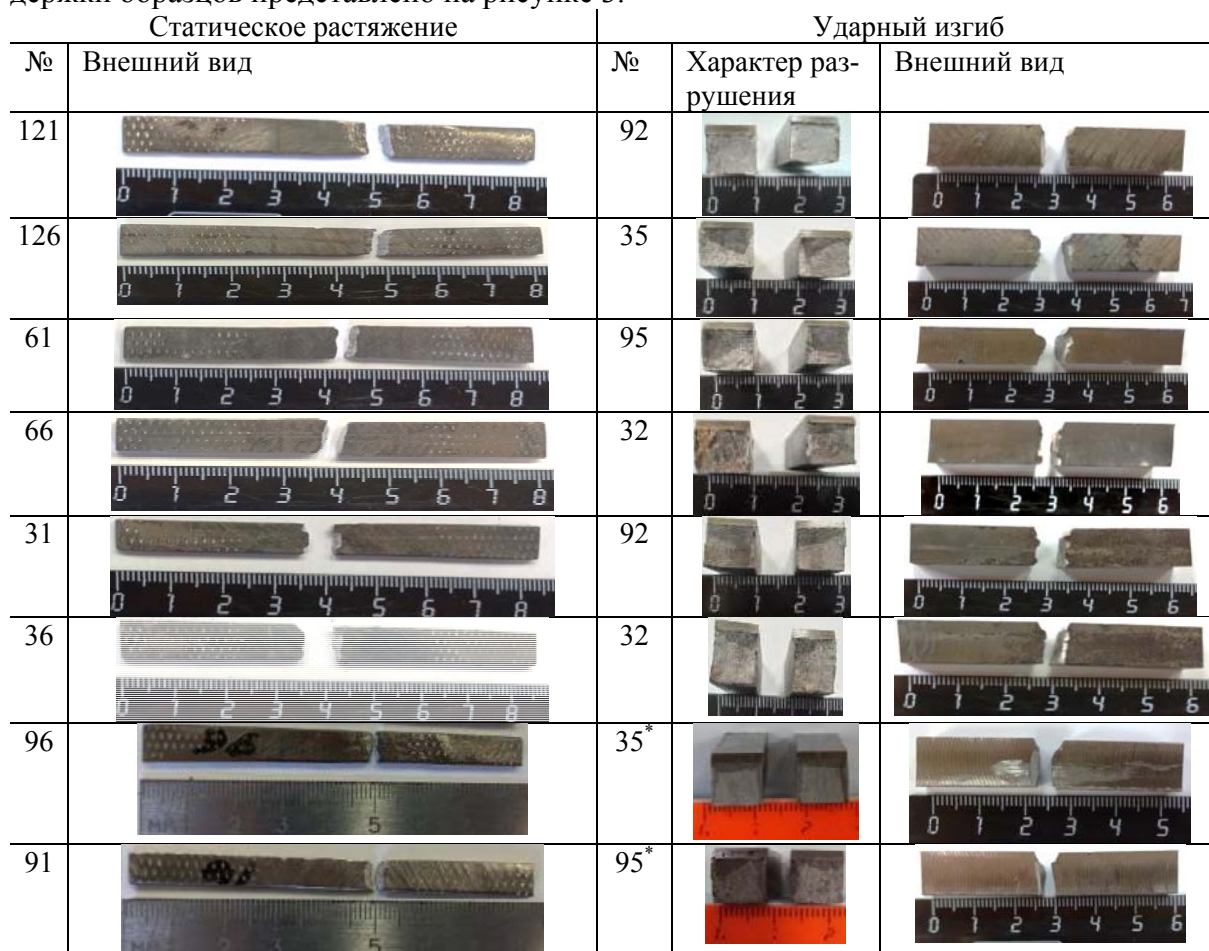


Рисунок 2 – Внешний вид образцов после испытаний на статическое растяжение и ударный изгиб

В результате испытаний на ударный изгиб среднее значение ударной вязкости сварных образцов без термической обработки (KCV) составило 22 Дж/см<sup>2</sup>. Среднее значение ударной вязкости образцов, подвергнутых термической обработке, составило 23 Дж/см<sup>2</sup>

Максимальное значение ударной вязкости (KCV) установлено при выдержке в печи в интервале 90-140 секунд, далее идет ухудшение результатов ударной вязкости (рисунок 4).

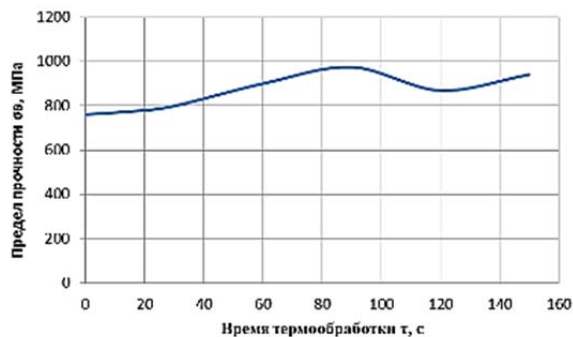


Рисунок 3 – Влияние ускоренной термической обработки сварных соединений на изменение предела прочности

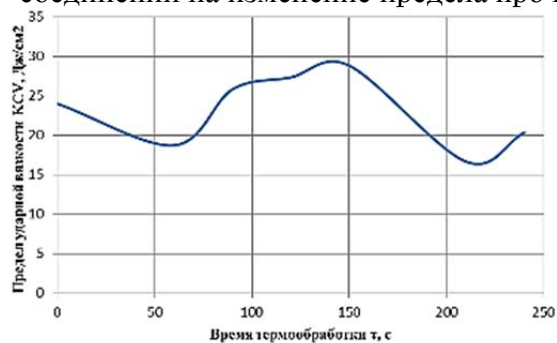


Рисунок 4 – Изменение ударной вязкости сварных соединений в зависимости от режимов скоростной термообработки в температурном интервале фазовых превращений

Таким образом, режимом термической обработки в условиях фазовых превращений, способствующим улучшению прочности и вязкости сварных соединений является:

- для образцов 80x5x10 мм в интервале 60-90 секунд.
- для образцов 55x10x10 мм в интервале 90-140 секунд.

Физико-механические свойства образцов, прошедших ускоренную термообработку, дают хорошие результаты. Для внедрения ускоренной термообработки титановых сплавов на предприятиях, необходимо провести дальнейшую работу по выбору метода нагрева: может быть лазерный или индукционный методы.

Перспективой дальнейших исследований является исследование изменения структуры в зависимости от режимов термической обработки в условиях фазовых превращений, а также исследования в области индукционного нагрева.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Братухин А.Г., ред. Штамповка, сварка, пайка и термообработка титана и его сплавов в авиастроении. Москва, Машиностроение, 1997. 600 с.
2. Муравьев, В. И. Обеспечение качества неразъемных соединений титановых конструкций летательных аппаратов, выполненных сваркой плавлением : монография / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, В. В. Григорьев. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. - 296 с.
3. Лясоцкая, В. С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов / В. С. Лясоцкая ; Лясоцкая В.С.; Под ред. Б.А. Колачева. – Москва : Экомет, 2003. – 351 с.

4. Солнцева, А. В. Изменения качества поверхности конструкций из титанового сплава BT20 при высокоскоростной механической обработке / А. В. Солнцева, В. И. Муравьев, В. В. Григорьев // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 81-83.

УДК 621.79.03

Фролов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника», Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Frolov Alexey Valerievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-na-Amure State University

Комарова Ксения Константиновна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Komarova Kseniya Konstantinovna, student of Komsomolsk-na-Amure State University

## **ПРОГРАММИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СВАРОЧНОЙ ГОРЕЛКИ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СВАРКЕ**

### **PROGRAMMING THE WELDING TORCH MOVEMENT FOR AUTOMATED WELDING**

Аннотация. Описываются результаты разработки и тестирования управляющих программ для установки автоматической сварки на базе ЧПУ по стандарту ИСО 6983-1:2009. Управляющие программы написаны для однопроходных сварочных швов с траекторий сварочной горелки типа «вперёд-назад», «зигзаг», «треугольник», «восьмёркой». Abstract. The results of development and testing of ISO 6983-1:2009-based automatic welding control programs are described. Control programs are designed for single-pass welds with welding torch paths such as "forward-backward", "zigzag", "triangle", "eight".

Ключевые слова: автоматическая сварка, траектория, программирование, ЧПУ, ИСО 6983-1:2009.

Key words: automatic welding, trajectory, programming, CNC, ISO 6983-1:2009.

#### **Введение**

Автоматизация сборочного производства позволяет решить главную задачу любого процесса автоматизации – исключение человеческого фактора, и связанную с этим задачу снижения издержек производства и повышения качества работ. Сварочное производство не является исключением. Поэтому при выполнении однотипных сварочных работ в настоящее время широко используются сварочные роботы, порталные установки, системы сварки трубных досок, установки автоматической сварки труб и другие автоматизированные сварочные комплексы.

Для ручной сварки разработаны рекомендации по оптимальному перемещению сварочного электрода (рисунок 1) в зависимости от особенностей сварного шва (его положения в пространстве, толщины и взаимного расположения свариваемых деталей и т.д.). Для автоматической сварки также существуют несколько типов осцилляций сварочной горелки (рисунок 2) [1-6].

Программирование механизмов перемещения сварочной горелки осуществляется, как правило, в соответствии с требованиями стандарта ISO 6983-1:2009, то есть с

помощью отрезков прямых или дуг окружностей. В связи с чем разработка управляющих программ для сварочных автоматов на языке G-кодов является актуальной задачей. В настоящей работе приводятся результаты разработки управляющих кодов для различных типов осцилляций сварочной горелки.

### Методика работы

При разработке программ считалось, что сварочный шов располагается в плоскости «XOY», при этом ось шва совпадает с осью «OX» (то есть осцилляции выполняются вдоль оси «OY»). Для всех швов ширина осцилляций принималась равной 4 мм, период повторения осцилляций принимался равным 2 мм, а длина шва равной 82 мм (что соответствует длине окружности трубы диаметром 26 мм). Указанные параметры могут быть масштабированы по приведённым ниже формулам.

В программах перемещения горелки использовались следующие команды из стандарта ISO 6983-1:2009: G01 – линейное перемещение в точку с заданными координатами; G02 – круговое перемещение по часовой стрелке; G03 – круговое перемещение против часовой стрелки; G15 – работа в декартовой системе координат (применялась однократно в блоке предварительной настройки); G17 – выбор рабочей плоскости XY (применялась при настройке); G21 – выбор метрической системы измерения (применялась при настройке); G64 – работа в режиме постоянной скорости перемещения; G90 – переключение в режим абсолютных координат; G91 – переключение в режим относительных координат; G94 – скорость перемещения задаётся в мм/мин; F – установка линейной скорости сварочной горелки; M98 – вызов подпрограммы; M99 – возврат из подпрограммы.

Тестирование результатов проектирования производилось в программах симуляции работы CNC станков и на установке автоматизированной сварки труб.

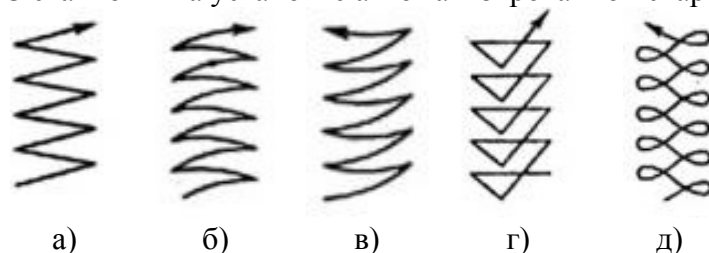


Рисунок 1 – Основные схемы перемещения сварочного электрода при ручной сварке: а – зигзаг; б, в – полумесяцем; г – треугольником; д – восьмёркой

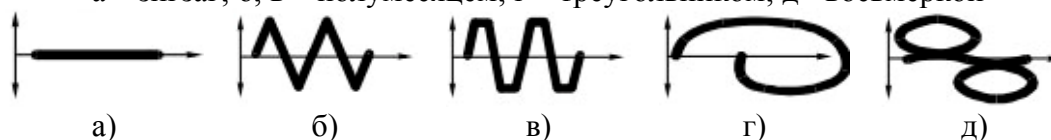


Рисунок 2 – Траектории перемещения сварочной горелки при роботизированной сварке: а – без осцилляций; б – зигзаг; в – трапеция; г – спираль; д – восьмёрка

### Результаты работы

Программа перемещения сварочной горелки вдоль сварного шва возвратно-поступательными движениями (рисунок 3).

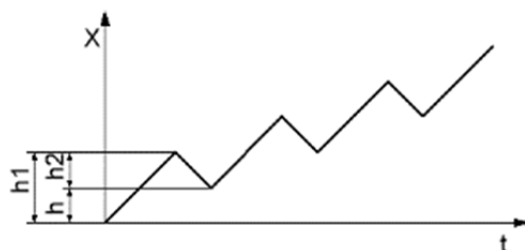


Рисунок 3 - Диаграмма изменения положения сварочной горелки вдоль оси OX при возвратно-поступательном законе её перемещения

Программа применима при сварке тонкостенных деталей с целью исключения их перегрева и прожога, а также с целью увеличения времени существования сварочной ванны. Расчёт величины прямого шага, скорости перемещения и количества периодов повторений осцилляций выполняется по формулам:

$$h1 = h + h2 \quad (1)$$

где  $h1$  – длина прямого шага, мм;  $h2$  – величина перекрытия, мм;  $h$  – период повторения осцилляций, мм.

$$v = v_{св} \frac{h1+h2}{h} = v_{св} \left(1 + 2 \frac{h2}{h}\right) \quad (2)$$

где  $v$  – скорость перемещения сварочной горелки, мм/мин;  $v_{св}$  – скорость сварки, мм/мин.

$$n = \frac{l}{h} \quad (3)$$

где  $n$  – количество периодов повторений осцилляций;  $l$  – длина сварного шва, мм.

При перекрытии равном 1 мм и скорости сварки 200 мм/мин получается:

$$\begin{aligned} h1 &= 2 + 1 = 3 \text{ мм} \\ v &= 200 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{1}{2}\right) = 400 \text{ мм/мин} \\ n &= \frac{82}{2} = 41 \end{aligned}$$

Управляющий код:

```
...
G91 % Переключение в режим относительных координат
M98 P100 L41 % Вызов подпрограммы осцилляций горелки 41 раз
G90 % Переключение в режим абсолютных координат
...
M30 % Завершение программы
O100 % Подпрограмма сварки возвратно-поступательного типа
G01 X3 F400
G01 X-1 F400
M99 % Завершение подпрограммы
```

Программа осцилляций сварочной горелки типа «зигзаг» (рисунок 2б) состоит из двух элементарных перемещений по прямым. Для симметричных осцилляций относительно оси шва рассчитаем относительные координаты перемещения сварочной горелки:

$$dx1 = \frac{h}{2} \quad (4)$$

$$dy1 = -b \quad (5)$$

$$dx2 = h - dx1 \quad (6)$$

$$dy2 = b \quad (7)$$

где  $dx1$ ,  $dx2$  – относительные перемещения вдоль оси шва, мм;  $dy1$ ,  $dy2$  – относительные перемещения поперёк оси шва, мм;  $b$  – ширина шва, мм.

$$dx1 = \frac{2}{2} = 1 \text{ мм}$$

$$dy1 = -4 \text{ мм}$$

$$dx2 = 2 - 1 = 1 \text{ мм}$$

$$dy2 = 4 \text{ мм}$$

$$v = v_{св} \frac{\sqrt{dx1^2+dy1^2} + \sqrt{dx2^2+dy2^2}}{h} \quad (8)$$

$$v = 200 \cdot \frac{\sqrt{1^2+(-4)^2} + \sqrt{1^2+4^2}}{2} = 825 \text{ мм/мин}$$

Управляющий код (рисунок 4а):

```
...
G01 Y2 % Перемещение сварочной горелки в позицию начала сварки
G91 % Переключение в режим относительных координат
```

M98 P100 L41 % Вызов подпрограммы осцилляции горелки 41 раз  
 G90 % Переключение в режим абсолютных координат  
 G01 Y0 % Перемещение горелки на ось шва

...

M30 % Завершение программы  
 O100 % Подпрограмма сварки зигзагом  
 G01 X1 Y-4 F825  
 G01 X1 Y4 F825

M99 % Завершение подпрограммы

Программа осцилляций сварочной горелки типа «треугольник» (рисунок 1г) состоит из трёх элементарных перемещений по прямым. Рассчитаем относительные координаты перемещения сварочной горелки:

$$dx1 = 0 \quad (9)$$

$$dy1 = -b \quad (10)$$

$$dx2 = -h1 \quad (11)$$

$$dy2 = \frac{b}{2} \quad (12)$$

$$dx3 = h1 + h \quad (13)$$

$$dy3 = \frac{b}{2} \quad (14)$$

$$v = v_{св} \frac{b + \sqrt{dx2^2 + dy2^2} + \sqrt{dx3^2 + dy3^2}}{h} \quad (15)$$

$$dy1 = -4 \text{ мм}$$

$$dx2 = -1 \text{ мм}$$

$$dy2 = \frac{4}{2} = 2 \text{ мм}$$

$$dx3 = 1 + 2 = 3 \text{ мм}$$

$$dy3 = \frac{4}{2} = 2 \text{ мм}$$

$$v = 200 \cdot \frac{4 + \sqrt{(-1)^2 + 2^2} + \sqrt{3^2 + 2^2}}{2} = 984 \text{ мм/мин}$$

Управляющий код подпрограммы осцилляций (рисунок 4б):

O100 % Подпрограмма сварки «треугольником»  
 G01 X0 Y-4 F984  
 G01 X-1 Y2 F984  
 G01 X3 Y2 F984

M99 % Завершение подпрограммы

Программа осцилляций сварочной горелки типа «восьмёрка» (рисунок 1д) состоит из двух прямолинейных перемещений и двух перемещений по дуге. При расчёте координат концов отрезков и дуг зададим радиус дуг равным половине периода  $r = 1$  мм и промежуточный шаг равным половине периода  $h1 = 1$  мм. Рассчитаем относительные координаты концов отрезков и дуг:

$$dx1 = h1 + 2r \quad (16)$$

$$dy1 = -b + 2r \quad (17)$$

$$dx2 = -2r \quad (18)$$

$$dy2 = 0 \quad (19)$$

$$dx3 = h - h1 + 2r \quad (20)$$

$$dy3 = b - 2r \quad (21)$$

$$dx4 = -2r \quad (22)$$

$$dy4 = 0 \quad (23)$$

$$v = v_{св} \frac{2\pi r + \sqrt{dx1^2 + dy1^2} + \sqrt{dx3^2 + dy3^2}}{h} \quad (24)$$

$$dx1 = 1 + 2 \cdot 1 = 3 \text{ мм}$$

$$dy1 = -4 + 2 \cdot 1 = -2 \text{ мм}$$

$$dx2 = -2 \cdot 1 = -2 \text{ мм}$$

$$dx3 = 2 - 1 + 2 \cdot 1 = 3 \text{ мм}$$

$$dy3 = 4 - 2 \cdot 1 = 2 \text{ мм}$$

$$dx4 = -2 \cdot 1 = -2 \text{ мм}$$

$$v = 200 \cdot \frac{2\pi \cdot 1 + \sqrt{3^2 + (-2)^2} + \sqrt{3^2 + 2^2}}{2} = 1350 \text{ мм/мин}$$

Управляющий код подпрограммы осцилляций (рисунок 4в):

O100 % Подпрограмма сварки «восьмёркой»

G01 X3 Y-2 F1350

G02 X-2 Y0 R1 F1350

G01 X3 Y2 F1350

G03 X-2 Y0 R1 F1350

M99 % Завершение подпрограммы

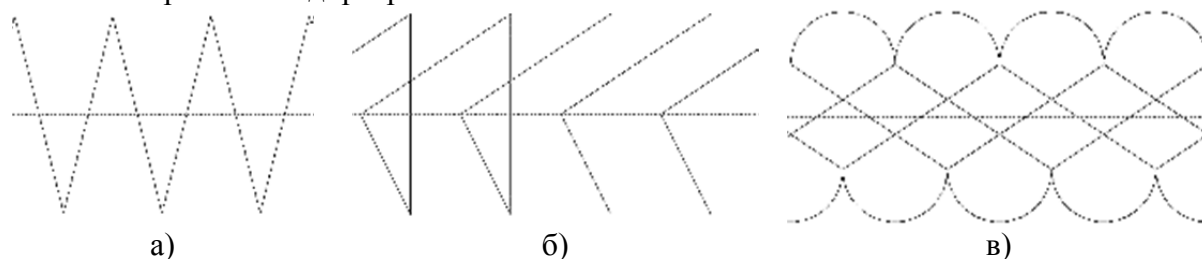


Рисунок 4 – Фрагменты траектории осцилляций сварочной горелки

### Заключение

Выбор оптимальной траектории перемещения сварочной горелки оказывает значительное влияние на качество и скорость выполнения сварного соединения. Разработка оптимальных управляющих подпрограмм осцилляций заданного типа с заданными параметрами является важной технологической задачей. Разработанные программы управления позволяют реализовать наиболее часто используемые траектории осцилляций сварочной горелки в автоматическом режиме сварки.

### Благодарности

Научно-исследовательские работы выполнены за счёт средств ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (грант № ВН001/2020).

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Овчинников В.В. Ручная дуговая сварка (наплавка, резка) // Москва: Кнорус, 2021. – 250 с.
2. Олышанская Т.В., Трушников Д.Н., Беленький В.Я., Младенов Г.М. Влияние осцилляции электронного пучка на формирование структуры и свойства сварного шва // Сварочное производство. 2012. № 11. с. 13 – 18.
3. Arc Welding ARC Tech 20: Operation. - [https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/software/application-software/kuka\\_arctech](https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/software/application-software/kuka_arctech).
4. Крампит А.Г., Крампит Н.Ю. Способы управления формированием сварного шва // Технологии и материалы. 2015. № 3. с. 21 – 26.
5. Муравьев В.И., Бахматов П.В., Григорьев В.В. Особенности образования специфических дефектов при сборке крупногабаритных титановых конструкций летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 4. с. 17 - 27.
6. Хабибов М.М., Рубан К.Е., Бахматов П.В. Исследование процесса автоматической размерной дуговой наплавки // Ученые записки Комсомольского-на-амуре государственного технического университета. 2021. № 3 (51). с. 112-116.



Фролов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника», Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Frolov Alexey Valerievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-na-Amure State University  
Кравченко Александр Сергеевич, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Kravchenko Aleksandr Sergeevich, postgraduate student of Komsomolsk-na-Amure State University

## **РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СВАРОЧНОЙ ГОРЕЛКИ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СВАРКЕ**

### **DEVELOPMENT OF UNIVERSAL WELDING TORCH TRAJECTORY FOR AUTOMATED WELDING MACHINE**

Аннотация. В работе приводится анализ используемых траекторий перемещения сварочной горелки и предложено математическое описание универсальной траектории. Полученная параметрическая модель траектории позволяет гибко настраивать закон перемещения сварочной горелки, в результате чего возможно не только описание большинства существующих типов законов перемещения сварочной горелки, но и разработка новых траекторий для поиска оптимальных типов перемещения сварочной горелки. Математическая модель использует линейные и круговые интерполяции, что позволяет применять полученные результаты как для сварочных автоматов с системой ЧПУ, так и для промышленным роботом-манипуляторов.

Abstract. The paper analyzes the modern welding torch trajectories and proposes an universal trajectory mathematical description. The trajectory parametric model allows you to flexibly adjust the welding torch movement type, as a it is possible not only to describe the most existing welding torch movement types, but also to develop the new trajectories to find the optimal welding torch movement types. The mathematical model uses the linear and circular interpolations, which makes it possible to apply the model both for automatic CNC welding machines and for industrial robotic manipulators.

Ключевые слова: автоматическая сварка, траектория, математическая модель, расчёт, ИСО 6983-1:2009.

Key words: automatic welding, trajectory, mathematic model, calculation, ISO 6983-1:2009.

#### **Введение**

При производстве сварных соединений важно обеспечить качественное выполнение сварного шва с минимальными затратами времени (с минимальным количеством проходов), электроэнергии и расходных материалов. Для этого рекомендуется использовать как оптимальные режимы сварки (величину сварочного тока, скорость выполнения сварки и т.д.), так и оптимальную технику перемещения сварочной горелки или электрода. Так для ручной дуговой сварки существуют рекомендации по выбору закона перемещения сварочного электрода (рисунок 1). Этих рекомендаций достаточно много (более 10) и их выбор определяется пространственным положением сварного шва и его особенностями (шириной, взаимной ориентацией свариваемых деталей и т.д.).

Но для автоматической и роботизированной сварки такие рекомендации отсутствуют. Одним из первых сварочных роботов может считаться сварочный трактор, который автоматизировал перемещение сварочной горелки вдоль оси сварного шва. Позднее, с помощью механических приводов сварочная горелка приобрела возможность поперечного перемещения относительно оси шва. Полученная траектория имеет форму зигзага (тип 1 на рисунке 1). Дальнейшее развитие механизмов перемещения

сварочной горелки связано с установкой двух независимых приводов – для перемещения горелки вдоль оси шва и поперёк. Это позволило расширить номенклатуру выполняемых типов перемещения горелки. Но эти возможности не используются современными сварочными автоматами. Так сварочные манипуляторы используют лишь 4 типа перемещения сварочной горелки (рисунок 2) [1-6].

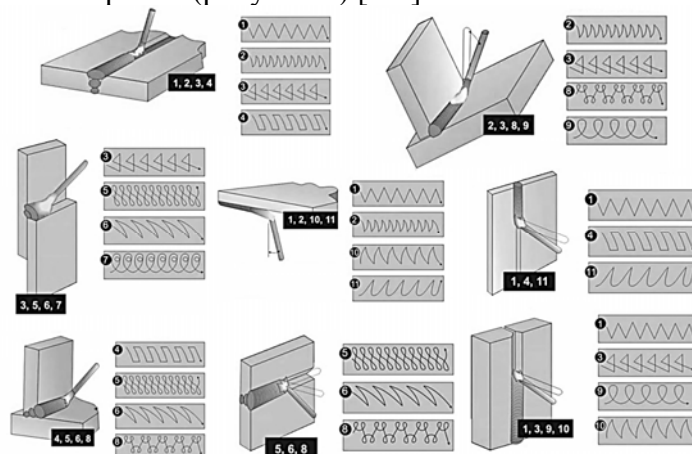


Рисунок 1 – Рекомендуемые траектории перемещения сварочного электрода

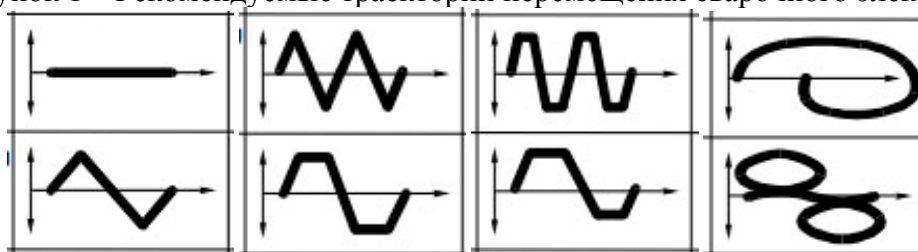


Рисунок 2 – Траектории перемещения сварочной горелки при роботизированной сварке

В связи с низкой степенью проработки вопроса расширения перечня типов перемещений сварочной горелки при автоматизированной и роботизированной сварке в настоящей работе была поставлена задача анализа существующих типов сварочных траекторий, а также разработки математического описания универсальной траектории.

#### Методика исследований

При разработке математического описания траектории сварочной горелки использовалась кусочно-линейная аппроксимация требуемой траектории, а также периодическое дублирование полученных результатов. В качестве направления сварки принималась ось «OX».

В качестве аппроксимирующих функций использовались только дуги окружностей. Это связано с особенностями программирования станков с ЧПУ по стандарту ISO 6983-1:2009, а также с особенностями программирования промышленных роботоманипуляторов. Так при программировании траектории перемещения инструмента в соответствии с указанным стандартом допускается только следующие виды перемещений: прямолинейное, по дуге окружности по часовой стрелке, по дуге окружности против часовой стрелки. При этом начало траектории перемещения соответствует текущему положению инструмента. Конечное положение инструмента задаётся в декартовых или полярных координатах (в работе использовался декартовый метод задания координат). Кривизна траектории задаётся радиусом окружности, при этом возможно перемещение как по малой дуге окружности, так и по большой – это определяется знаком радиуса. В работе использовалось только перемещение по малой дуге окружности. При увеличении радиуса окружности форма её дуги стремится к прямой, поэтому в работе аппроксимация прямолинейными участками не использовалась и заменялась на аппроксимацию дугами с большим радиусом.

Таким образом, поставленная задача проектирования математической модели сводилась к определению координат точек сопряжения дуг окружностей и расчёту радиусов этих окружностей.

Проверка результатов расчётов производилась в программах симуляции работы CNC станков.

### Результаты работы

Анализ существующих траекторий перемещения сварочной горелки показывает, что наибольшая их часть может быть описана в виде четырёхступенчатого алгоритма (рисунок 3):

- перемещение от дуги  $r_1$  к дуге  $r_2$  по дуге  $R_1$ ;
- перемещение по дуге  $r_2$ ;
- перемещение от дуги  $r_2$  к дуге  $r_1$  по дуге  $R_2$ ;
- перемещение по дуге  $r_1$ .

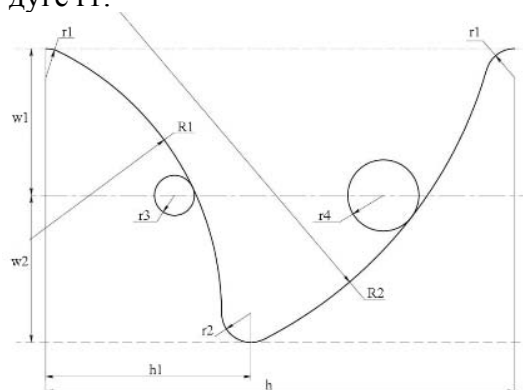


Рисунок 3 – Описание одного периода перемещения сварочной горелки

При необходимости усиления сварного шва могут быть добавлены промежуточные перемещения по дугам  $r_3$  и  $r_4$ .

При этом расстояние от центра шва до его кромок  $w_1$  и  $w_2$  могут быть различными, что позволяет выполнять несимметричный шов, например, для сварки деталей разной толщины. Величина шага шва  $h$  соответствует периоду повторения описанной траектории. Расстояние  $h_1$  между центрами дуг  $r_1$  и  $r_2$  может быть как положительным (как больше шага  $h$ , так и меньше), так и отрицательным. Это позволяет варьировать траекторию от «уступом назад» до «уступом вперёд», а также выполнять шов «зигзагом». Радиусы дуг  $R_1$  и  $R_2$  могут быть как положительными, так и отрицательными. Знак указанных радиусов дуг определяет, где будет находиться центр дуги – слева или справа по рисунку 3. Радиусы дуг  $r_1$  и  $r_2$  могут быть как положительными, так и отрицательными, так и равными нулю. В последнем случае эти дуги переходят в точку. Положительные значения радиусов дуг описывают перемещение по малой дуге, как на рисунке 3. Отрицательные значения радиусов описывают перемещение по большой дуге, в результате чего траектория перемещения трансформируется в «восьмёрку» (тип 5 на рисунке 1). Разные по знаку значения радиусов дуг позволяют описать траектории типа 9 на рисунке 1. При увеличении радиусов  $R_1$  и  $R_2$ , снижении радиусов  $r_1$  и  $r_2$  до нуля получается описание траекторий «зигзаг» (тип 1 на рисунке 1), или «полумесяц» (типы 2, 6, 10 на рисунке 1).

### Заключение

Выбор оптимальной траектории перемещения сварочной горелки во многом определяет технические и экономические показатели технологии сварки, особенно при выполнении многопроходных сварных швов.

Современные роботы используют лишь 4 типа перемещения сварочной горелки из не менее, чем 11 рекомендованных для ручной сварки. Это позволяет эффективно использовать роботизированную сварку в горизонтальном пространственном положении, но затрудняет её применение для выполнения вертикальных и потолочных швов, а также швов с наклонным положением сварочной горелки.

Предложенная модель четырёхступенчатого алгоритма перемещения сварочной горелки позволяет описать 8 из 11 рекомендуемых траекторий движения сварочного электрода, что позволяет более эффективно использовать сварочных роботов-манипуляторов для сварки с любым пространственным положением шва.

Разработанная модель перемещения сварочной горелки позволяет гибко настраивать параметры, в результате чего она позволяет не только описывать существующие типы траекторий, но и разрабатывать новые законы горизонтальных осцилляций сварочной горелки.

#### **Благодарности**

Научно-исследовательские работы выполнены за счёт средств ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (грант № ВН001/2020).

#### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Bolmsjo G., Olsson M., Cederberg P. Robotic arc welding - trends and developments for higher autonomy // *Industrial robot*. 2002. vol. 29. p. 98 – 104.
2. Chen S.B., Lv N. Research evolution on intelligentized technologies for arc welding process. - *Journal of manufacturing processes* // 2014. vol. 16. p. 109 – 122.
3. Madsen O., Sorensen C.B., Larsen R., Overgaard L., Jacobsen N.J. A system for complex robotic welding // *Industrial Robot*. 2002. vol. 29. p.127 – 131.
4. Овчинников В.В. Ручная дуговая сварка (наплавка, резка) // Москва: Кнорус, 2021. – 250 с.
5. Кравченко А.С., Бахматов П.В. Разработка технологических рекомендаций по повышению качества сварных соединений элементов трубопроводных систем из нержавеющей сталей авиационного назначения // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2021. № 1 (730). - с. 41 - 53.
6. Муравьев В.И., Бахматов П.В., Григорьев В.В. Обеспечение свойств соединений титановых конструкций летательных аппаратов, полученных сваркой плавлением, одинаковых со свойствами основного металла // *Вестник Московского авиационного института*. 2021. Т. 28. № 3. - с. 218-227.

УДК 621.791.01

Фролов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника», Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Frolov Alexey Valerievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-na-Amure State University  
Кравченко Александр Сергеевич, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Kravchenko Aleksandr Sergeevich, postgraduate student of Komsomolsk-na-Amure State University

#### **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ДУГОЙ**

#### **DEVELOPMENT OF THIN-WALLED PIPES WELDING TECHNOLOGY BY A PULSE ARC**

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния параметров технологии сварки пульсирующей дугой с дискретным перемещением сварочной горелки на качество сварного соединения тонкостенных труб. Показано, что предложенная технология позволяет выполнять сварку трубопроводов из стали 12X18H10T толщиной 1 мм без присадочного материала в автоматическом режиме.

Abstract. The paper presents the results of a research of the influence of the parameters of the pulsed arc welding technology with welding torch discrete movement on the thin-walled pipes welded joint quality. It is shown that the technology makes it possible to weld 1 mm thick 12X18N10T pipelines without filler material in automatic mode.

Ключевые слова: автоматическая сварка, 12X18N10T, трубопровод, пульсирующая дуга, TIG.

Key words: automatic welding, 12X18N10T, pipeline, pulsed arc, TIG.

### **Введение**

Тонкостенные трубопроводы из нержавеющей стали 12X18N10T получили широкое распространение в различных отраслях народного хозяйства – от пищевой и химической промышленности до авиастроения. Основными способами соединения этих трубопроводов остаются сварное и резьбовое соединения. В случае отсутствия необходимости обеспечения разъемности соединения сварное соединение находится вне конкуренции, так как обеспечивает лучшие технико-экономические показатели (вес, габариты, стоимость и т.д.).

Одна из сложностей сварки тонкостенных конструкций заключается в высокой вероятности прожога стенки. Поэтому при сварке таких деталей необходим подбор оптимальных параметров сварки – тока, скорости сварки и др., а также точное выдерживание этих параметров во время сварки. Кроме того, сварка подобных соединений подразумевает использование присадочного материала. Использование сварочных автоматов или роботов совместно с применением TIG технологии сварки позволяет обеспечить выполнение указанного условия и даже отказаться от применения присадочного материала. Но проблема разработки оптимальной технологии сварки остаётся открытой [1-4].

В связи с высокой актуальностью поставленной задачи разработки технологии сварки тонкостенных трубопроводов из стали 12X18N10T без использования присадочной проволоки были проведены исследования влияния параметров технологии сварки пульсирующей дугой с дискретным перемещением сварочной горелки на качество сварного соединения.

### **Методика эксперимента**

Для эксперимента использовались трубные заготовки из стали 12X18N10T диаметром 50 мм и толщиной 1 мм без разделки кромок, собранные «в стык» с зазором не более 0,1 мм.

Сварка выполнялась на установке автоматической сварки на базе сварочного вращателя M211080 с шаговым электродвигателем PL86H75-3,5-4 и шагового линейного привода 28H30H0604A2. Управление установкой производилось с помощью контроллера 3-х координатного фрезерного станка с системой команд по ISO 6983-1:2009. Источник сварочного тока - TIG полуавтомат KEMPPi MinarcTig Evo 200 MLP в режиме «Minilog». Ток в режиме сварки – 35 А; ток в режиме «Minilog» - 15 А. Диаметр сварочного электрода – 2 мм. Расход защитного газа – 5 л/мин.

Алгоритм сварки (рисунок 1):

- 1) поджиг дуги, включение рабочего сварочного тока 35 А;
- 2) выдержка 3 с для предварительного прогрева металла;
- 3) цикл следующих операций:
  - включение режима «Minilog» (снижение тока до 15 А);
  - перемещение сварочной горелки вдоль оси шва на 2 мм со скоростью 250 мм/мин;
  - включение режима сварки с током 35 А;
  - пауза для сварки заготовок от 1,3 с до 1 с;
  - повторение цикла;
- 4) отключение сварочного источника.

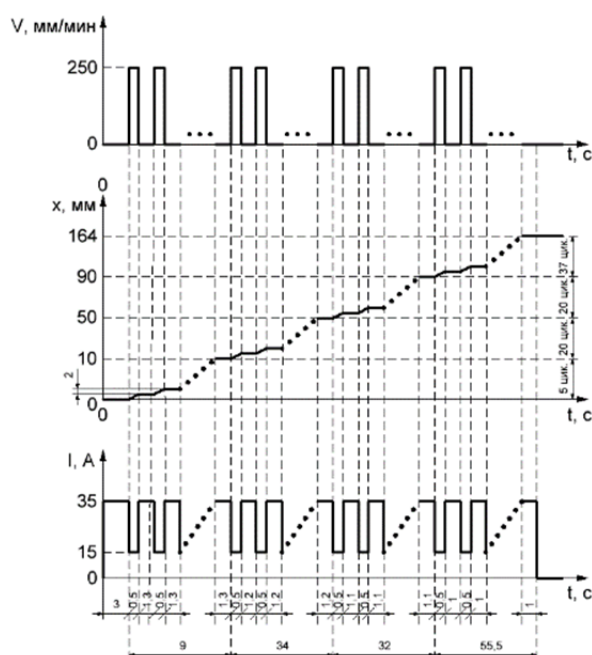


Рисунок 1 – Алгоритм сварки прерывистой дугой с импульсным перемещением сварочной горелки

При сварке первых 10 мм шва (сектора трубы  $23^\circ$ ) длительность сварки каждого фрагмента составляла 1,3 с; сварка вторых 40 мм (сектора трубы  $90^\circ$ ) осуществлялась с длительностью импульса сварки 1,2 с; следующие 40 мм ( $90^\circ$ ) сваривались с длительностью импульса сварки 1,2 с; завершающие 74 мм ( $170^\circ$ ) сваривались с длительностью импульса сварки 1 с. В результате сварки образовывалось перекрытие 7 мм ( $13^\circ$ ) – рисунок 2.



Рисунок 2 – Схема распределения длительностей импульсов сварки

### Результаты экспериментов

Описанный алгоритм сварки пульсирующей дугой в сочетании с импульсным (дискретным) перемещением сварочной горелки и снижающимся тепловым воздействием обеспечивает относительно одинаковую геометрию сварного шва на всём его протяжении (рисунок 3) с допустимыми механическими характеристиками – предел прочности – 530 МПа; относительное удлинение – 22% при исключении прожогов и отсутствии необходимости применения присадочной проволоки.

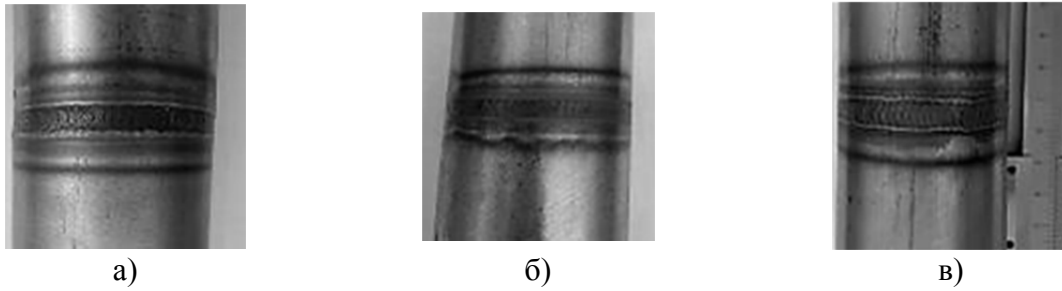


Рисунок 3 – Внешний вид сварных швов: а - во втором секторе; б – в третьем секторе; в – в четвёртом секторе

В описанной технологии происходит снижение среднего значения сварочного тока от 35 А до 28,3 А. При этом среднее значение сварочного тока рассчитывалось по формуле:

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{и}}t_{\text{и}} + I_{\text{п}}t_{\text{п}}}{t_{\text{и}} + t_{\text{п}}} \quad (1)$$

где  $I_{\text{ср}}$  – среднее значение тока, А;  $I_{\text{и}}$  – ток в импульсе (в режиме сварки), А;  $I_{\text{п}}$  – ток в паузе (в режиме Minilog), А;  $t_{\text{и}}$  – длительность сварочного импульса, с;  $t_{\text{п}}$  – длительность паузы, с.

Следовательно, среднее значение сварочного тока в секторах было следующим:

$$I_{\text{ср.0}} = \frac{35 \cdot 3 + 15 \cdot 0}{3 + 0} = 35 \text{ А}$$

$$I_{\text{ср.1}} = \frac{35 \cdot 1,3 + 15 \cdot 0,5}{1,3 + 0,5} = 29,4 \text{ А}$$

$$I_{\text{ср.2}} = \frac{35 \cdot 1,2 + 15 \cdot 0,5}{1,2 + 0,5} = 29 \text{ А}$$

$$I_{\text{ср.3}} = \frac{35 \cdot 1,1 + 15 \cdot 0,5}{1,1 + 0,5} = 28,8 \text{ А}$$

$$I_{\text{ср.4}} = \frac{35 \cdot 1 + 15 \cdot 0,5}{1 + 0,5} = 28,3 \text{ А}$$

Применение непрерывного сварочного тока величиной 29 А приводит к перегреву металла заготовок и прожогу. Разработанный алгоритм за счёт импульсного воздействия сварочным током предотвращает перегрев металла деталей и, тем самым, исключает его прожог. При этом во время импульса сварки сохраняется требуемая плотность сварочного тока. Плавное снижение среднего значения сварочного тока компенсирует изменение ширины и глубины проплавления из-за разогрева заготовок во время сварки.

Применение сварки пульсирующей дугой вместо импульсной сварки имеет несколько преимуществ. Так пульсирующая дуга осуществляет подогрев кромок перед сваркой и более плавное снижение температуры полученного ранее фрагмента сварного шва. При этом снижается скорость нагрева и охлаждения металла шва, что приводит к снижению термических напряжений и продлению времени существования сварочной ванны, что обуславливает снижение сварочных деформаций, внутренних напряжений и формирование более оптимальной структуры металла шва.

### Заключение

Разработанная технология сварки тонкостенных трубных заготовок TIG способом пульсирующей дугой с импульсным перемещением сварочной горелки и понижающимся средним значением сварочного тока позволяет выполнять сварку стали 12X18H10T без применения присадочной проволоки, в автоматическом режиме с заданной геометрией сварного шва и достаточно высоким уровнем его механических характеристик.

### Благодарности

Научно-исследовательские работы выполнены за счёт средств ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (грант № ВН001/2020).



## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лобанов Л.М., Лебедев В.А., Максимов С.Ю. Новые возможности механизированной дуговой точечной сварки с применением импульсных воздействий // Автоматическая сварка. 2012. № 5. С. 17-22.

2. Сараев Ю.Н. Адаптивные импульсно-дуговые методы механизированной сварки при строительстве магистральных трубопроводов // Сварочное производство. 2002. № 1. С. 4-11.

3. Комарова К. К., Старничук Е. П., Кравченко А. С., Бахматов П. В. Влияние режимов сварки на геометрические параметры сварного шва, выполненного роботизированным комплексом // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. 2022. Ч. 2. С.33-35.

4. Кравченко А.С., Бахматов П.В. Разработка технологических рекомендаций по повышению качества сварных соединений элементов трубопроводных систем из нержавеющей сталей авиационного назначения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 1 (730). с. 41 - 53.

УДК 621.74.045

Чернышова Дарья Витальевна, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Chernyshova Darya Vitalievna, postgraduate student, Komsomolsk-na-Amure State University

## **НОВОЕ РЕШЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКОВОЙ ФОРМЫ**

## **A NEW SOLUTION IN THE TECHNOLOGY OF MANUFACTURING CERAMIC SHELL MOLD**

Аннотация. В работе описывается новое решение в технологии изготовления керамической оболочковой формы. Техническая новизна заявляемой литейной многослойной оболочковой формы заключается в особой технологии нанесения слоев покрытия и последующем получении разделительного воздушного микрозазора между слоями. Все это в совокупности делает такую оболочковую форму более устойчивой к тепловому удару при прокаливании и особенно при заливке в нее жидкого металла, а значит сокращает потери форм из-за их растрескивания (разрушения).

Abstract. The paper describes a new solution in the technology of manufacturing ceramic shell mold. Restrictive and distinctive features are set for this casting multilayer shell mold. The causal relationship between the set of features of the claimed multi-layer shell mold and the achieved technical result consists in a special technology for applying coating layers and then obtaining a separating air micro gap between the layers. All this together makes such a shell form more resistant to heat shock during calcination and especially when pouring liquid metal into it, which means it reduces the loss of forms due to their cracking (destruction)

Ключевые слова: оболочковая форма, трещинообразование, литье по выплавляемым моделям.

Key words: shell mold, casting by investment models, cracking.

Литье по выплавляемым моделям является одним из наиболее перспективных специальных способов, применяемых для получения литых заготовок деталей машин высокой сложности. Основное его достоинство – высокая точность геометрии и разме-

ров получаемых отливок. Однако, ряд недостатков этого метода, существенно сдерживают его широкое применение. Главным недостатком данного метода является повышенный брак отливок из-за частичного (растрескивание) или полного разрушения оболочковой формы при прокаливании и особенно при заливке их расплавленным металлом и затвердевании отливок. Образование микро- и макротрещин в оболочковых формах связано с их неравномерностью нагрева при прокаливании и особенно при заливке металла и остывании отливки и возникающего при этом неравномерного термоупругого напряженно-деформированного состояния.

Предлагаемое новое решение относится к области литейного производства, в частности, к многослойным оболочковым формам для изготовления металлических отливок по выплавляемым моделям [1].

Литейная многослойная оболочковая форма состоит из тонкостенных многочисленных облицовочного, промежуточных и наружного слоев.

Качество оболочковой формы и отливок в литье по выплавляемым моделям формируется на всех технологических этапах их изготовления. Наиболее распространенной технологией изготовления оболочковой формы является технология послойного нанесения огнеупорного покрытия на выплавляемую модель с последующей его сушкой [2]. Так формируется тело многослойной керамической ОФ. Число наносимых слоев (покрытий) может колебаться от 4-х до 20-ти. Такая оболочковая форма представляет собой многослойный композит с жесткими связями между слоями. Каждый из слоев представляет собой изотропный материал, который по своим физико-механическим и теплофизическим свойствам может также отличаться от свойств других слоев. В целом материал оболочковой формы можно считать гетерогенным. Также используется технология получения монослойных оболочковых форм путем осаждения огнеупорного материала из суспензии на модель методом электрофореза [3]. Такая оболочковая форма является монослойной.

Основным недостатком оболочковых форм с вышеописанной структурой является их относительно низкая трещиностойкость, обусловленная относительной однородностью композиционного материала по всей толщине стенки оболочки. Вследствие этого появившаяся по той или иной причине трещина в оболочковой форме может проникнуть на всю толщину ее стенки.

Процесс зарождения трещины и её развитие крайне сложен, поэтому однозначно сказать о критичности влияния одного из факторов и его параметров на напряженное состояние материала, превышение которого ведет к разрушению, категорично нельзя.

Ниже представлено новое решение в технологии изготовления керамической оболочковой формы.

Новизной предлагаемой оболочковой формы является то, что между промежуточными контактирующими слоями нанесено покрытие из суспензии растворенного пленкообразующего вещества в растворителе, толщина которого меньше толщины каждого из слоев оболочки.

Это обеспечивает повышение трещиностойкости оболочковой формы.

После нанесения на блок моделей необходимого числа слоев огнеупорного покрытия на блок окунаемым наносят слой суспензии из раствора вещества в растворителе. После извлечения блока из раствора, растворитель испаряется, при этом поверхность блока остается покрытой сплошной тонкой пленкой растворенного пленкообразующего вещества, толщина которого много меньше толщины каждого из слоев оболочки, которое после сушки покрывается последующими слоями огнеупорного покрытия. При прокаливании оболочковой формы из-за выгорания остатков веществ в её структуре образуется межслойный разделительный воздушный микрозазор между промежуточными контактирующими слоями, предотвращающий и останавливающий развитие сквозных трещин в стенке оболочковой формы.

Даже такой толщины микрозазора, образовавшегося от однослойного покрытия, достаточно для остановки образующихся микро или макротрещин в оболочке, будь то со стороны облицовочного или со стороны внешнего наружного слоев. Увеличение толщины микрозазора, за счет увеличения количества нанесенных слоев из суспензии растворенного пленкообразующего вещества в растворителе, практически не оказывает существенного влияния на возможность распространения трещин в теле оболочки, по сравнению с однослойным покрытием такой суспензией.

Все это в совокупности делает такую оболочковую форму более устойчивой к тепловому удару при прокаливании и особенно при заливке в нее жидкого металла, а значит сокращает потери форм из-за их растрескивания (разрушения).

Ниже приведены примеры выполнения процессов формообразования оболочковых форм.

#### Пример 1.

В пятислойной этилсиликатной оболочковой форме, изготавливаемой с использованием органического растворителя (спирт этиловый), первые три слоя, включая облицовочный и два промежуточных слоя, выполнены из кварцевого песка. После сушки третьего слоя на блок окунаем наносят слой суспензии в виде раствора пленкообразующего вещества, например, ацетилцеллюлозы в растворителе, например, этиловом спирте. После извлечения блока из раствора органический растворитель (спирт) испаряется, а поверхность блока остается покрытой сплошной тонкой пленкой растворенного вещества, а именно ацетилцеллюлозы, после чего наносят остальные два слоя огнеупорного покрытия. Далее проводят выплавление моделей и прокаливанию оболочковой формы. В процессе прокаливании все органические вещества выгорают, в том числе и остатки ацетилцеллюлозы в разделительном микрослое, образуя воздушный зазор между третьим и четвертым слоями оболочки. В качестве растворенного вещества могут быть использованы также следующие пленкообразующие вещества: полистирол, сополимер стирола с акрилонитрилом, полиметилметакрилат, АВС-пластик, а в качестве растворителя: ацетон, толуол, дихлорэтан, этилацетат.

Наличие такого образовавшегося воздушного разделительного зазора между промежуточными слоями способствует тому, что образующиеся микро и макротрещины, как со стороны облицовочного слоя, так и со стороны внешнего наружного слоя, достигнув воздушного зазора, прекращают свое дальнейшее развитие (распространение) в теле оболочки.

#### Пример 2.

В пятислойной оболочковой форме, изготавливаемой на основе водной этилсиликатной суспензии, на третий слой наносят разделительное покрытие суспензией в виде раствора поливинилового спирта в воде. После сушки разделительного покрытия наносят остальные два огнеупорных слоя оболочки.

В процессе прокаливании все органические вещества выгорают, в том числе и из разделительного микрослоя, образуя воздушный зазор между третьим и четвертым слоями оболочки.

В качестве растворенного пленкообразующего вещества в воде может быть использован также натрий-карбоксиметилцеллюлоза.

Наличие такого образовавшегося воздушного разделительного зазора между промежуточными слоями способствует тому, что образующиеся микро и макротрещины, как со стороны облицовочного слоя, так и со стороны внешнего наружного слоя, достигнув воздушного зазора, прекращают свое дальнейшее развитие (распространение) в теле оболочки.

Работа такой литейной формы. Оболочковая форма перед заливкой жидким металлом нагревается при прокаливании, при этом выгорают остатки модельного состава, удаляются продукты неполного гидролиза, испаряется вода и другие газотворные ве-

щества, включая материалы нанесенного разделительного слоя. В стенке оболочки между контактирующими промежуточными слоями в процессе прокаливания образуется воздушный микрозазор толщиной до десятых долей миллиметра, который достаточен для предотвращения и остановки распространения образующихся трещин в стенке оболочки, а значит, приводит к повышению трещиностойкости формы и к снижению безвозвратных потерь оболочек.

Увеличение толщины микрозазора за счет увеличения количества наносимых слоев покрытий из таких суспензий не оказывает существенного влияния на снижение вероятности полного растрескивания (разрушения) формы, а значит, нецелесообразно.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Одинокое В.И., Чернышова Д.В., Евстигнеева А.А. Литейная многослойная оболочковая форма для прокаливания и заливки металла в опорном наполнителе // Заявка № 2022117253 от 24.06.2022г.

2. Шкленник Я.И., Озеров В.А. Литье по выплавляемым моделям // Машиностроение. 1984. 408 С.

3. Рыжков И.В., Электрофорез в литейном производстве. Изготовление оболочковых форм по выплавляемым моделям // Вища школа. 1979. 159 С.

УДК 621.791.754.6

Шильяев Алексей Вячеславович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Shilyaev Aleksey Vyacheslavovich, student of Komsomolsk-na-Amure state University

Бахматов Павел Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология сварочного и металлургического производства им. В.И. Муравьева», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Bakhmatov Pavel Vyacheslavovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Technology of Welding and Metallurgical Production named after V.I. Muravyev", Komsomolsk-na-Amure State University

#### **ТАКТИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ШВОВ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ**

#### **TACTICAL TECHNIQUES FOR PERFORMING TIG-WELDING**

Аннотация. Разработана тактика выполнения сварного кольцевого соединения трубных заготовок с помощью TIG сварки. Эмпирическим путем подобраны технологические параметры режима сварки с учетом угла наклона горелки и ширины колебательных движений. Получены образцы сварных соединений, удовлетворяющие по геометрии нормативной документации.

Abstract. The tactics of performing a welded annular joint of pipe blanks using TIG welding has been developed. The technological parameters of the welding mode were selected empirically, taking into account the angle of inclination of the burner and the width of the oscillatory movements. Samples of welded joints satisfying the geometry of the normative documentation were obtained.

Ключевые слова: аргонодуговая сварка, техника формирования валиков, сварное соединение.

Key words: argon-arc welding, roller forming technique, welded joint.

## Введение

В практике крупных машиностроительных предприятий часто приходится сталкиваться с разнообразием подходов к технике выполнения сварщиками сварных соединений. Так, документом, регламентирующим операции и режимы выполнения шва на производстве, является технологическая карта или спецификация процесса сварки, где приводятся основные параметры сварки и часто упускаются вопросы, связанные с манипулированием рабочим торцом электрода (горелкой), вид и диаметр сопла горелки, вылет электрода и угол наклона горелки относительно оси шва, часто упускается параметр - скорость сварки, особенно при многопроходной сварке. Кроме того, при сварке труб по большому зазору появляется возможность введения присадочной проволоки с обратной стороны соединения, а минимальный зазор требует большего тепловложения и, следовательно, форсированных режимов сварки. Минимизация величины притупления должна предусматривать обязательное введение присадочной проволоки при формировании корневого валика, а максимальный размер притупления дает возможность сварки корневого валика без присадочного материала.

## Основная часть

Целью данной работы является демонстрация тактического приема сварки кольцевого шва трубных заготовок, учитывающего геометрические параметры конструктивных элементов подготовки кромок (толщину стенок заготовок, зазор между кромками, притупление), режимы процесса сварки и технику формирования каждого прохода для получения геометрических параметров сварных швов согласно нормативно-технической документации.

Сваривались трубные заготовки из стали Ст3, диаметром 114 мм, длиной 100 мм, толщина стенки 10 мм. Сварное соединение соответствует типу С17 по ГОСТ 16037-80: с двухсторонней разделкой кромок при одностороннем формировании шва (см. рисунок 1) Пространственное положение шва – горизонтальное, соответственно отсутствует необходимость менять режимы и технику формирования каждого прохода, что существенно упрощает тактику. Стык неповоротный, что может потребовать гашения дуги для перемещения сварщика в удобную позицию. Сварка осуществляется в три прохода: корневой, заполняющий и облицовочный.

Источник питания КЕМРПИ MASTERTIG MLS 3003. Сварка на постоянном токе прямой полярности.



Рисунок 1 - Геометрические параметры соединения типа С17 по ГОСТ 16037-80

В данной тактике аргонодуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом рассмотрена сборка деталей с зазором 2 мм. Притупление равномерное по всей протяженности стыкуемых кромок и составляет  $1,0^{+0,5}_{-0,5}$  мм.

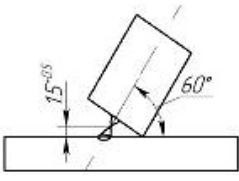
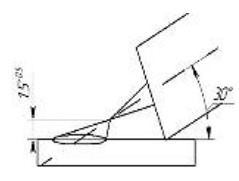
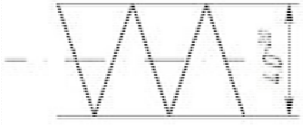



При выборе величины вылета вольфрамового электрода следует учитывать её влияние на угол наклона горелки, следовательно, ширину сварочной ванны, ширину колебательного движения, чешуйчатость шва, глубину проплавления, надежность газовой защиты, показанные в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что при опирании кромки керамического сопла на поверхность заготовки и контроле дугового зазора 1,5-2,0 мм значение вылета электрода оказывает существенное влияние на форму сварочной ванны и глубины проплавления. Так, при уменьшении вылета электрода увеличивается угол наклона горелки, сварочная ванна приобретает концентрические очертания, ми-

минимизируется в диаметре, увеличивается глубина проплавления, улучшается газовая защита, что видно по соломенному цвету следов побежалости на поверхности сформированного валика. Увеличение вылета электрода, уменьшает угол наклона, вытягивает сварочную ванну в направлении сварки, что минимизирует величину диапазона колебательного движения, снижается глубина проплавления, ухудшается газовая защита (цвета побежалости от синего до фиолетового свидетельствуют о перегреве металла шва). Тем не менее, при более остром угле наклона горелки процесс сварки становится более наблюдаемым, увеличение времени существования сварочной ванны, необходимое для обеспечения нужного провара корневого валика, приводит к снижению поробразования в сварных швах [2].

*Корневой проход* выполняется с соплом внутреннего диаметра 10 мм с опиранием его кромки на поверхности заготовок при обеспечении дугового зазора 1,5 - 2,0 мм. Использовался вольфрамовый электрод, легированный оксидом иттрия WY-20, диаметром 3,2 мм с углом заточки 15 градусов.

Для достижения нужного угла ( $30^\circ$ ) положения горелки относительно продольной оси шва устанавливаем вылет электрода 8 мм. Из-за острого угла, сварочная ванна будет вытянутой в направлении сварки, что обеспечит стабильное формирование усиления корневого валика, при непрерывной подаче проволоки, как показано на рисунке 2, а.

Таблица 1 - Влияние вылета электрода на тактику выполнения сварного шва

Вылет электрода	$\leq 8,0$ мм	$> 8,0$ мм
Угол наклона горелки		
Ширина колебательного движения		
Сварной шов		

При выполнении корневого прохода поперечные колебания зигзаг, показаны на рисунке 2, г, выполняя движение от кромки до кромки, использованы режимы сварки в таблице 2. Колебательное движение в корневом проходе должно быть в промежутке 1 мм вверх и вниз от центра зазора между деталями (см. рисунок 3).

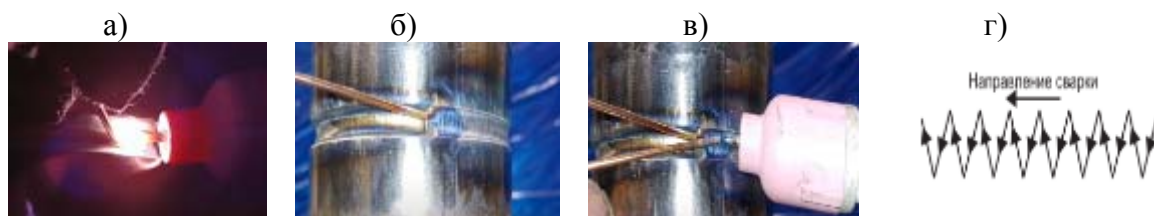


Рисунок 2 - Способ выполнения сварки трубного образца в горизонтальном положении:

а - подача сварочного прутка для сварки корневого шва; б - пример подачи присадочной проволоки; в - положение вольфрамового электрода при сварке; г - колебательное движение при сварке

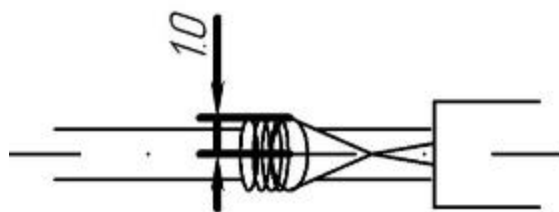


Рисунок 3 – Диапазон колебательного движения в корневом проходе

*Заполняющий проход* выполняется с соплом внутреннего диаметра 12 мм, вольфрамовый электрод WY-20 с заточкой в 15 градусов, вылет электрода составил  $\approx 8$  мм. Расплавление присадочной проволоки выполняется в верхней части кромки, для достижения минимальной выпуклости шва (см. рисунок 2, б).

При выполнении шва используется колебательное движение зигзаг, показанное на рисунке 1, г, начиная с верхней части кромки, спуская ванну вниз для расширения заполняющего шва. А также есть метод «Бабочка» этот метод основан на обкатывании керамическим соплом аргонодуговой горелки чешуек сформированного сварного шва, при этом сварщик манипулирует горелкой, делая движения, напоминающее восьмерку [3].

В этом способе нужно соблюдать, чтобы наплавляемого металла в верхней части было намного больше, чтобы заполнить все пространство шва. Ошибкой в данной технике является подача проволоки в средней части сварного шва, так как ванна может заполнить наибольший объем сварного прохода в нижней части под действием силы тяжести. Причина выбранного способа подачи проволоки выше центра шва обусловлена тем, чтобы заполнить большую часть сверху. Положение вольфрамового электрода, показано в рисунке 1, в. Данная техника предназначена для предотвращения образования такого вида дефекта, как подрез в верхней части заполняющего прохода и выпуклость усиления.

*Облицовочный проход* выполняется с использованием режимов, представленных в таблице 2. Колебательное движение вольфрамового электрода и ведение горелки остаются такие же, как и в заполняющем проходе. При аргонодуговой сварке зачищать сварные швы не обязательно, так как валики в каждом проходе кладутся равномерно и без критичной выпуклости, как например, при ручной дуговой сварке.

Таблица 2 - Режимы сварки

Параметры режима	Проход		
	Корневой	Заполняющий	Облицовочный
Сварочный ток, А	115	160	185
Диаметр сварочной проволоки, мм	2,4	2,4	3,2
Диаметр газового сопла, мм	10	12	16
Расход аргона, л/мин	13	13	15
Диаметр W электрода, мм	3,2	3,2	3,2

### Заключение

Для получения неразъемного соединения согласно нормативно-технической документации разработан тактический прием сварки трубных образцов в горизонтальном положении, получена нужная геометрия сварного соединения и уменьшен риск образования дефектов, такие как: наплыв, подрезы кромок и выпуклость усиления, а также пористость.

### Благодарности

Научно-исследовательские работы выполнены за счёт средств ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (грант № ВН001/2020).



## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Юхин Н.А. Ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в защитных газах / Н.А. Юхин. – М.: Соуэло, 2007. – 49с.
2. Муравьев В.И., Клешина О.Н., Кузнецов А.А., Матвеев Д.В. Исследование возможности увеличения прочности и долговечности титановых конструкций управлением термическим циклом сварки // Ученые записки КнАГТУ, 2010, №1-1(1) – С. 118-125.
3. Рубцова И.А., Бахматов П.В. Исследование влияния режимов TIG сварки на структуру и свойства сварных швов и соединений нержавеющей трубопровода летательного аппарата. В сборнике: молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. Материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в 3 ч. Комсомольск-на-Амуре, 2020. С. 120-122.

УДК 621.9.05

Щелкунов Евгений Борисович, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Schelkunov Evgeniy Borisovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University  
Карпов Роман Сергеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Karpov Roman Sergeevich, student of Komsomolsk-na-Amure State University

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ ОБРАБОТКИ КОРПУСНОЙ ДЕТАЛИ С ПОМОЩЬЮ CAD/CAM-СИСТЕМ

### SELECTION OF OPTIMAL MACHINING STRATEGY FOR BODY PART MACHINING USING CAD/CAM SYSTEMS

Аннотация. В данной работе рассматриваются задача выбора оптимальной стратегии для фрезерной обработки ряда поверхностей корпусной детали на станке с ЧПУ с помощью системы автоматизированного проектирования. Симуляция обработки производится в модуле «Обработка» системы Siemens NX. Проанализированы два варианта обработки корпусной детали. Обоснован выбор более рационального варианта.

Abstract. Problem of choosing of optimal surface machining strategy for body part surfaces milling using CNC machine is being solved in this proposed work using computer aided development systems. Machining simulation conducted in Simulation module of Siemens NX system. Two options for processing the body part are analyzed. The choice of a more rational option is justified.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, симуляция, обработка, САМ-система, траектория, корпусная деталь.

Key words: computer-aided development, simulation, machining, CAM-system, trajectory, body part.

### Введение

Современные системы САПР содержат широкий набор средств для упрощения и ускорения процесса разработки изделия и постановки его на производство. САД-системы служат для конструирования. С их помощью создаются 3D-модели и рабочие чертежи деталей и сборных конструкций. САЕ-системы позволяют провести анализ детали в рабочих условиях. САМ-системы применяют при разработке технологических

процессов механической обработки деталей различной сложности для симуляции процесса обработки. [1, 2, 3]

В данной работе исследуются возможности одной из таких систем, модуля «Обработка» системы САПР Siemens NX, для снижения времени обработки корпусной детали.

Siemens NX обладает широкими возможностями и применяется в различных областях металлообрабатывающего производства [4, 5].

#### **Основная часть**

На рисунке 1 показана 3D-модель корпусной детали, подвергаемой обработке резанием на станке с ЧПУ фрезерной группы. Обрабатываемые поверхности выделены.

Для обработки была выбрана цельная твердосплавная концевая фреза Walter MC230 диаметром 10 мм, длина рабочей части – 22 мм.

Было рассмотрено 2 варианта последовательности обработки указанных поверхностей.

В первом варианте сначала происходит обработка проушин, в 2 этапа – черновая и чистовая обработка, затем в 1 проход обрабатывается плоская поверхность.

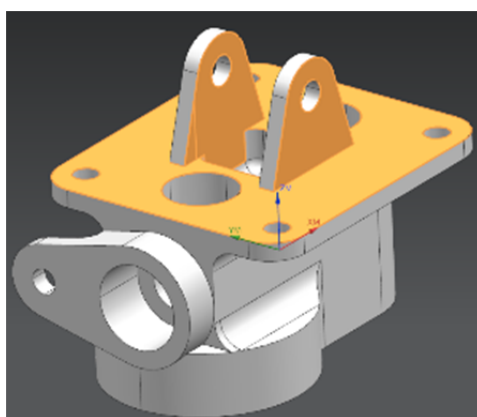


Рисунок 1 – Обрабатываемая деталь

Ниже, на рисунке 2, приведены сгенерированные траектории для обработки указанных поверхностей. Направление резания – попутное фрезерование, шаблоны резания для проушин – вдоль детали, для плоской поверхности – вдоль периферии, обеспечивают наименьшее время обработки, сокращая объем времени, требуемый на вспомогательные перемещения инструмента, при этом сохраняя направление резания.



Рисунок 2 – Сгенерированные траектории для первого варианта последовательности обработки

Суммарное расчетное время обработки – 26 секунд, из которых на вспомогательные перемещения уходит 10 секунд.

Далее рассмотрим второй вариант – сначала производится обработка плоской поверхности, затем – обработка проушин.

На рисунке 3 приведены траектории, сгенерированные NX для обработки заданных поверхностей. Используемые настройки: направление резания – попутное фрезе-

рование, шаблоны резания: для плоской поверхности – вдоль периферии, для проушин – вдоль детали. Режимы резания идентичны первому варианту.

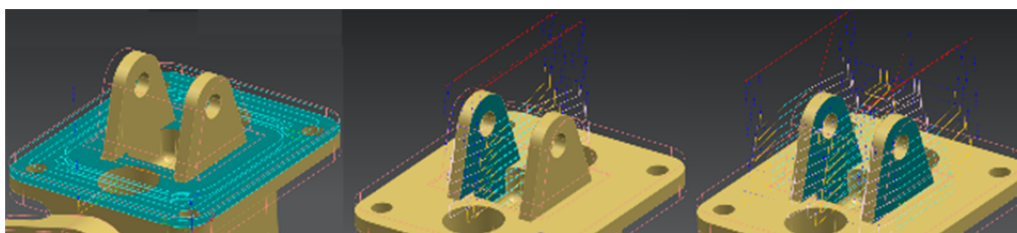


Рисунок 3 – Траектории, сгенерированные для второго варианта обработки

Суммарное расчетное время обработки – 22 секунды, из которых 8 приходится на вспомогательные перемещения.

По результатам моделирования видно, что второй вариант обеспечивает меньшее время обработки. Снижение времени обработки обеспечивается за счет выбора оптимальной стратегии обработки.

#### **Заключение**

В работе решена задача выбора оптимальной стратегии для фрезерной обработки ряда поверхностей корпусной детали на станке с ЧПУ с помощью системы автоматизированного проектирования. Симуляция обработки производилась в модуле «Обработка» системы Siemens NX. Проанализированы два варианта обработки корпусной детали. Обоснован выбор более рационального варианта.

#### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Кононенко, Р. С. Системы автоматизированного проектирования для машиностроения / Р. С. Кононенко, Е. Б. Щелкунов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 35-37. – EDN WESEMR.
2. Исследование и разработка конструкции детали кронштейн с использованием CAD/CAE систем / А. И. Пронин, Е. Б. Щелкунов, А. Е. Султангареева [и др.] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2017. – Т. 1. – № 1(29). – С. 27-32. – EDN YKTDPD.
3. Карпов, Р. С. Анализ прочности корпуса технологического приспособления с использованием CAE системы / Р. С. Карпов, Е. Б. Щелкунов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 26-28. – EDN TGQOVV.
4. Ведмидь, П.А. Программирование обработки в NX CAM / П. А. Ведмидь, А. В. Сулинов. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 303 с.
5. Данилов, Ю. Практическое использование NX / Ю. Данилов, И. Артамонов. – М.: ДМК Пресс, 2011. - 332 с.

## **СЕКЦИЯ АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТРАНСПОРТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

УДК 621.18

Агарков Олег Викторович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Agarkov Oleg Viktorovich, student of Komsomolsk-na-Amure State University

Хвостиков Александр Станиславович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Khvostikov Flexandr Stanislavovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the department "Thermal power plants", Komsomolsk-na-Amure State University

### **АНАЛИЗ ОПЫТНОГО СЖИГАНИЯ НЕПРОЕКТНОГО БУРОГО УГЛЯ ПЕРЕЯСЛОВСКОГО УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА НА КОТЛЕ БКЗ-210-140Ф КОМСОМОЛЬСКОЙ ТЭЦ-2**

### **ANALYSIS OF EXPERIMENTAL COMBUSTION OF NON-PROJECT BROWN COAL OF THE PEREYASLOVSKY COAL MINE ON THE BOILER BKZ-210-140F KOMSOMOLSKAYA CHP-2**

Аннотация. Целью данной работы являлись определение возможности безопасного и экономичного сжигания Переясловского бурого угля разреза «Переясловский» в пылеугольном котле БКЗ-210-140Ф ст. № 8 Комсомольской ТЭЦ-2, оптимизация работы основного и вспомогательного котельного оборудования, определение технико-экономических показателей работы котла, составление режимной карты, а также выдача рекомендаций по повышению экономичности и надёжности работы данного котельного оборудования.

Abstract. The purpose of this work was: to determine the possibility of safe and economical burning of the Pereyaslovsky brown coal of the Pereyaslovsky section in the pulverized coal boiler BKZ-210-140F of the Komsomolskaya CHP-2 station No. 8, optimization of the main and auxiliary boiler equipment, determination of technical and economic indicators of the boiler, drawing up a regime map, as well as issuing recommendations for improving efficiency and reliability of operation of this boiler equipment.

Ключевые слова: котлоагрегат, эффективность, надёжность, характеристики топлива, опытное сжигание.

Key words: boiler unit, efficiency, reliability, fuel characteristics, experimental incineration.

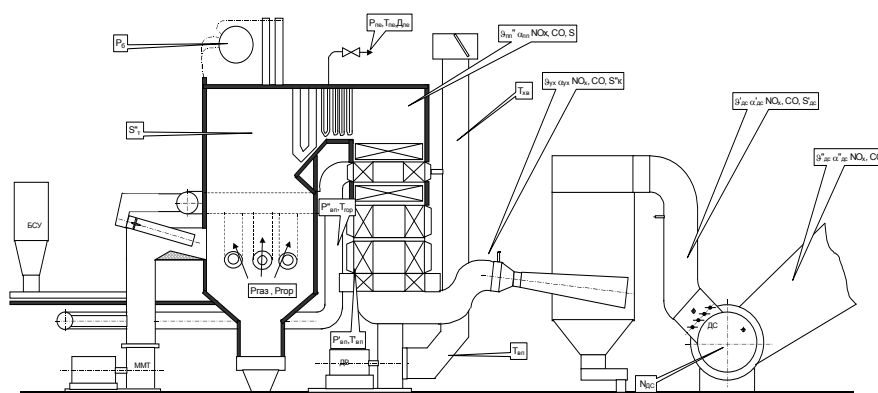
Эффективность работы теплоэнергетического оборудования зависит от соответствия параметров работы заданным эксплуатационным характеристикам. При длительной эксплуатации котельного оборудования угольный разрез, для которого он проектируется, зачастую вырабатывается или уголь, добываемый на этом разрезе, меняет свои характеристики. Эксплуатацию продолжают на новом непроеКТном угле. Для определения режимов эффективной эксплуатации выполняют опытное сжигание непроеКТного угля на действующем оборудовании. При этом определяют и необходимые мероприятия по модернизации системы.

Котел БКЗ-210-140Ф ст. № 8 Комсомольской ТЭЦ-2 рассчитан на сжигание бурого угля Райчихинского месторождения. Данный вид топлива во время эксплуатации котла был выработан и в настоящее время его закупка не производится. При замене проектного топлива необходимо произвести определение возможности безопасного и

экономичного сжигания нового топлива. В данном случае в качестве альтернативы был выбран Переясловский бурый уголь разреза «Переясловский».

Переясловский уголь по сравнению с базовым имеет более высокую теплотворную способность, класс взрывоопасности – IV группа, коэффициент взрываемости  $K_T > 3,5$  и уголь имеет повышенную минерализацию.

На рисунке 1 приведена схема измерений параметров для определения возможности сжигания угля. В ходе опытного сжигания определялись следующие параметры:  $P_6$  – давление в барабане,  $S'_T$  – разрежение вверху топки;  $P_{пе}$ ,  $T_{пе}$ ,  $D_{пе}$  – давление, температура и расход перегретого пара по паровому тракту;  $\alpha_{пп}$  – коэффициент избытка воздуха за пароперегревателем;  $CO$  – содержание окиси углерода в дымовых газах;  $NO_x$  – содержание оксидов азота в дымовых газах;  $S$  – содержание серы в дымовых газах;  $\vartheta_{пп}$  – температура уходящих дымовых газов за пароперегревателем;  $\vartheta_{yx}$  – температура уходящих дымовых газов;  $\alpha_{yx}$  – коэффициент избытка воздуха в уходящих газах;  $S''_к$  – разрежение за калорифером;  $T_{хв}$  – температура холодного воздуха;  $T_{вп}$  – температура перед воздухоподогревателем, °C;  $\vartheta'_{дс}$ ,  $\vartheta''_{дс}$  – температура уходящих дымовых газов перед и после дымососа, °C;  $\alpha'_{дс}$ ,  $\alpha''_{дс}$  – коэффициент избытка воздуха перед и после дымососа.



ММТ – мельница молотковая тангенциальная, БСУ – бункер сырого угля, ДС – дымосос  
Рисунок 1 – Схема измерений основных параметров в ходе опытного сжигания

Перед началом опытного сжигания непроектного угля Переясловский бурый уголь был складирован в отдельный штабель, были очищены от шлаковых отложений топочные экраны и от золовых отложений кубы воздухоподогревателей, дымососов, золоулавливающих устройств и скрубберов; отревизированы шибера лючки и гляделки; произведен ремонт всех мельниц, где заменены все билы. По измеренным параметрам были определены следующие характеристики: тепловая мощность (нагрузка) котла, потери тепла с уходящими газами, коэффициент, учитывающий тепло внесенное в топку с подогретым вне котла топливом (подогрев в подогревателях) и воздухом (калориферы), потери тепла от химической неполноты сгорания, потери тепла от механического, потери тепла с теплом шлаков, расход первичного воздуха (сушильного агента), расход влажной смеси за мельницей, мощность электродвигателей мельниц, дутьевых вентиляторов и дымососов, удельный расход электроэнергии на тягу, дутье и пылеприготовление.

Отмечен интенсивный занос золоуловителей твердыми отложениями сульфата кальция. Место наибольших отложений – переход трубы Вентури с круглого в прямоугольное сечение. Продолжительность работы котла при сжигании Переясловского угля не более 14 суток. Аэродинамическое сопротивление золоуловителей котла в конце периода возрастает в 2-3 раза, расход эл. энергии на тягу возрастает в 1,5-2 раза, а нагрузка котла снижается до  $0,65 \cdot D_{ном}$  (ограничение по тяге).

Причиной данной проблемы является высокое содержание оксида кальция в золе топлива, которое находится в пределах 14,0 %. Это указывает на высокую степень отложения уплотненной золы, делая применение данного угля невозможным для существующих золоулавливающих установок. Увеличение расхода воды на золоулавлива-

ющих устройствах не приводит к желаемому результату, так как зона активных отложений смещается из трубы Вентури в нижнюю часть каплеуловителя и приводит к забитию входного сечения и гидрозатвора скруббера.

В ходе опытного сжигания отмечена повышенная склонность угля к самовозгоранию на специально подготовленных складах. Для ликвидации очагов возгорания применялись методы уплотнения бульдозером, заполнения до наивысших отметок в бункере сырого угля котлов и ускоренное срабатывание угля.

Существующие пылесистемы обеспечивают взрывобезопасный режим размола данного топлива. Случаев загорания пыли, хлопков и взрывов по пылеприготовительному тракту за время испытаний не происходило. Однако, для обеспечения взрывобезопасности при нарушениях инструкций работы может быть рекомендовано применение сушки угля уходящими газами.

В ходе опытного сжигания угля было выявлено, что эксплуатация котельного агрегата Комсомольской ТЭЦ-2 на непроектном угле Переясловского месторождения невозможна. Для дальнейшей безопасной и эффективной эксплуатации необходимо в качестве топлива использовать смесь топлив для снижения отложений оксида кальция на поверхностях золоуловителя, а также применить мероприятия по снижению самовозгорания угля на складах и в системе пылеприготовления.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Даница А.Г. Зилев С.С. Опытное сжигание непроектного бурого угля Переясловского угольного разреза на котле БКЗ-210-140Ф ст. № 8 Комсомольской ТЭЦ-2. / Технический отчет АО «ХЭТК» г. Хабаровск 119 с.

УДК 621.45.026

Гринкруг Мирон Соломонович - кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Grinkrug Miron Solomonovich - Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

Мохамад Кара Балли – Сирийский государственный университет, аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета

Mohamad Kara Bally - Syrian State University, PhD student, Komsomolsk-na-Amure State University

Новгородов Никита Александрович, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Novgorodov Nikita Alexandrovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

#### **СИСТЕМА ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВО ВРЕМЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

#### **SYSTEM FOR IMPROVING THE SAFETY OF AIRCRAFT GAS TURBINE ENGINES DURING OPERATION**

Аннотация. В работе рассматривается способ обнаружения трещин в лопатках авиационных турбин во время эксплуатации. Способ заключается в том, что в лопатку турбины помещают тонкостенную капсулу с активным веществом. При появлении трещины, оболочка капсулы разрывается, а активное вещество поступает в проточную часть турбины, где регистрируется датчиком. Рассмотрено прочностное состояние тонкостенной капсулы, выполненное в программном комплексе ABAQUS. Получены результаты по влиянию параметров стенок капсулы и геометрических параметров трещины на необходимое для разрыва давление в капсуле.



Abstract. The paper considers a method for detecting cracks in the blades of aircraft turbines during operation. The method consists in placing a thin-walled capsule with an active substance into a turbine blade. When a crack appears, the capsule shell is torn, and the active substance enters the flow path of the turbine, where the sensor records it. The strength state of a thin-walled capsule, made in the ABAQUS software package, is considered. Results have been obtained on the influence of the parameters of the capsule walls and the geometrical parameters of the crack on the pressure required for rupture in the capsule.

Ключевые слова: безопасности, лопатка турбины, аналитическое решение, цифровое моделирование.

Key words: safety, turbine blade, analytical solution, numerical modeling.

Лопатки турбины являются одним из наиболее нагруженных элементов в авиационном двигателе, и любое повреждение лопатки турбины, приводящее к ее разрушению, будет иметь катастрофический результат для двигателя в частности и для самолета в целом во время работы двигателя.

Разрушение лопатки турбины происходит не внезапно, а в результате появления микроскопической трещины в теле лопатки и ее роста, приводящего к разрушению лопатки турбины. Предлагаемый способ [1] основан на имплантации тонкостенных капсул в тело лопатки турбины вблизи внешней поверхности лопатки турбины. Эти капсулы содержат активное вещество, из которого при высоких температурах внутри капсулы образуется высокое давление.

В случае образования трещины стенка капсулы разрушается в месте образования трещины, и активное вещество выходит из нее в проточную часть турбины, где есть датчики, фиксирующие это вещество.

Можно сказать, что величина давления, необходимого для разрушения оболочки капсулы, зависит в основном от нескольких факторов, наиболее важными из которых являются размеры трещины, образующейся на стенке лопатки турбины, и толщина стенки капсулы.

Для изучения влияния размеров трещины и толщины стенки капсулы на необходимое давление внутри капсулы было выполнено моделирование в программе SIMULIA ABAQUS Unified Fea.

Модель включала в себя тонкостенную цилиндрическую капсулу, выполненную из алюминиевого сплава помещенную в толстостенную цилиндрическую оболочку. В оболочке моделировалась узкая трещина постоянной ширины. Для повышения точности расчетов количество конечных элементов вблизи трещины было увеличено, а их размер уменьшен. Пример смоделированной оболочки с капсулой представлен на рисунке 1.

В процессе численного эксперимента при различных параметрах трещины (длины и ширины) и для различных толщин капсулы повышалось давление в капсуле и, следовательно, увеличивалась разность давлений ( $\Delta P$ ), действующая на стенку капсулы вблизи трещины. Рост давления продолжался до разрушения стенки капсулы, которое происходило в зоне трещины.

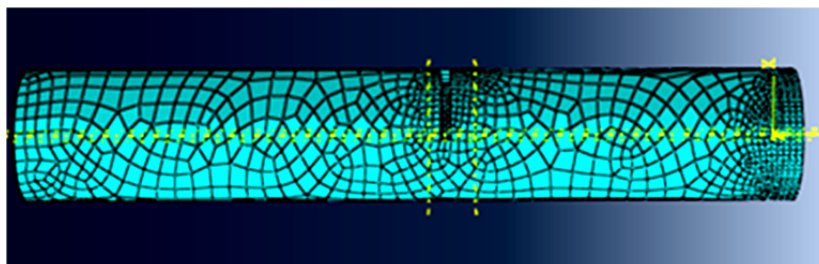


Рисунок 1 – Расчетная модель оболочки с капсулой с разбиением на конечные элементы. Величину давления, соответствующую разрушению стенки капсулы, фиксировали по изменению ширины разреза и толщины стенки капсулы. Было установлено, что



длина разреза не влияет на величину  $\Delta P$  при котором происходит разрушение капсулы. Результаты расчетов приведены в таблицах 1 и 2 и на рисунках 2 и 3.

Таблица 1 - Зависимость разностей давлений от ширины трещины

Разность давлений, $\Delta P$ (МПа)	27	22,4	19,1
Ширина трещины, Н (мм)	1,1	1,4	1,6

Таблица 2 - Зависимость разностей давлений от толщины стенки

Разность давлений, $\Delta P$ (МПа)	27	18,9	14,8	10,6
Толщина стенки капсулы, d (мм)	0,5	0,4	0,3	0,2

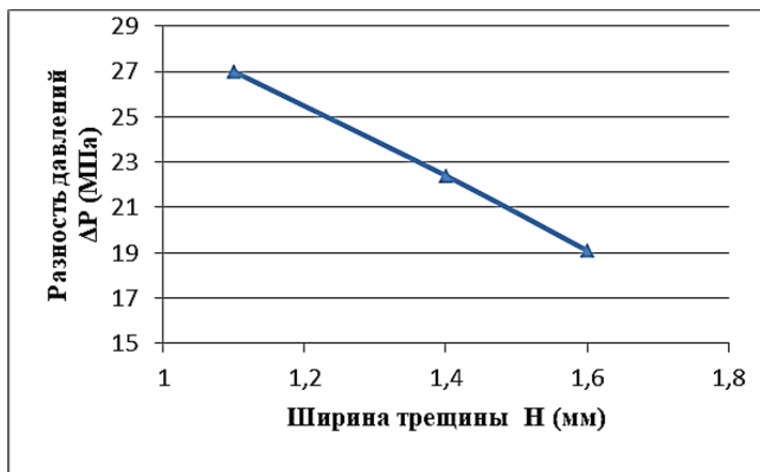


Рисунок 2 – Зависимость разностей давлений от ширины трещины в оболочке  $\Delta P=f(N)$



Рисунок 3 – Зависимость разностей давлений от толщины стенки капсулы  $\Delta P=f(d)$

По результатам расчетов требуемая для разрушения капсулы разность давлений увеличивается с толщиной стенки капсулы и уменьшается при росте ширины щели.

*Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10114 «Разработка системы диагностирования поврежденных турбинных лопаток и способа оптимизации теплоотвода в условиях термической усталости»*

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гринкруг М.С., Поповский А.В. Способ диагностики зарождающихся дефектов. Патент на изобретение №2168724, РФ, RU C1 7 G 01 N 33/00, G 01 M 3/16, F 01 D 5/18 №2000106087/28; Заявлено 13.03.2000. Оpubл. 10.06.2001. Бюл. № 16.

Гуменюк Надежда Сергеевна, старший преподаватель кафедры «Кораблестроение и компьютерный инжиниринг, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Gumenyuk Nadezhda Sergeevna, Senior Lecturer of Department «Shipbuilding and Computer Engineering», Komsomolsk-na-Amure State University

Тихова Ирина Викторовна, студентка, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Tikhova Irina Viktorovna, student of Komsomolsk-na-Amure State University

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНТЕЙНЕРОВ OPEN TOP КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧНОСТИ ПЕРЕВОЗКИ УГЛЯ**

### **USING OPEN-TOP CONTAINERS AS A WAY TO INCREASE THE ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS OF COAL TRANSPORTATION**

Аннотация. В работе рассмотрены современные проблемы перевозки массового навалочного груза, такого как уголь. Выполнен анализ использования контейнеров open top для перевозки и хранения угля, приведены достоинства и недостатки данного способа. Существенное внимание уделено вопросам экологичности перевозки и перегрузки угля, затронуты некоторые экономические аспекты.

Abstract. The paper considers modern problems of transportation of bulk bulk cargo, such as coal. The analysis of the use of open-top containers for the transportation and storage of coal is carried out, the advantages and disadvantages of this method are given. Considerable attention is paid to the issues of environmental friendliness of coal transportation and transshipment, some economic aspects are touched upon.

Ключевые слова: массовый навалочный груз, уголь, контейнер open top, пыление, выдувание, экология перевозки и перегрузки, экономика перевозки.

Key words: bulk cargo, coal, open top container, dusting, blowing, ecology of transportation and transshipment, economy of transportation.

Последние сто лет бурными темпами идет развитие промышленности. С целью улучшения качества жизни, человек освоил новые технологии, построил множество предприятий. Такой технический прогресс сложно представить без участия топливно-энергетического комплекса и транспорта, для которых одним из значимых ресурсов по сей день остается уголь. Уголь – это и объект добывающей промышленности, и топливо для топливно-энергетической промышленности, и сырье для химической и металлургической промышленности, и груз, перевозимый транспортом. В общем, многие достижения человечества связаны именно с этим природным ресурсом.

Но, как оказалось, современное общество получило не только блага цивилизации, а также ряд серьезных проблем, связанных, прежде всего, с экологией. Уголь по своим характеристикам относится к пылящим грузам, склонным к самонагреванию и самовозгоранию. Наиболее выражены эти негативные факторы проявляются при перевалке угля (рисунок 1), а также и при транспортировке в открытых кузовах автомобилей и вагонов и хранении на открытых площадках, где происходит пыление и выдувание. По статистическим данным только при железнодорожных перевозках по России за год теряется от 3 до 5 млн. т угля и это примерно 1 % от перевозимого объема, а при автомобильных перевозках потери достигают 5 %. При перевозках угля в железнодорожных полувагонах также происходит утечка груза в конструктивные зазоры и неплотности кузова. Угольная пыль постепенно накапливается в воздухе, приводит к появлению эффекта «черного снега». Конечно же, проблемы с экологией перевозки угля

появились далеко не сегодня, просто за счет накопительного эффекта они не проявлялись сразу, как, например, при авариях и разливах нефти, и стали видны только сейчас, и, возможно, именно на фоне изменения климата и природных катастроф. Поэтому многие эксперты только сейчас заговорили о существенном негативном влиянии угля на окружающую среду и, соответственно, ужесточении экологических норм при перевозке и перевалке угля.



Рисунок 1 – Пыление угля при перегрузочных процессах

Логистика перевозок предполагает доставить груз до потребителя точно в срок с минимальными затратами, т.е. есть при планировании и организации перевозки в первую очередь рассматривается экономическая составляющая, заключающаяся в снижении издержек на перемещение груза. Заметное ухудшение экологии нашей планеты заставляет пересмотреть основную цель логистики перевозок и добавить требования сохранения экологии и минимального воздействия на окружающую среду. Так, в угольной логистике скорее всего станут стандартом беспылевые перегрузочные процессы и хранение, которые на сегодняшний день являются новыми экологическими трендами, и тогда снизить затраты на перевозку уже не получится. Потребуются дополнительные вложения на создание и применение технологий для борьбы с пылением при перевозке и перегрузке угля на всех видах транспорта.

Транспортировка угля производится в основном тремя видами транспорта: автомобильным, железнодорожным и водным. Причем зачастую перевозка осуществляется двумя видами транспорта с перевалкой с одного вида транспорта на другой. В повышении экологичности угольной логистики высока роль морских портов, где происходит грузообработка и хранение значительных объемов угля. Практика показала, что достичь высоких показателей экологичности на универсальных терминалах, где происходит перевалка угля, довольно проблематично, а специализированных угольных терминалов в России не так уж и много. В Балтийском бассейне имеются три специализированных терминала в Усть-Луге (Ростерминалуголь), Вентспилсе (Baltic Coal Terminal, Латвия) и Таллине (Estonian Coal Terminal, Эстония) и восемь универсальных. В Дальневосточном бассейне всего два специализированных терминала (в Ванино и Восточный порт), по сравнению с девятью универсальными. В Черноморском бассейне перевозка угля осуществляется через порты Туапсе и Новороссийск, где также нет специализированных угольных терминалов.

Проведенные научные исследования и не большой опыт практического применения показали, что альтернативой дорогостоящим специализированным терминалам с их ветрозащитными и пылеподавляющими технологиями, крытым складам и галереям, является перевозка угля в контейнерах open top и применением специальных спредеров, которые обеспечивают высыпание груза переворотом или наклоном контейнера (рисунок 2).



Рисунок 2 – Контейнеры и специальный спредер

Некоторые российские и зарубежные порты уже имеют опыт использования контейнеров в логистике навалочных и насыпных грузов, причем не только угольных. У перевозки угля в таре, как и у любой другой технологии, есть свои достоинства и недостатки. Рассмотрим их ниже и начнем, конечно же, с положительных моментов.

Традиционно перевозка угля по железной дороге происходит в открытых полувагонах. Контейнер open top, также как и железнодорожный полувагон, имеет открытый верх, поэтому загрузка угля в контейнеры осуществляется точно по таким же технологиям, как и в полувагоны и, следовательно, не потребуются замены погрузочного оборудования и дополнительных финансовых вложений. Отличительной особенностью контейнеров open top является наличие гибкой съемной крыши. Такое конструктивное решение позволяет избежать выдувание угольной пыли во время движения состава. Не стоит забывать тот факт, что географические особенности нашей страны предполагают перемещение угольных грузов от мест добычи до портов или потребителей на значительные расстояния, а потери от выдувания зависят от протяженности перевозки. Таким образом, использование контейнеров open top как закрытой тары позволяет значительно снизить потери груза и повысить экологичность железнодорожной составляющей логистики угля.

Любой контейнер – это прежде всего тара, которую можно использовать не только для транспортировки, но и для хранения грузов. И это уже выигрыш по двум направлениям. Контейнерные терминалы и склады в разы чище и экологичнее угольных. Контейнеризация навалочных грузов – это мобильная технология, которую можно применить на универсальных терминалах без существенных изменений с не продолжительным сроком внедрения. Перевозка неразрывно связана с торговлей, где спрос рождает предложения, т.е. грузопотоки. И, если грузопотоки внутри страны более-менее стабильны, то перевозка энергоносителей в большей степени заточена на экспорт и мировую торговлю, которая в последнее время крайне далека от стабильности. Вчера везли на запад, сегодня – на восток, куда и что завтра? Изменчивы не только направления, а также и объемы, и номенклатура перевозимых грузов. В нынешних реалиях можно поставить под большой вопрос целесообразность создания дорогостоящих специализированных терминалов и складов (строительство специализированного угольного терминала в Вентспилсе в 2009 обошлось примерно в 80 млн. евро).

Иллюстрацией вышесказанного является порт Усть-Луга, где имеется специализированный угольный терминал «Ростерминалуголь», а также глубоководный контейнерный терминал (рисунок 3). «Усть-Лужский контейнерный терминал» в январе 2019 начал перевалку угольных грузов с использованием технологии револьверных спредеров (стоимость спредера около 400 тыс. долларов) и стал первым, применившим данную технологию, предприятием в России. Переход контейнерного терминала на угольный груз был осуществлен с целью минимизировать риски простоев, т.к. в данный период наблюдалось снижение грузопотока контейнерных грузов на данном направлении, при этом угольный терминал работал с перегрузом. Применение технологии револьверных спредеров в Усть-Луге позволило максимально эффективно использовать существующее оборудование и снизить нагрузку на окружающую среду.



Рисунок 3 – Терминалы порта Усть-Луга: угольный и контейнерный слева направо

На сегодняшний день отсутствует опыт перевозки угля в контейнерах на морском транспорте, поэтому использование контейнеров open top в портах в большей степени можно рассматривать как способ беспылевого хранения. В случае с железнодорожными перевозками без участия водного транспорта контейнер open top обеспечивает беспылевые перегрузочные процессы.

Так, контейнерные перевозки угля железнодорожным транспортом осуществляются с сентября 2020 в Китай через погранпереход Забайкальск – Маньчжурия. Ширина железнодорожной колеи в Китае и России разная, поэтому перегрузка неизбежна, но в случае с контейнерами – это более чистый и быстрый процесс, чем с полувагонами. Отсутствие выгрузки угля из транспорта также решило проблемы смерзаемости угля в вагоне и необходимости трудоемкой очистки кузова вагона после угольного груза.

С точки зрения снижения транспортных издержек, перевозка такого массового груза как уголь в контейнере open top в целом не конкурентоспособна. Стоимость фитинговой платформы плюс контейнер выше стоимости полувагона. Сейчас одним из сдерживающих контейнеризацию угля факторов является отсутствие в необходимых количествах фитинговых платформ, специализированных контейнеров и спредеров. Но в расчет стоимости перевозки входят и другие показатели. За такой короткий период промышленного использования контейнерных перевозок угля не была получена статистика частоты повреждений вагонов и контейнеров и вряд ли была проведена полная оценка экономической эффективности от безремонтной эксплуатации вагонного и контейнерного парка. А на фоне ухудшения экологической обстановки, призывов некоторых стран вовсе отказаться от «грязного» угля и ужесточения экологических норм, нет никаких гарантий, что в расчете стоимости перевозок не появится новая статья калькуляции расходов – экологический сбор на открытую транспортировку и хранение пылящих грузов.

Подытоживая, можно сказать, что использование контейнеров open top в угольной логистике является перспективным, но не на всех направлениях, а точно, и ключевыми факторами их применимости будут показатели повышения экологичности и сохранности качества груза, а не снижение экономических транспортных затрат.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Погодин В.А. Контейнером по навалу // Портовый сервис • Полугодовой отчет-2017 © ИАА «ПортНьюс». 2017. С. 54-57. – URL: [https://morproekt.ru/attachments/article/827/port\\_news\\_2017.pdf](https://morproekt.ru/attachments/article/827/port_news_2017.pdf) (Дата обращения 01.10.2022).

2. Морстройтехнология о решении проблемы пыления сыпучих грузов на терминалах // Портовый сервис «ПортНьюс». – URL: <https://portnews.ru/companies/morstrojtehnologija/news/1155/>. – Дата публикации: 01 февраля 2018.

3. Перевозка угля вызывает наибольший вред для экологии // Экология: национальное информационное агентство. – URL: <https://nia.eco/2022/01/06/28097/>. – Дата публикации: 06 января 2022.

4. Перевозка угля и других насыпных грузов в контейнерах: новая универсальность или новые сложности // Информационное агентство «РЖД-Партнер.РУ». – URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/perevozka-uglya-i-drugikh-nasyunnykh-gruzov-v-konteynerakh-novaya-universalnost-ili-novye-slozhnosti/>. – Дата публикации: 19 марта 2021.

5. Морской порт Усть-Луга : сайт. – URL: <http://xn----8sbi5a2agfe2f.xn--p1ai/> (дата обращения 01.10.2022).

Гунькова Ольга Владимировна, старший преподаватель кафедры «Кораблестроение и компьютерный инжиниринг»; Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Gunkova Olga Vladimirovna, Senior Lecturer of the Department of Shipbuilding and Computer Engineering; Komsomolsk-na-Amure State University

Тарасова Ирина Валерьевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Tarasova Irina Valeryevna, student of Komsomolsk-na-Amure State University

## **ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕГРУЗКИ ГЛИНОЗЕМА В ПОРТАХ РОССИИ**

### **TECHNOLOGY OF ALUMINA TRANSSHIPMENT IN RUSSIAN PORTS**

Аннотация. В данной работе даны транспортные характеристики перевозимого насыпного груза (глинозема) и его влияние на транспортные средства и человека, описана новая технология перегрузки глинозема с морского транспорта на железнодорожный в порту Находка с помощью мобильного бункера. Также представлена характеристика вагонного вкладыша мягкого разового.

Abstract. In this paper, the characteristics of the transported cargo (alumina) are given, a new technology of transshipment of alumina from sea transport to railway transport in the port of Nakhodka using a mobile bunker is described. The characteristics of a soft one-time carriage liner are also presented.

Ключевые слова: глинозем, бункерная установка, перегрузка, технологическая карта, транспортировка.

Key words: alumina, bunker installation, transshipment, technological map, transportation.

Глинозем – это кристаллический порошок белого цвета, получаемый из руд, содержащих алюминий. Глинозем предназначен для производства алюминия.

Глинозем обладает повышенной сыпучестью, это абразивный материал, сильно пылящий, обладает высокой текучестью, взрывоопасен, склонен к слеживаемости. Данный груз нельзя хранить возле других грузов, которые могут быть подвержены вредному влиянию пыли и влаги.

При загрузке глинозема в морские суда угол естественного откоса должен составлять примерно 30 °, грузовые помещения следует убрать, промыть морской водой и высушить, удалить остатки ранее перевозимого груза.

Глинозем не оказывает вредного влияния на организм человека, но при проведении перегрузочных операций следует надевать спецодежду, защищающую от пыли, очки, респираторы или марлевые повязки.

Одно из крупнейших в мире предприятий по производству глинозема расположено в Австралии, 20 % которого принадлежит российской Объединенной компании «РУСАЛ».

ОК «РУСАЛ» – ведущее предприятие по производству алюминия в мире. Компания занимается добычей бокситов и производством глинозема не только в России, но и за ее пределами. Предприятие владеет девятью заводами по изготовлению глинозема в таких странах, как Россия, Австралия, Ирландия, Украина, Ямайка и Гвинея. Импорт глинозема из Австралии в Россию составляет 32 % от общего объема поставок.

Из Австралии в Россию глинозем доставляется морским транспортом, далее происходит перегрузка в порту Ванино (Хабаровский край) на железнодорожный состав и после этого доставляется на заводы «РУСАЛА» в Сибири.



В декабре 2018 года впервые была произведена перевалка глинозема с морского транспорта на железнодорожный в порту Находка (Приморский край). Данный проект был реализован благодаря успешной работе нескольких участников: Находкинского морского торгового порта, компании РУСАЛ и инжиниринговой компании TTS – предприятия по производству оборудования для сыпучих грузов.

В порту Ванино и Находка используются сдвоенные операции: полувагоны, которые приходят в порт, выгружаются и сразу загружаются глиноземом. Это позволяет не перегружать мощности порта и обеспечивает быструю подачу вагонов под загрузку.

Глинозем перевозится в универсальных полувагонах, внутри которого расстилается герметичный вкладыш в виде большого полипропиленового мешка, не пропускающего влагу, который называют вагонный вкладыш мягкий разовый (рисунок 1-2).



Рисунок 1 – Вагонный вкладыш мягкий разовый

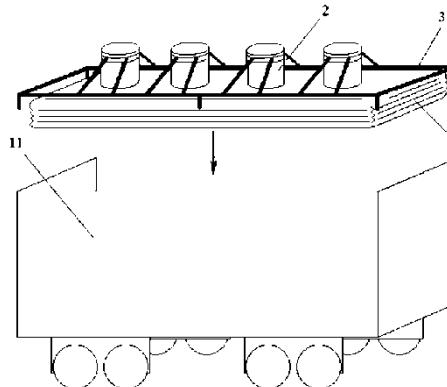


Рисунок 2 – Схема вагонного вкладыша мягкого разового

Данный вкладыш защищает грузы от воздействия окружающей среды и предотвращает доступ к грузу, используется для хранения и перевозки насыпных грузов.

Глинозем является гигроскопичным грузом, то есть хорошо впитывает влагу. Соответственно основной задачей при загрузке вагонов является сохранить целостность вкладыша для обеспечения сохранности груза при транспортировке. Это обеспечивается процессом предварительного раздутия вкладыша, размещаемого внутри полувагона. Воздух во вкладыш поступает с помощью вентиляторов из загрузочных рукавов. Вентиляторы расположены на бункерной установке.

Глинозем – пылеемкий груз, поэтому в портах эксплуатируется аспирационная система для пылеподавления в процессе погрузки, она предотвращает попадание пыли за границы мест погрузки. На причале также установлен погрузчик-пылесос вакуумный, который собирает осевший груз. Данные технические системы исключают процесс пыления в ходе выполнения перегрузочных операций из бункера в полувагоны.

Перегрузка глинозема из бункерного комплекса осуществляется порталными кранами, которые оборудованы грейферами. Данные грейферы обеспечивают герметичность при смыкании ковшей с помощью резиновых уплотнителей. Работники порта регулярно осуществляют замену уплотнителей, это снижает пыление груза. Грейферные ковши открывают на высоте не более одного метра от верхней кромки бункера, тем самым так же обеспечивая минимальное пыление глинозема.

Перегрузка глинозема в порту осуществляется строго по разработанной технологической карте, за выполнением требований которой установлен жесткий контроль. При скорости ветра больше 8 м/с перегрузочные работы останавливаются. Перевалку глинозема осуществляют специально подготовленные сотрудники, которые имеют необходимую квалификацию.

Для определения точного количества груза во вкладыше полувагона в Находкинском бункере установлены специальные приборы – расходомеры. Данное устрой-



ство показывает не только массу груза в килограммах, но и скорость потока груза (кг/ч). Программный комплекс этого устройства показывает общую массу всех загрузочных мест, собирает статистику предыдущих загрузок, контролирует текущую загрузку и предотвращает пересыпание груза из вкладыша.

Бункер в порту Находка – это мобильное устройство, обеспечивающее выгрузку глинозема по всей длине погрузочного фронта. Бункер установлен на опорных рельсах, что позволяет производить его перемещение к нужному трюму. На бункере установлен электрический кабельный барабан, управление которым устроено таким образом, чтобы не переподключать с одного места на другое, это также способствует мобильности бункера.

Бункер можно быстро разбирать и собирать на новом месте. Он имеет небольшой вес – около 53 т.

Производительность бункера в порту Находка составляет 800 – 900 тонн за смену.

К преимуществам перевозки глинозема в вагонном вкладыше мягком разовом можно отнести: низкую стоимость перевозки железнодорожным транспортом по сравнению с перевозкой в специализированном вагоне; сокращение порожних пробегов подвижного состава; отсутствие очистки вагонов; экономию на потерях и порче продукции.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рябчинский А.И. Организация перевозочных услуг и безопасность транспортного процесса : учебник для вузов / А. И. Рябчинский, В. А. Гудков, Е. А. Краченко. – М. : Академия, 2013; 2011. – 255с. – (Высшее профессиональное образование).

2. Головина А.С. Анализ способа перевозки сыпучих грузов с использованием полимерных вкладышей // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2017. Т. 1. С. 59-62.

УДК 621.311

Евлахина Екатерина Андреевна, студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета

Evlahina Ekaterina Andreevna, student of Komsomolsk-na-Amure State University

Шаломов Вячеслав Иванович, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Shalomov Vyacheslav Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

#### **ГАЗОТУРБИННЫЕ И ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ В СТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ**

#### **GAS TURBINE AND COMBINED-CYCLE GAS INSTALLATIONS IN STATIONARY THERMAL POWER ENGINEERING**

Аннотация. В статье сделан краткий обзор состояния и развития газотурбинных и парогазовых установок на тепловых электрических станциях, приведены для сравнения основные технические данные современных зарубежных и отечественных газотурбинных и парогазовых установок, поставлена цель научно-исследовательской работы.

Abstract. The article provides a brief overview of the state and development of gas turbine and combined-cycle gas installations at thermal power plants, provides for comparison the main technical data of modern foreign and domestic gas turbine and combined-cycle gas installations, sets the goal of research work.

Ключевые слова: газотурбинные и парогазовые установки, тепловые электрические станции, техническое перевооружение, мощность, коэффициент полезного действия.  
Key words: gas turbine and combined-cycle gas installations, thermal power plants, technical re-equipment, power, efficiency.

Первая в мире энергетическая газотурбинная установка была построена и введена в действие в 1939 г. При начальной температуре газов  $550^{\circ}\text{C}$  она развивала мощность 4 МВт с коэффициентом полезного действия (КПД) 18%.

Сегодня газотурбинные и созданные с их использованием парогазовые установки (ГТУ и ПГУ) заняли прочное место в мировой энергетике. Серийно выпускаются ГТУ мощностью 300 – 400 МВт с КПД до 40%. На их основе строятся ПГУ мощностью 500 – 600 МВт с одной ГТУ и 1000 – 1200 МВт с двумя ГТУ при КПД нетто до 60% [1].

На ТЭС получили распространение утилизионные ПГУ, схема которой изображена на рисунке 1. В состав ПГУ входят ГТУ, утилизионный паровой котёл (УПК), паровая турбина (ПТ). ГТУ включает компрессор (КМ), камеру сгорания (КС), газовую турбину (ГТ) и электрогенератор (Г). Компрессор ГТУ сжимает атмосферный воздух и нагнетает его в КС. Одновременно в КС подаётся топливо (дизельное или природный газ). Образующиеся в результате горения газы поступают в газовую турбину, в которой они совершают работу. Большая часть этой работы затрачивается на привод компрессора. А меньшая часть расходуется на привод электрогенератора. Отработавший в газовой турбине газ направляется в УПК. В этом котле за счёт теплоты уходящих газов происходит нагревание питательной воды до температуры кипения, парообразование и перегрев пара. Отдав большую часть своей теплоты, газы выходят из УПК в атмосферу. Перегретый пар поступает в паровую турбину, где совершает полезную работу по приводу электрогенератора. Отработавший в турбине пар сбрасывается в конденсатор, где за счёт отвода теплоты охлаждающей водой превращается в воду, которая насосом подаётся в УПК.

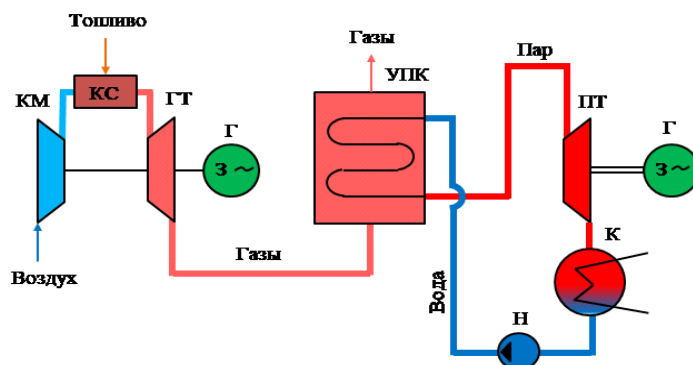


Рисунок 1 – Схема парогазовой установки: КМ – компрессор; КС – камера сгорания; ГТ – газовая турбина; Г – генератор; УПК – утилизионный паровой котёл; ПТ – паровая турбина; К – конденсатор; Н – насос

В последние годы на отечественных электростанциях введены в действие ПГУ мощностью 400-450 МВт с современными газовыми турбинами. Удельные расходы топлива на этих ПГУ на 30-40% ниже, чем на действующих паровых ТЭС, построенных 40-50 лет назад и работающих на природном газе. Целесообразно их техническое перевооружение с использованием парогазовых технологий. Оно необходимо также для многочисленных ещё более старых паровых ТЭС, где предпочтительнее ПГУ мощностью 120 и 180 МВт.

Среди новых энергетических технологий, способных существенно повысить эффективность функционирования энергетического оборудования и наиболее подготовленных к реализации, являются ПГУ. Их широкомасштабное применение в отече-

ственной энергетике требует создания и серийного производства ГТУ на начальную температуру газов 1300 - 1500°C, уже применяемую в зарубежном энергомашиностроении.

Отечественными предприятиями газотурбостроения при участии специалистов НПО «Центральный котлотурбинный институт» (ЦКТИ) разрабатываются и создаются ГТУ, показатели которых практически соответствуют мировому уровню и обеспечивают сокращение разрыва в развитии отечественного и мирового газотурбостроения. К ним относятся: ГТЭ-160 производства АО «Ленинградский металлический завод» (ЛМЗ), ГТЭ-110 завода "Рыбинские моторы", ГТЭ-180 АО ЛМЗ, а также энергетические варианты ГТУ, создаваемые на базе современных авиационных и судовых газотурбинных двигателей. При этом одной из основных задач создания современных ГТУ является обеспечение надежной работы элементов, работающих в области высоких температур. Для защиты лопаток от эрозии и коррозии в агрегатах с умеренными начальными температурами газа (до 1050-1200 °С) наибольший эффект дает использование оптимальных способов интенсификации конвективного теплообмена в охлаждающих каналах, при которых рост съема тепла опережает темпы увеличения гидравлического сопротивления [2].

Для агрегатов с температурами газа 1300-1500°C нужно использовать различные варианты комбинированного охлаждения лопаток, широко распространённые в авиастроении. При этом требуется разработать методы расчёта граничных условий со стороны подвода тепла и получить экспериментальные данные по длительной и циклической прочности подобных лопаток.

При внедрении высокотемпературных газовых турбин (до 1600 °С) по данным [3] КПД ПГУ может достигать 64-65 %, КПД ГТУ 43-45 %. В качестве топлива для ПГУ рассматривается природный газ. Для охлаждения узлов горячего тракта предусматривается паровое охлаждение.

Вместе с тем, на ближайшем этапе технического перевооружения могут применяться ГТУ с умеренными параметрами (температура газов 1000-1100 °С). В этом случае реконструкция может быть осуществлена на ТЭС, имеющих остаточный ресурс, сравнимый с ресурсом ГТУ, или использующих два вида топлива, с превращением паросиловой установки в парогазовую.

В таблице 1 приведены технические данные некоторых современных зарубежных и отечественных ГТУ, применяемых в стационарной теплоэнергетике.

Таблица 1 – Технические данные современных ГТУ

Фирма	СП «Интер-турбо» (ГТЭ-160 ЛМЗ)	Siemens/ KWU	ABB	ГТЭ-180 ЛМЗ
Тип ГТУ	V94.2	V94.2A	13E2	V94.2
Мощность ГТУ, МВт	157	190,0	165,1	178
КПД ГТУ, %	34,4	36,4	35,7	36,7
Расход воздуха перед компрессором, кг/с	504	527	532	524
Степень повышения давления в компрессоре ГТУ	11,1	14,0	14,6	15,0
Температура газа перед турбиной, °С	1070	1310	1160	1250
Температура газа за ГТУ, °С	537	570	524	543
Масса, т	275	320	330	300
Мощность ПГУ, МВт	233	288	485,1	210,1
КПД ПГУ (нетто), %	52,5	56,5	53,5	55,5

Если сравнивать ГТУ фирмы Siemens (V94.2A) и ЛМЗ (ГТЭ-180), то можно увидеть, что незначительно уступая в мощности ГТУ и температуре газов перед ГТ, КПД ГТЭ-180 на 0,3 % выше. Очевидно, здесь сыграла свою роль степень повышения давления в компрессоре, которая выше у ГТЭ-180. Однако мощность ПГУ на базе ГТУ V94.2A выше на 78 МВт. Одна из причин заключается в более полном использовании теплоты отработавших газов за ГТ в УПК.

Как следует из краткого предварительного обзора, наиболее эффективным способом повышения экономичности ГТУ и, как следствие, ПГУ является увеличение температуры рабочего тела перед газовой турбиной. Наряду с применением разного рода конструктивных мер, на технико-экономические показатели ГТУ оказывают влияние параметры атмосферного воздуха.

В связи с вышесказанным, интересным и актуальным вопросом в дальнейшем представляется проведение численного анализа влияния параметров рабочего тела газотурбинного двигателя на энергетическую эффективность ПГУ в условиях изменения параметров атмосферного воздуха. Конечно, такой анализ требует предварительной подготовки, заключающейся в обосновании и выборе состава ПГУ, её тепловой схемы и технических характеристик, разработке расчётной математической модели. Немаловажным аспектом в современных условиях является и оценка возможности создания энергетических установок с опорой на отечественное газо- и паротурбинное оборудование.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ольховский Г.Г. Газотурбинные и парогазовые установки сегодня / Г.Г. Ольховский // Электрические станции, 2015, № 1. – С. 73 – 79.
2. Роль НПО ЦКТИ в стратегии развития энергомашиностроения России / Ю.К. Петреня, П.А. Кругликов, Л.И. Моисеева // Теплоэнергетика 2003, № 2. – С. 4 – 8.
3. Ольховский Г.Г. Парогазовые установки: вчера, сегодня, завтра (обзор) / Г.Г. Ольховский // Теплоэнергетика, 2016, № 7. – С. 38 – 45.

УДК 621.311

Ковалёв Андрей Викторович, студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета

Kovalev Andrey Viktorovich, student of Komsomolsk-na-Amure State University

Шаломов Вячеслав Иванович, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Shalomov Vyacheslav Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate of Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

#### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ НА ДАВЛЕНИЕ В КОНДЕНСАТОРЕ НА ПРИМЕРЕ ТУРБОУСТАНОВКИ Т-63-13/0.25 СОВЕТСКО-ГАВАНСКОЙ ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ**

#### **ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE COOLING WATER TEMPERATURE ON THE PRESSURE IN THE CONDENSER ON THE EXAMPLE OF THE TURBINE UNIT T-63-13/0.25 OF THE SOVIET-GAVANSKOY THERMAL POWER PLANT**

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты анализа влияния температуры охлаждающей воды на давление в конденсаторе на примере турбоустановки Т-63-13/0,25.

Abstract. This paper presents the results of a analysis of the effect of the cooling water temperature on the pressure in the condenser using the example of the T-63-13/0.25 turbine unit.

Ключевые слова: паровая турбина, температура охлаждающей воды, давление в конденсаторе, кратность охлаждения, термический КПД.

Key words: steam turbine, cooling water temperature, condenser pressure, cooling multiplicity, thermal efficiency.

В 2020 году в Хабаровском крае введена в эксплуатацию новая электрическая станция – Советско-Гаванская ТЭЦ с установленной электрической мощностью 126 МВт.

Советско-Гаванская ТЭЦ - электростанция с поперечными связями. ТЭЦ включает в себя 3 котельных агрегата типа Е-210-13,8-560 и 2 теплофикационные турбины Т-63-13/0,25. В качестве топлива станция использует каменный уголь Ургальского месторождения марки «Г», расположенного в Хабаровском крае. Паровой котёл (ПК) типа Е-210-13,8-560 КТС (модель ТПЕ-131), изготовленный ОАО «ЭМАльянс», имеет следующие технические данные: паропроизводительность 210 т/ч, рабочие параметры пара - давление 13,8 МПа, температура 560 °С, температура питательной воды 232 °С, КПД брутто при сжигании гарантийных углей 91,5 %

Паровая турбина Т-63-13/0,25 теплофикационная с регулируемым и нерегулируемым отопительными отборами пара служит для привода турбогенератора ТВФ-63-2У3. Турбина изготовлена на Калужском турбинном заводе. Ресурс турбины 220000 часов. Основные характеристики турбины: номинальная электрическая мощность – 63 МВт, начальные параметры пара: давление – 12,75 МПа, температура – 555 °С, расход свежего пара в турбину: в теплофикационном режиме – 294 т/ч, в конденсационном режиме – 226 т/ч, тепловая мощность отборов – 116 МВт, давление пара за турбиной: в теплофикационном режиме – 0,0035 МПа, в конденсационном режиме – 0,0067 МПа. Турбина – одноцилиндровая. Проточная часть состоит из 18 ступеней. Принципиальная тепловая схема (ПТС) турбины изображена на рисунке 1.

На станции для охлаждения конденсаторов турбоустановки (ТУ) предусмотрена система технического водоснабжения с трёхсекционной вентиляторной градирней (на ПТС обозначена - ВГ).

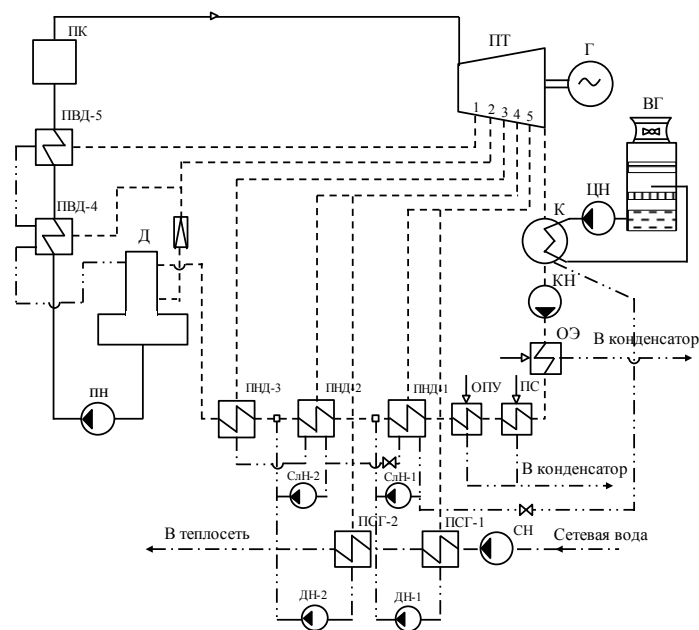


Рисунок 1 – Принципиальная тепловая схема турбины

В ТУ Т-63-13/0,25 применён поверхностный конденсатор (на ПТС – К) типа КП-3000-3 с поверхностью охлаждения  $F_K = 3000 \text{ м}^2$ . Максимальный расход пара в конденсатор  $D_K = 161320 \text{ кг/ч}$ , расход охлаждающей воды  $W = 7000 \text{ м}^3/\text{ч}$ , температура охлаждающей воды перед конденсатором  $t_{1В} = 20 \text{ °С}$ .

Решающую роль на технические характеристики конденсатора оказывает температура охлаждающей воды на входе в конденсатор.

По приведённым выше техническим данным по формуле А.В. Щегляева [1] оценен температурный напор в конденсаторе

$$\delta t = \frac{6,5}{30 + t_{1В}} \cdot \left( \frac{D_K}{F_K} + 7,5 \right),$$

который составляет примерно  $8 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

При одной и той же начальной температуре охлаждающей воды вакуум в конденсаторе существенно зависит от кратности охлаждения  $m$

$$m = \frac{G_B}{D_K},$$

где  $G_B$  - массовый расход охлаждающей воды, кг/ч.

По расчёту кратность охлаждения  $m = 43,4 \text{ кг/кг}$ . Пользуясь формулой, выведенной в учебнике Маргуловой [2],

$$t_K = t_{1В} + \delta t + \frac{523}{m},$$

вычисляем температуру конденсации  $t_K$ ,  $^\circ\text{C}$ . Она составляет  $40 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Давление в конденсаторе при данной температуре  $p_K = 7,4 \text{ кПа}$ . По проекту при работе ТУ в К-режиме  $p_K = 6,67 \text{ кПа}$ . Учитывая приближённость применённой формулы, результат можно считать приемлемым.

Проследим, как кратность охлаждения влияет на давление в конденсаторе при различных значениях входной температуры охлаждающей воды. Температурный напор  $\Delta t$  принимаем постоянным и равным  $8 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Выбираем диапазон изменения температур охлаждающей воды на входе конденсатора от  $4$  до  $24 \text{ } ^\circ\text{C}$  (через  $4 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), кратности охлаждения от  $40$  до  $120$  (5 значений - через  $20$ ). График зависимости  $p_K = f(t_{1В}, m)$  изображён на рисунке 2.

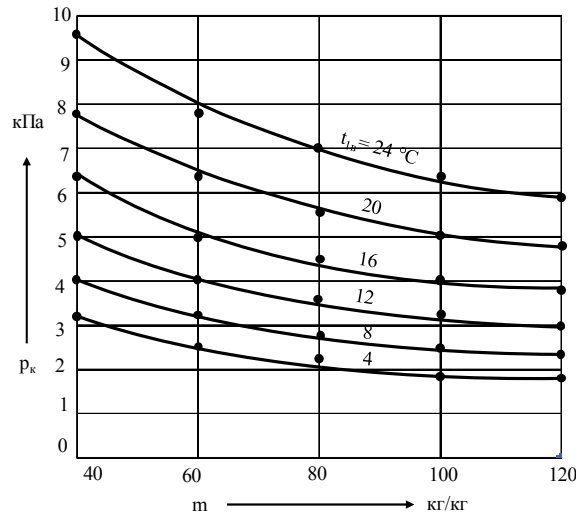


Рисунок 2 – График зависимости давления в конденсаторе от кратности охлаждения и входной температуры охлаждающей воды

Что показывает график? При постоянном значении кратности охлаждения, скажем  $m = 50$ , при проектной температуре охлаждающей воды  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ , давление в конденсаторе будет  $p_K = 7 \text{ кПа}$ . И чтобы его уменьшить, надо увеличивать кратность охлаждения конденсатора. Так, при  $m = 70$ ,  $p_K = 6 \text{ кПа}$ . Однако расход охлаждающей воды в этом случае будет составлять  $11292 \text{ м}^3/\text{ч}$ , тогда как проектный расход (см. выше)  $7000 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Увеличение расхода воды через трубную систему конденсатора приведёт к резкому повышению её гидравлического сопротивления и соответствующему росту напора циркуляционного насоса, то есть потребляемой насосом мощности. Значит, наиболее приемлемым решением в летний период эксплуатации турбины будет снижение температуры охла-

ждающей воды. К примеру, при той же  $m = 50$ , температуре охлаждающей воды  $t_{1в} = 12$  °С будет соответствовать  $p_k = 4,5-4,6$  кПа. В летний период температура прибрежной морской воды в Татарском проливе  $+ 9$  °С. Однако в этом случае система технического водоснабжения должна быть прямоточной.

Температура охлажденной циркуляционной воды на выходе из ВГ зависит от температуры окружающего воздуха. Так, согласно отчетной ведомости в июне 2022 года при максимальной температуре атмосферного воздуха  $t_{нв} = +27$  °С  $t_{1в} = 28$  °С. При температурном напоре  $\delta t = 4$  °С, нагреве охлаждающей воды в конденсаторе  $\Delta t_b = 10$  °С температура конденсации  $t_k = 42$  °С и давление в конденсаторе  $p_k = 8,2$  кПа, то есть на 1,5 кПа выше проектного значения при работе турбины в К-режиме.

Экономичность теоретического цикла ПТУ характеризуется термическим КПД  $\eta_t$ . Термический КПД цикла определяется отношением располагаемого теплоперепада ко всей затраченной удельной теплоте в цикле

$$\eta_t = \frac{H_0}{q_1},$$

где  $H_0$  – располагаемый теплоперепад в турбине, кДж/кг;  $q_1$  – затраченная удельная теплота в цикле, кДж/кг.

$$H_0 = i_0 - i_{кт},$$

где  $i_0$  – энтальпия пара перед турбиной, кДж/кг;  $i_{кт}$  – энтальпия в конце теоретического расширения пара в турбине, кДж/кг.

$$q_1 = i_0 - i'_k,$$

где  $i'_k$  – энтальпия конденсата, кДж/кг.

Таким образом, термический КПД определяется по выражению

$$\eta_t = \frac{i_0 - i_{кт}}{i_0 - i'_k}$$

Энтальпия свежего пара, энтальпии пара после турбины и конденсата выбирались из справочника «Термодинамические свойства воды и водяного пара» по начальным параметрам пара и по давлению в конденсаторе соответственно.

Расчёт термического КПД цикла ПТУ в зависимости от давления в конденсаторе выполнен по параметрам ТУ для конденсационного режима работы. Задаваемое изменение давления в конденсаторе выбрано в диапазоне от 2 до 8 кПа. По полученным в результате расчёта данным построен график изменения термического КПД ТУ в зависимости от давления в конденсаторе  $\eta_t = f(p_k)$ .

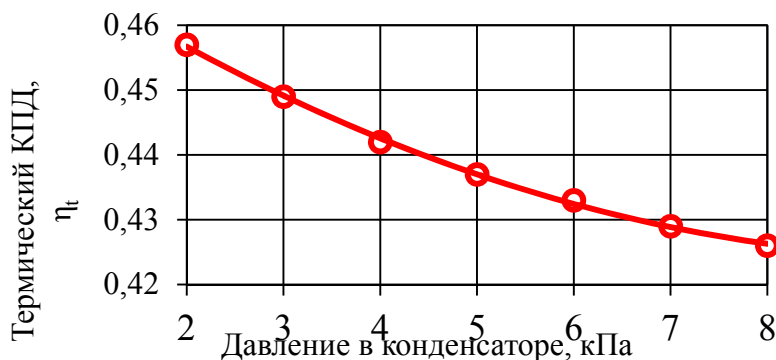


Рисунок 3 – График изменения термического КПД цикла ПТУ  $\eta_t$  в зависимости от давления в конденсаторе  $p_k$

Из графика на рисунке 3 видно, что давлению в конденсаторе 3,5 кПа соответствует термический КПД, равный 44,6 %; при этом конечном давлении пара по проектным данным турбина работает в теплофикационном режиме; для конденсационного режима номинальным значением давления в конденсаторе считается  $p_k = 6,7$  кПа; этому значению соответствует  $\eta_t = 43$  %. Снижение  $p_k$  на 1 кПа приводит к повышению  $\eta_t$  на 0,52 %. Однако надо учитывать, что при понижении давления в конденсаторе понижается степень сухости пара за турбиной, в частности в нашем расчёте от 79,2 % при 8



кПа до 75,3 % при 2 кПа – повышаются потери от влажности в последних ступенях турбины. Одновременно увеличивается удельный объем пара: с 14,3 м<sup>3</sup>/кг при 8 кПа до 50,5 м<sup>3</sup>/кг при 2 кПа, то есть в 3,5 раза – повышаются габаритные размеры конденсатора и лопаток последней ступени турбины.

Выводы.

1) Для увеличения экономичности ТУ при повышенных температурах охлаждающей воды за ВГ в летний период эксплуатации ТУ необходимо увеличивать кратность охлаждения конденсатора.

2) Термический КПД цикла ТУ при снижении давления в конденсаторе на 1 кПа увеличивается на 0,52 %.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Щегляев А.В. Паровые турбины. Теория теплового процесса и конструкции турбин. Второе изд., перераб. и доп. Государственное энергетическое издательство. М. – Л., 1947, с. 315.

2. Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1984. – 304 с.

УДК 621.18

Корнеева Лилия Александровна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Korneeva Lilya Aleksandrovna, student of Komsomolsk-na-Amure State University

Смирнов Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Smirnov Aleksey Vladimirovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

#### **ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ЭНЕРГЕТИКЕ**

#### **FEATURES OF THE COAL FUEL GASIFICATION PROCESS IN THE ENERGY SECTOR**

Аннотация. Сегодня развитие энергетического комплекса страны идет в различных направлениях. Одним из таких направлений является внедрение новых технологий по использованию угольного топлива. Интерес в этой области представляет газификация угольного топлива, особенно в свете рисков возникновения в отдельных регионах страны перебоев с подачей природного газа на тепловые электростанции. В данной работе рассматриваются особенности процесса газификации угольного топлива.

Abstract. Today, the development of the country's energy complex is going in various directions. One of these areas is the introduction of new technologies for the use of coal fuel. The gasification of coal fuel is of interest in this area, especially in light of the risks of interruptions in the supply of natural gas to thermal power plants in certain regions of the country. In this paper, the features of the coal fuel gasification process are considered.

Ключевые слова: тепловые электрические станции, угольное топливо, газификация.

Key words: thermal power plants, coal fuel, gasification.

Энергетическая отрасль является важнейшей стратегической составляющей хозяйства нашей страны. Соответственно идет постоянное развитие энергетики и смежных с ней областей. Важное место отводится развитию угольной промышленности и технологиям использования угольного топлива. Одной из таких перспективных технологий является получение синтез-газа, то есть газификация угля. Согласно Энергетиче-

ской стратегии России, уголь в рассматриваемой перспективе остается одним из самых дешевых и доступных источников энергии [1].

Идея получения горючего газа из угольного топлива не нова. Еще в середине 20-го века подробно рассматривались различные способы и технологии газификации угля. Но к сегодняшнему дню газификация угля и соответственно использование синтез-газа в энергетических установках не получили широкого распространения. Тем не менее, сохраняется актуальность развития данного направления, особенно в свете возникновения рисков перебоя подачи природного газа на тепловые электростанции в отдельных регионах страны, например, на Дальнем Востоке.

Рассмотрим основные особенности технологии газификации топлива в стационарной энергетике.

Процесс газификации угля – это процесс получения синтез-газа (генераторного газа) из угля и воды, воздуха и / или кислорода. Конечный продукт представляет собой в основном смесь из монооксида углерода (CO), водорода (H<sub>2</sub>), двуоксида углерода (CO<sub>2</sub>), метана (CH<sub>4</sub>) и водяного пара (H<sub>2</sub>O). В процессе газификации уголь необходимо нагревать и осуществлять одновременно дутье кислородом и водяным паром. Иногда требуется и создание избыточного давления в газификаторе. Нагрев угля возможно осуществлять двумя способами: за счет внешних источников теплоты (аллотермический процесс); за счет внутренней теплоты (автотермический процесс), образующейся в результате экзотермических химических реакций, происходящих внутри самого газогенератора. При этом необходимо соблюдать условие недостаточности подаваемого окислителя во избежание полного окисления (сгорания) топлива.

Наиболее интересным для применения в энергетике является использование газификации в комбинированных парогазовых установках с внутрицикловой газификацией. Весь технологический процесс, происходящий в парогазовом цикле с газификацией угля, можно разделить на четыре основных этапа:

- 1) получение генераторного газа из угля одним из способов газификации;
- 2) очистка генераторного газа;
- 3) сжигание очищенного газа в ГТУ, работающей на электрогенератор;
- 4) утилизация теплоты отработавших в газовой турбине газов утилизационном котле с целью получения пара для работы газогенератора и паровой турбины, приводящей электрогенератор.

Принципиальная схема такой парогазовой установки представлена на рисунке 1.

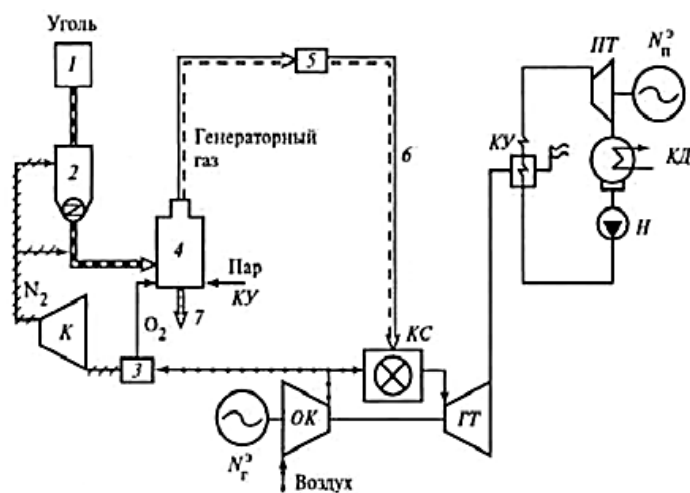


Рисунок 1 – Схема парогазовой установки с внутрицикловой газификацией угля

Конечно, при реализации таких технологий необходимо учитывать ряд особенностей, влияющих на технико-экономические и эксплуатационные показатели всей комбинированной установки. В источнике [2], например, отмечаются следующие особенности. Получение и сжигание генераторных газов с теплотой сгорания ниже, чем у природного газа, существенно повлияет на эксплуатационные показатели ГТУ, так как потребуется увеличить расхода топлива.

В свою очередь, добавление этой массы, не подлежащей сжатию в компрессоре, увеличит внутреннюю мощность газовой турбины и электрическую нагрузку установки. В этом случае необходимо учитывать следующие обстоятельства:

- увеличение массового расхода газов в газовой турбине ГТУ приведет к росту степени повышения давления воздуха в компрессоре, что может явиться причиной помпажа;

- увеличение внутренней мощности газовой турбины может привести к превышению предельных крутящих моментов и в ряде случаев к необходимости использовать более мощный электрогенератор;

- для газа с меньшей теплотой сгорания топлива возрастает потребность в воздухе для его сжигания. В ГТУ с высокой начальной температурой газов может оказаться невозможным сжигать генераторный газ с очень низкой теплотой сгорания.

Примерно 7 % вырабатываемой на ПГУ электроэнергии расходуется дополнительно на системы газификации, очистки генераторного газа и др. Все это приводит к снижению экономичности по сравнению с ПГУ на природном газе [2].

Таким образом, низкая теплота сгорания генераторного газа заставляет разработчиков газовых турбин увеличивать его расход и совершенствовать систему распределения топлива.

В качестве положительных моментов можно отметить следующее: продукты сгорания генераторного газа в ГТУ практически не содержат золы, соединений серы и оксидов азота, что обеспечивается оптимизацией процессов сжигания в камере сгорания ГТУ; возможность полезного использования низкокачественных бурых углей, стоимость транспортировки которых до конечного потребителя выше, чем их рыночная стоимость; производство серы, азота, чистого аргона и сжиженных углеводородов, которые являются самостоятельными товарными продуктами; низкий уровень выбросов (близкий к нулю); экологически чистая технология; безопасные для окружающей среды побочные продукты; получение альтернативного топлива [3].

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Электронный ресурс: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>.

2. Преимущества и недостатки ПГУ с внутрицикловой газификацией угля. Электронный ресурс: [https://studopedia.net/14\\_198\\_preimushchestva-i-nedostatki-pgu-s-vnutritsiklovooy-gazifikatsiey-uglya.html](https://studopedia.net/14_198_preimushchestva-i-nedostatki-pgu-s-vnutritsiklovooy-gazifikatsiey-uglya.html).

3. Тепловая схема с газификацией угля: принцип работы, тепловая схема, основные особенности, достоинства и недостатки. Показатели тепловой экономичности пгу с газификацией по физическому методу. Электронный ресурс: <https://studfile.net/preview/8056144/page:8/>.

Кузнецова Юлия Евгеньевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Kuznetsova Yulia Evgenievna, student of Komsomolsk-na-Amure State University

Гуныкова Ольга Владимировна, старший преподаватель кафедры «Кораблестроение и компьютерный инжиниринг»; Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Gunkova Olga Vladimirovna, Senior Lecturer of the Department of Shipbuilding and Computer Engineering; Komsomolsk-on-Amur State University

## **ОБЗОР МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ОТ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ПОРТАХ РОССИИ**

### **OVERVIEW OF METHODS OF PROTECTION AGAINST COAL DUST IN RUSSIAN PORTS**

Аннотация. В данной работе проведен обзор методов борьбы с угольной пылью в портах России при погрузочно-разгрузочных работах, транспортировке и при хранении на складах. Дано описание всех методов. Приведены примеры методов защиты от угольной пыли на ОАО «Терминал Астафьева» в порту Находка и в Восточно-Уральском терминале в порту Восточном в Приморском крае.

Abstract. In this paper, an overview of methods of combating coal dust in Russian ports during loading and unloading and storage in warehouses is carried out. A description of all methods is given. Examples of methods of protection against coal dust at two terminals in Primorsky Krai are given.

Ключевые слова: уголь, методы защиты, угольная пыль, пылеподавление, склад.

Key words coal, protection methods, coal dust, dust suppression, warehouse.

Россия является одним из лидеров по добыче и экспорту угля. Более половины добытого угля отправляется на экспорт через морские порты.

Россия имеет несколько крупных месторождений угля, более 67 % разведанных запасов приходится на каменный уголь.

Крупнейшими потребителями угля являются азиатские страны: Китай, Южная Корея, Япония и Индия.

При добыче, перевалке, хранении и транспортировке данного вида груза образуется угольная пыль, которая загрязняет воздух, почву, воду и может представлять опасность для людей. Так же пыль оседает на механизмах, что ведет к быстрому изнашиванию, коррозии металла и выходу из строя техники. Вследствие этого в морских портах стремятся уменьшить процесс пыления угля.

Рассмотрим методы защиты от угольной пыли в морских портах России.

Подготовка угля начинается еще на местах добычи и загрузки в железнодорожный транспорт. Поверхность угля в железнодорожных вагонах обрабатывают специальными реагентами, которые предотвращают пыление груза при транспортировке.

В последнее время на угольных терминалах стали устанавливать ветропылезащитные экраны, которые нужны для перераспределения потоков ветра и не позволяют распространять угольную пыль за пределами терминала. Например, в ОАО «Терминал Астафьева» в порту Находка по периметру установлены ветропылезащитные ограждения высотой 21 м, состоящие из двух слоев: 1 слой – аэродинамические панели, 2-ой слой – пылезащитная сетка в 2 слоя.

На рисунке 1 представлены пылезащитные экраны в морских портах России, таких как Находка, Восточный и Мурманск.

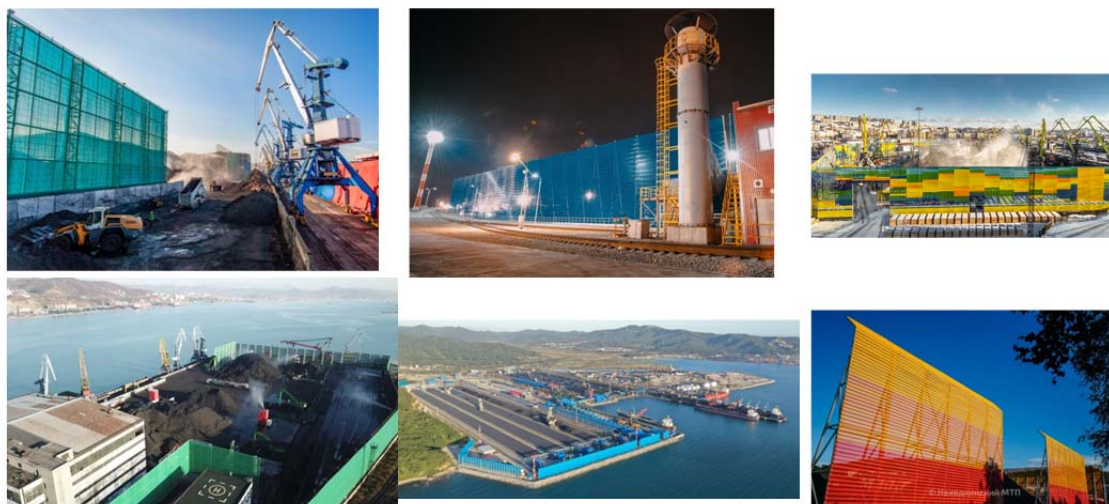


Рисунок 1 – Пылезащитные экраны в морских портах России

Следующим методом борьбы с угольной пылью является система пылеподавления для создания водяной завесы в районе перегрузочных работ. В портах эксплуатируют мобильные и стационарные установки пылеподавления, дальность распыла струи у которых составляет от 90 до 150 метров, и работающие круглосуточно. В зимнее время используют снегогенераторы, которые также могут быть как стационарными, так и мобильными. На складах с углем устанавливают систему орошения, работающую автоматически и круглосуточно. Системы пылеподавления и орошения в портах Дальнего Востока представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Системы пылеподавления и орошения в портах Дальнего Востока

Для удаления пыли и грязи в портах используют мобильные вакуумные уборочные машины различных видов, которые убирают дороги и технологические проезды, собирая пыль, влажный материал, воду, а также чистят колодцы и отстойники. На рисунке 3 представлены вакуумные уборочные машины.





Рисунок 3 – Вакуумные уборочные машины

Также для уборки дорог используют поливальные машины, представленные на рисунке 4.



Рисунок 4 – Поливальные машины

Восточно-Уральский терминал в порту Восточный (Приморский край) единственный в России имеет крытые склады, в которых хранится 85 % угля всего терминала. Три круглых склада имеют емкость 20 тысяч тонн каждый и один прямоугольный на 100 тысяч тонн. Уголь, который находится на открытом складе, накрывается полотном. На рисунке 5 показаны крытые склады и открытый склад.



Рисунок 5 – Склады Восточно-Уральского терминала

Для уменьшения пыления угля на данном терминале эксплуатируют ленточный транспортёр, судопогрузочные машины и грейферы с встроенной системой пылеподавления. Данный грейфер распыляет воду во время перегрузочных работ. Из раскрывающегося грейфера манипулятор распыляет воду, при этом происходит подавление угольной пыли.



Рисунок 6 – Грейфер с встроенной системой пылеподавления  
ОАО «Терминал Астафьева», расположенный в порту Находка, использует закрытую линию для перевалки угля, а также строит навес над зоной выгрузки.



Рисунок 7 – ОАО «Терминал Астафьева»

Применение методов, описанных в данной работе, позволяет сократить количество угольной пыли при транспортировке и проведении погрузочно-разгрузочных работ, что позволит уменьшить воздействие на окружающую среду и улучшить экологическую обстановку.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Крылов П.В., Журбина И.Н. Транспортные характеристики угольного месторождения Эльгинское // Молодежь и наука: Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. 2021. Ч1. С.258.
2. Чекмарева О.А., Каменских И.В. Современные технологии погрузки сыпучих грузов // Молодежь и наука: Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. 2022. Ч2. С.270.

УДК 658.78; 658.56

Песков Евгений Константинович, аспирант кафедры ««Организация перевозок, безопасность движения и сервис автомобилей», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Peskov Evgeny Konstantinovich, postgraduate student of the department "Organization of transportation, traffic safety and automotive service, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

#### **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАЛЬКУЛЯТОРА СТОИМОСТИ РАЗВОЗКИ ГРУЗОВ**

#### **ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF THE FREIGHT DELIVERY CALCULATOR**

Аннотация. «Новое – это хорошо забытое старое», – тому пример, большое количество маркетплейсов и ритейлеров. Каждый из нас помнит, как мы заказывали иностранные товары из журналов, оплачивали и получали их на почте. С развитием мировой сети интернет, семимильными шагами развивалась и логистика, появилась возможность за-



казать любой товар из любой точки мира. За многие годы мы собрали большое количество информации в сфере логистики и создали свой собственный метод расчёта сборных перевозок груза. Целью данной статьи является проведение анализа эффективности калькулятора стоимости развозки грузов. На основе экономико-математических методов и моделирования произвели разработку калькулятора. Результаты работы калькулятора позволили увеличить экономическую эффективность, уменьшили стоимость доставки перевозимого груза. Возможно, в статье не удастся рассказать подробно о структуре калькулятора и его составляющих переменных, мы остановимся на его эффективной работе и результативности. О выводах: мы хотели бы чтобы исследователи и читатели предоставили нам свои пожелания и замечания на электронный адрес: [bw64@bk.ru](mailto:bw64@bk.ru).

Abstract. "New is well forgotten old," a large number of marketplaces and retailers exemplify this. Each of us remembers how we ordered foreign goods from magazines, paid and received them at the post office. With the development of the world wide web, by leaps and bounds evolved logistics, it became possible to order any product from anywhere in the world. For many years we have collected a lot of information in the field of logistics and created our own method of calculation of combined shipping. The purpose of this article is to analyze the effectiveness of the shipping cost calculator. On the basis of economic-mathematical methods and modeling we made the development of the calculator. The results of the calculator has increased economic efficiency, reducing the cost of delivery of transported cargo. Perhaps this article can not talk in detail about the structure of the calculator and its constituent variables, we will focus on its effective work and performance. About the conclusions: we would like researchers and readers to provide us with their wishes and comments to the e-mail address: [bw64@bk.ru](mailto:bw64@bk.ru).

Ключевые слова: анализ стоимости, калькулятор, моделирование, транспортная компания, сборный груз.

Key words: cost analysis, calculator, modeling, transport company, groupage cargo.

### **Введение**

Одно из самых полезных изобретений человечества бесспорно можно назвать калькулятор. Калькулятор служит для быстрого расчета цифр. В настоящее время калькулятор имеет множество выполняемых функций и формул. Это значительно упрощает нашу работу и позволяет в кратчайшие сроки получить результат.

Вот нашей основной задачей стало создание калькулятора, который бы позволил рассчитать маршруты доставки грузов. Основной географией нашего исследования и прокладки маршрутов, является наша родная земля – Саратовская область и её жители.

Целью конечного расчёта калькулятора является снижение стоимости перевозимого груза в первую очередь для грузоотправителя, а точнее для плательщика и увеличение суммы фрахта для перевозчика. Мы хотели бы чтобы всем переменным нашей формулы, было бы экономически целесообразно пользоваться услугами экспедитора в качестве транспортной компании «Поволжье-Экспресс».

### **Основная часть.**

Стоимость грузовых перевозок по городам Саратовской области достаточно высока, стоимость пробега за 1 километр доходит до 20 рублей. Для периферии этот ценник очень высок, и наша задача уменьшить стоимость перевозок.

Расчетные переменные, которые лежат в основе калькулятора, рассчитаны и проложены на основании доставки на транспортном средстве ГАЗель. Весогабаритные характеристики нашего расчета лежат в основе разработанных тарифов. Расчеты стоимости грузоперевозок рассчитаны в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет стоимости грузоперевозки

Точка маршрута	Масса груза, кг	Объем груза, м <sup>3</sup>	Цена город, руб	Цена межгород, руб	Общая цена, руб
1	2	3	4	5	6
Энгельс	50	0,15	220,00	486,00	706,00
Маркс	50	0,15	220,00	510,00	730,00
Горный (Краснопартизанский)	50	0,15	220,00	778,00	998,00
Пугачев	50	0,15	220,00	778,00	998,00
Перелюб	50	0,15	220,00	958,00	1 178,00
Духовницкое					8 640,00
Итого					13 250,00

Для упрощения выполнения функций калькулятора мы используем весогабаритные параметры из расчета 50 кг и 0,15 м<sup>3</sup>. Стоимость перевозок указаны в столбцах 4 и 5. В 6 столбце указана стоимость промежуточной точки доставки. Это пример расчёта конечной стоимости маршрута, где учитываются стороны плательщика и перевозчика с экономическим эффектом в положительную сторону и для одного и для другого участника перевозки.

Форма основного расчета представлена на рисунке 1, которая включает в себя все параметры. Программа калькулятор стоимости перевозок, упрощает и визуализирует стоимостные параметры и также моделирует маршрут движения транспортного средства с промежуточными точками.

Визуально отобразить полученные данные и проанализировать их результативность, поможет диаграмма «Торнадо». Диаграмма Торнадо используется для наглядного сравнения двух наборов данных, в нашем случае, это расчет стоимости конечной точки «до» и «после» применения работы калькулятора стоимости перевозок.

Рисунок 1 – Форма калькулятора

Рисунок 2 – Пример формы расчета стоимости перевозок

В таблице 2 показаны суммы за доставку груза в определенную конечную точку. В столбце «до» указана сумма за перевозку груза в прямом направлении. В столбце «после» указана сумма после добавление попутных точек выгрузки. Для понимания разницы в ценах вернемся к таблице 1, где сумма доставки в Духовницкое составила 8640 рублей, а до оптимизации 12150 рублей. Вывод: плательщик за перевозку сэкономил 28,9 %. Это достаточно высокая экономия. Интерес водителя тоже соблюден. Он составил 10,9% от первоначальной стоимости маршрута.

Таблица 2 – Стоимость доставки груза

Города	До	После
Александров Гай	12150	13030
Базарный Карабулак	6300	6740
Духовницкое	12150	13250
Дергачи	9900	10560
Ртищево	12600	13260
Турки	13500	14380
Хвалынский	10350	11450

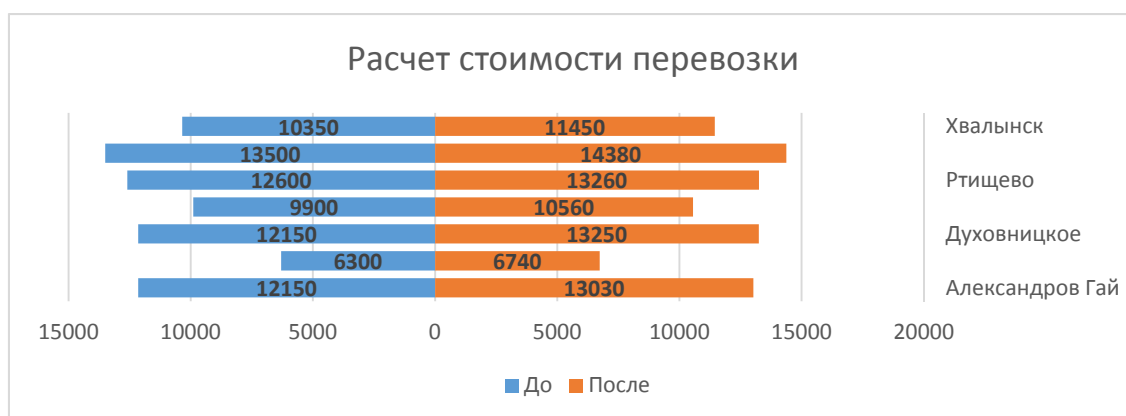


Рисунок 3 – Диаграмма «Торнадо»

Такой тип диаграмм удобно использовать для наглядного сравнения двух наборов данных. Диаграмма «торнадо» — тип горизонтальной столбчатой диаграммы, на которой категории данных располагаются по вертикальной оси. Диаграмма «торнадо» используется для проведения детерминированного анализа чувствительности — сравнения относительной важности данных.

### Заключение

Из диаграммы следует, что расчет суммы перевозки «до» и «после» на калькуляторе стоимости развозки. В среднем имеет экономический эффект на 10%, при добавлении промежуточных точек доставки груза из расчета 50 кг и  $0,15\text{м}^3$ . При весогабаритных характеристиках большего объема экономическая эффективность будет увеличиваться. Задуманные разработчиками экономический эффект достигнут.

Автоматизация рабочего процесса для компании «Поволжье-Экспресс», позволяет в режиме настоящего времени рассчитать стоимость перевозки груза до конечной точки, небольшая отсылка, замеченная нами в процессе диагностики калькулятора, стала напоминать нам игру на бирже, где конечная стоимость той или иной ценной бумаги будет зависеть от количество желающих его приобрести. То есть маршрут доставки он как ценная бумага, чем больше он подходит грузоотправителю, тем дешевле будет перевозка для него и дороже для перевозчика.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гусев С.А. Интеллектуальные модели разработки маршрутов перевозки мелкопартионных грузов [Текст]/С.А. Гусев, В.С., Маросин// Известия ТулГУ.- 2015.- №1 Часть 1.- с.69-77.
2. Лукинский В.С. Модели и методы теории логистики [Текст] / В.С. Лукинский. - Санкт- Петербург: Питер Пресс, 2007. - 447 с.
3. Просветов Г.И. Математические методы в логистике: задачи и решения [Текст] / Г.И. Просветов. - Москва: Альфа-Пресс, 2008. - 302 с.

Пиголицына Элина Александровна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Pigolitsyna Elina Alexandrovna, student of Komsomolsk-na-Amure State University

Хвостиков Александр Станиславович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Khvostikov Flexandr Stanislavovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the department "Thermal power plants", Komsomolsk-na-Amure State University

## АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ УСТАНОВОК ГЕНЕРАЦИИ ХОЛОДА

### ANALYSIS OF COLD GENERATION PLANT DESIGNS

Аннотация. В работе приведены различные конструкции холодильных машин. Анализ конструкций приведен с позиции энергетической эффективности технологического процесса извлечения гелия на Амурском газоперерабатывающем заводе. С энергетической точки зрения целесообразней применение теплоиспользующих холодильных машин.

Abstract. The paper presents various designs of refrigerating machines. The analysis of the structures is given from the standpoint of the energy efficiency of the helium extraction process at the Amur Gas Processing Plant. From an energy point of view, it is more expedient to use heat-using refrigerating machines.

Ключевые слова: выработка холода, абсорбционный холодильная машина, газопереработка, энергоэффективность.

Key words: cold generation, absorption refrigerating machine, gas processing, energy efficiency.

Амурский газоперерабатывающий завод – крупнейший проект в газоперерабатывающей отрасли, являющийся вторым по объёму переработки природного газа и крупнейшим в мире по производству гелия. Амурский газоперерабатывающий завод после завершения строительства будет перерабатывать 42 миллиарда кубических метров в год природного газа и добывать до 60 миллионов кубических метров гелия в год. Гелий – ценный продукт для высокотехнологичного производства. Для того, чтобы производимый в России продукт был конкурентоспособен, необходимо обеспечить энергоэффективность процесса переработки.

Процесс переработки газа выглядит следующим образом.

1. Поступивший природный газ под большим давлением поступает в специальные абсорберы для удаления нежелательных примесей.

2. Далее постепенным снижением температуры различные газовые фракции переводят в жидкое состояние и разделяют. Первоначально выделяют углеводородные газы с высокой температурой кипения до  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (этан, пропан, пентан-гексан). Далее выделяют метан при температуре кипения  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$  и азот при температуре кипения  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Последним в этом процессе выделяют гелий, температура кипения которого составляет  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что очень близко к температуре абсолютного нуля.

Важным в этом технологическом процессе является обеспечение энергетической эффективности при выработке холода. На Амурском газоперерабатывающем заводе применяют спиралевидные теплообменные аппараты, отличающиеся большой поверхностью теплообмена за счет большого количества мелких спиралевидных трубок и возможностью выдерживать большую разность температур до  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , необходимую при производстве гелия.

Выработка холода осуществляется с помощью парокомпрессионных, газовых, термоэлектрических и теплоиспользующих холодильных машин. Парокомпрессионные, газовые и термоэлектрические холодильные машины используют для выработки холода электрическую энергию. В теплоиспользующих установках выработка холода, как следует в том числе из названия, происходит за счет тепла. Выработка холода за счет тепла является более экономически выгодной вследствие того, что для выработки электричества используют тепло с большими энергетическими потерями.

Наибольшее применение в производстве холода нашли парокомпрессионные холодильные машины. Преимущество таких конструкций в простоте и распространенности основных агрегатов. Рабочее вещество при давлении  $p_0$  и температуре  $T_0$  поступает в компрессор **I**, где сжимается до давления конденсации  $p_k$ , в результате чего температура рабочего тела повышается до  $T_k$ . Далее рабочее тело направляется в конденсатор **II**, где за счет отвода теплоты в окружающую среду рабочее тело конденсируется и расширяется в детандере **III** до начальных параметров  $p_0$  и  $T_0$ , совершая при этом работу, идущую частично на привод компрессора. Далее рабочее вещество поступает в испаритель **IV**, где оно кипит за счет теплоты, подводимой от источника низкой температуры (рис. 1,а).

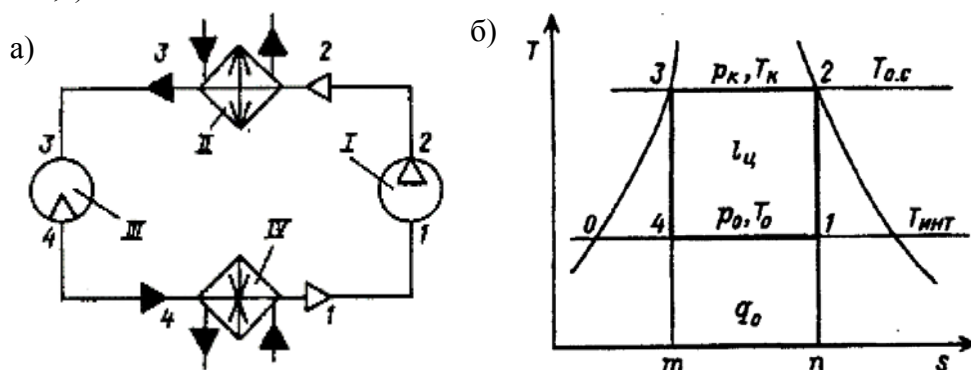


Рисунок 1 – Схема (а) и идеализированный цикл в T-S диаграмме (б) парокомпрессионной холодильной машины с детандером

На рисунке 1,б изображен идеализированный цикл в T-S диаграмме: 1-2 изэнтропийное сжатие в конденсаторе, 2-3 конденсация с отводом теплоты в конденсаторе, 3-4 изэнтропийное расширение в детандере, 4-1 испарение с подводом теплоты в испарителе. Реальный процесс отличается от теоретического вследствие учета потерь теплоты в испарителе и конденсаторе и потерь на трение в компрессоре и детандере.

Повысить эффективность парокомпрессионной холодильной машины можно с помощью многоступенчатого и каскадного сжатия с промежуточными охладителями.

Газовые холодильные машины работают по следующему принципу. Газ поступающий в компрессор **A** сжимается с увеличением давления от  $p_1$  до  $p_2$  с повышением температура до  $T_2$ . После этого поступает в промежуточный холодильник **B**, в котором происходит изобарное понижение температуры до  $T_3$ . Далее газ направляется либо в детандер **B**, где происходит охлаждение при расширении с отдачей полезной работы, или в вихревую трубу, где происходит охлаждение при расширения без отдачи полезной работы. В результате давление газ снижается до  $p_4$ . После этого газ поступает в теплообменный аппарат **Г**, где он нагревается до температуры  $T_1$  и снова направляется в компрессор. Передача тепла от холодильника к теплообменному аппарату может происходить по регенеративному или нерегенеративному циклу (рис. 2). Рабочее тело в газовых холодильных машинах находится только в газообразном состоянии в отличие от парокомпрессионных холодильных машин.

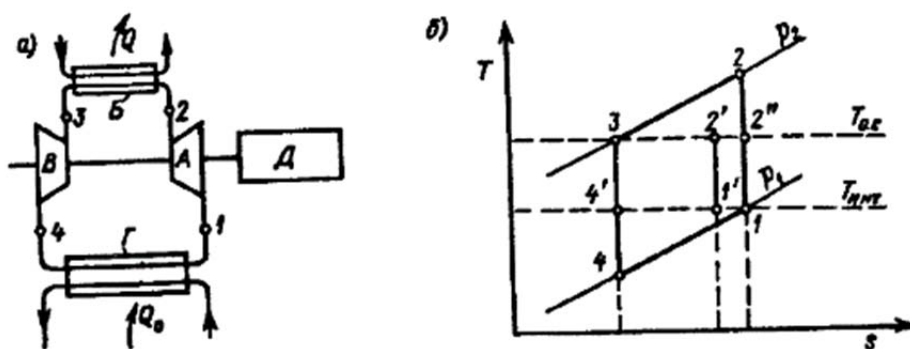


Рисунок 2 – Схема (а) и идеализированный цикл в T-S диаграмме (б) газовой холодильной машины

На рисунке 2,б изображен идеализированный цикл газовой холодильной машины в T-S диаграмме: 1-2 изэнтропийное сжатие в компрессоре, 2-3 изобарное охлаждение в промежуточном холодильнике, 3-4 изэнтропийное расширение в детандере, 4-1 изобарный нагрев до начальных температур. Экономичность газовых холодильных машин показывает коэффициент обратимости. В цикле 1'-2'-3-4' с постоянной температурой отвода тепла в окружающую среду коэффициент обратимости значительно меньше единицы и охлаждение экономически нецелесообразно. В цикле 1-2''-3-4 при отводе тепла, осуществляющемся в окружающую среду, процесс теплообмена 4-1 происходит при бесконечно малой разнице температур между теплоносителем и газом. Коэффициент обратимости такого цикла также меньше 1, но выше чем в цикле 1'-2'-3-4'. В цикле 1-2-3-4 с теплообменом в противотоке коэффициент обратимости равен 1 и наиболее выгоден.

Термоэлектрические холодильные машины работают на основе эффекта Пельтье. При пропускании тока через два разнородных проводника или полупроводника место спая поглощает тепло. Для работы термоэлектрической холодильной машины необходимо соблюдать направление тока и теплотока, который возник бы при нагреве проводника. У термоэлектрических холодильных машин низкий коэффициент полезного действия и требует охлаждения противоположной пластины.

Все описанные выше холодильные машины требуют подвода электрической энергии. В парокompрессионных и газовых установках электрическая энергия требуется для привода компрессора, а в термоэлектрических машинах электрический ток пропускается через термоэлемент. Ток для нужд Амурского газоперерабатывающего завода вырабатывается на Свободненской ТЭЦ двумя паровыми турбинами ПК-80-12,8/1,57. Коэффициент полезного действия выработки электричества паровыми турбинами колеблется от 20 до 40 %. Наиболее эффективно для выработки холода использовать тепло. Теплоиспользующие холодильные машины подразделяются на парожекторные, абсорбционные, и сорбционные.

Парожекторная холодильная машина – это совмещение пароэнергетической установки с двигателем эжектором и холодильной машины со струйным компрессором-эжектором. Рабочий пар из парогенератора Г или отбора турбины направляется в сопло эжектора, где пар расширяется с увеличением скорости. Высокая скорость пара способствует высасыванию холодного пара, идущего из испарителя И, после чего происходит смешивание паров в камере смешения эжектора. Далее смешанное рабочее тело направляется в диффузор эжектора, где происходит повышение давление от  $p_0$  до  $p_k$  за счет преобразования кинетической энергии в потенциальную. Затем рабочее тело подается в конденсатор ГК, где рабочее тело конденсируются за счет отдачи тепла в атмосферу. Сконденсированный поток разделяется на две части: одна через конденсатный насос КН возвращается в парогенератор, вторая – через дроссельный вентиль РВ1 в испаритель И. В испарителе за счет отсоса пара соплом эжектора поддерживается



глубокий вакуум, в результате чего происходит испарение воды. Вода, циркулирующая между испарителем и потребителем холода с помощью циркуляционного насоса ЦН, называется рабочей водой. Недостатком такой конструкции является ее сложность из-за необходимости поддержания глубокого вакуума.

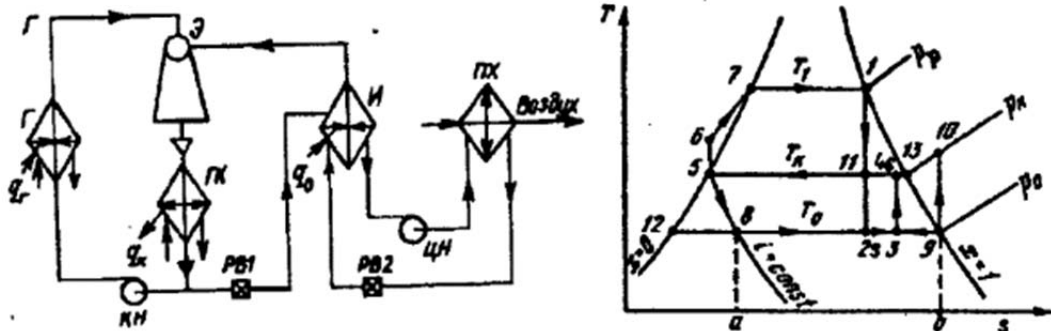


Рисунок 3 – Схема (а) и теоретический цикл в T-S диаграмме (б) парэжекторной холодильной машины

Работа в абсорбционных холодильных машинах осуществляется с помощью двух компонентов: хладагента и абсорбента. Для получения холода ниже  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  в абсорбционных холодильных машинах применяют двух- и трехступенчатые холодильные машины. Также применяют процессы со ступенчатой абсорбцией, десорбцией, кипением и др. Одноступенчатые холодильные машины более просты. Разберем их устройство примере (рис.4).

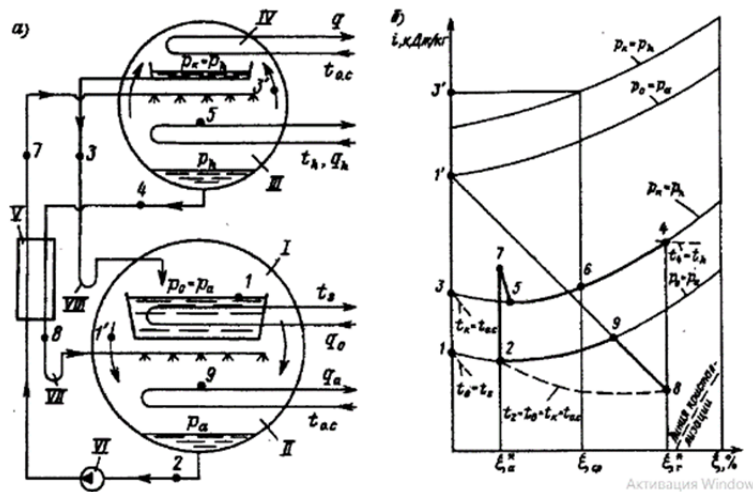


Рисунок 4 – Схема (а) и теоретический цикл в  $\zeta$ -i диаграмме (б) абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины с одноступенчатой генерацией пара

Рабочими телами бромисто-литиевой холодильной машины является вода и бромисто-литиевый раствор. Вода, выполняющая роль хладагента находится в виде жидкости и пара. Бромисто-литиевый раствор – абсорбент, находящийся только в жидком состоянии. В испарителе I при подводе теплоты от охлаждаемого источника кипит вода. Кипение воды можно осуществить за счет низкопотенциального источника – теплоты воды технического водоснабжения. На Свободненской ТЭЦ охлаждение технической воды выполняют с помощью воздушных градирен, затрачивая при этом значительную часть электроэнергии. Водяной пар из испарителя в абсорбере II абсорбируется крепким раствором бромистого лития. Раствор бромистого лития стекает из генератора III через растворный теплообменник V и гидравлический затвор VII. Концентрация крепкого раствора в абсорбере снижается. В процессе абсорбции выделяется теплота  $q_a$ , которая отводится в атмосферу. Слабый раствор из абсорбера подается насосом VI через растворный теплообменник V в генератор III, где он кипит при давлении  $p_h$ , вследствие подвода теплоты  $q_h$  от горячего источника. В качестве горячего источника



можно использовать пар из промышленного отбора турбины, подаваемый на Амурский газоперерабатывающий завод от Свободненской ТЭЦ. Водяной пар в конденсаторе IV конденсируется вследствие отвода теплоты  $q$  в окружающую среду. Далее конденсат возвращается в испаритель через гидравлический затвор VIII. Давление в испарителе равно давлению в абсорбере  $p_0 = p_a$ , а давление в генераторе равно давлению в конденсаторе  $p_k = p_h$ , поэтому эти устройства объединяют в одной конструкции (рис. 4).

В результате анализа возможностей применения различных видов холодильных машин можно сделать вывод о необходимости сочетания различных их видов. На первоначальном этапе охлаждение целесообразно выполнять с использованием абсорбционной бромисто-литиевой машины с многоступенчатым охлаждением. Окончательное охлаждение для выделения гелия требует применения газовой холодильной машины.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лебедев Ю.В. Амурский ГПЗ станет крупнейшим мировым производителем гелия // Газовая промышленность. 2019. № 12 (794). С. 78-82.

2. Холодильные машины: учебник для студентов вузов специальности «Техника и физика низких температур» / А.В. Бараненко, Н.Н. Бухарин, В.И. Пекарев, И.А. Сакун, Л.С. Тимофеевский; Под общ. ред. Л.С. Тимофеевского. СПб.: Политехника, 1997. 992 с.: ил.

УДК 621.165.53

Попов Алексей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки», Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Popov Alexey Yurievich, candidate of engineering sciences, associate professor of the department «Heat power plants», Komsomolsk-na-Amure State University  
Донец Вадим Максимович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Donets Vadim Maksimovich, student of Komsomolsk-na-Amure State University

#### ЭФФЕКТИВНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ РЕАКТИВНОСТИ СТУПЕНЕЙ ОТСЕКА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

#### EFFICIENT DISTRIBUTION OF REACTION INTO THE STAGES OF THE STEAM TURBINE COMPARTMENT

Аннотация. Данная работа посвящена вопросам проектирования проточной части отсека паровой турбины. В качестве параметра, влияющего на эффективность отсека паровой турбины, выбрана степень реактивности ступеней на корневом, среднем и периферийном сечениях лопаток. В работе приведены результаты расчетов ступеней отсека для цилиндра высокого давления паровой турбины.

Abstract. This work is devoted to the design of the flow part of the steam turbine compartment. As a parameter affecting the efficiency of the steam turbine compartment, the degree of reactivity of the steps on the root, middle and peripheral sections of the blades is selected. The paper presents the results of calculations of the compartment stages for the high-pressure cylinder of a steam turbine.

Ключевые слова: паровая турбина, цилиндр высокого давления, эффективность отсека паровой турбины, степень реактивности ступени.

Key words: steam turbine, high pressure cylinder, efficiency of the steam turbine compartment, degree of reactivity of the stage.

При проектировании проточной части цилиндров паровой турбины конструкторы имеют дело с выбором значений конструктивных и газодинамических параметров, которые влияют на эффективность выработки механической энергии.

В данной работе рассматривается задача проектирования проточной части отсека цилиндра высокого давления паровой турбины. В качестве варьируемого параметра, влияющего на эффективность отсека паровой турбины, выбрана степень реактивности ступеней.

Для решения этой задачи был использован программный пакет AxSTREAM, разработанный компанией SoftInWay Inc[1]. для концептуального проектирования турбин. При создании конструкции турбины программный пакет AxSTREAM позволяет проектировщику отталкиваться от параметров рабочего тела на входе и выходе и от геометрических ограничений для выполнения предварительного проектирования.

Компанией SoftInWay разработана бесплатная версия AxSTREAM Lite, которая предоставляет базовую функциональность для предварительного проектирования и анализа средней линии осевых турбин. AxSTREAM Lite также имеет функциональный решатель, позволяющий выполнять задачи анализа в различных формулировках: с определением массового расхода при фиксированном давлении на входе и выходе, с определением давления на входе при фиксированном массовом расходе и с уникальными задачами для определения углов выходного потока при фиксированных расходе и давлении.

Исходные данные, принятые для расчета проточной части первого отсека цилиндра высокого давления, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета

Название	Значение	Размерность
Давление пара перед отсеком	9,0	МПа
Температура пара перед отсеком	484	°С
Давление пара за отсеком	5,2	МПа
Расход пара	150	кг/с
Корневой диаметр	860	мм
Угол выхода пара из сопл первой нерегулируемой ступени	12	°
Количество ступеней отсека	5	шт.
Степень реактивности ступеней на корневом диаметре	0,08-0,20	–

В результате предварительного проектирования в программном комплексе AxSTREAM Lite были проведены расчеты проточной части первого отсека цилиндра высокого давления и определены значения внутреннего КПД (рисунок 1) в диапазоне минимальной реактивности ступени на корневом диаметре от 0,08 до 0,20.

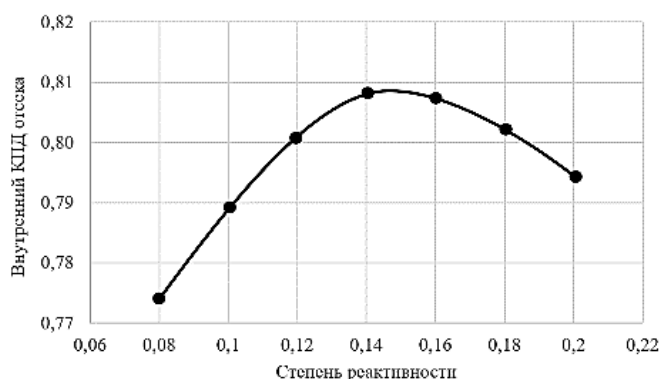


Рисунок 1 – Зависимость внутреннего КПД от минимальной степени реактивности

Для проектируемого отсека цилиндра высокого давления среднее значение минимальной степени реактивности на корневом диаметре ступени было принято равным 0,144. Далее в программном комплексе AxSTREAM Lite были проведены подробные расчеты конструктивных и газодинамических параметров проточной части первого отсека цилиндра высокого давления на корневом, среднем и периферийном сечениях ступеней. Полученные значения степеней реактивности ступеней представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Распределение степеней реактивности ступеней отсека

Номер ступени	Диаметр ступени		
	корневой	средний	периферийный
1	0,149	0,204	0,253
2	0,150	0,208	0,258
3	0,148	0,211	0,267
4	0,146	0,216	0,277
5	<b>0,144</b>	0,222	0,288

На рисунке 2 представлена конструктивная схема проточной части отсека.

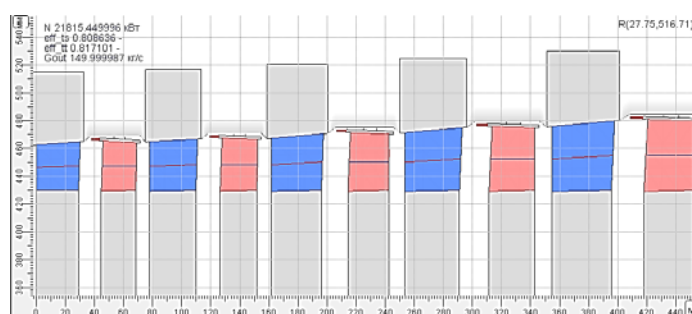


Рисунок 2 – Конструктивная схема проточной части

На рисунке 3 приведен процесс расширения пара в отсеке на среднем диаметре в координатах I-S.

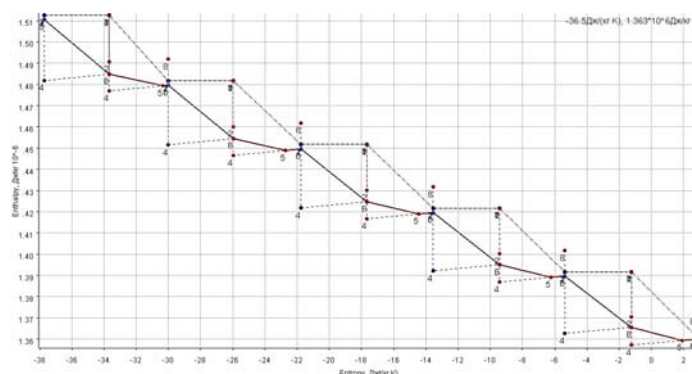


Рисунок 3 – Процесс расширения пара в диаграмме I-S

На рисунке 4 – треугольники скоростей и форма средней линии лопаток на среднем диаметре ступеней.

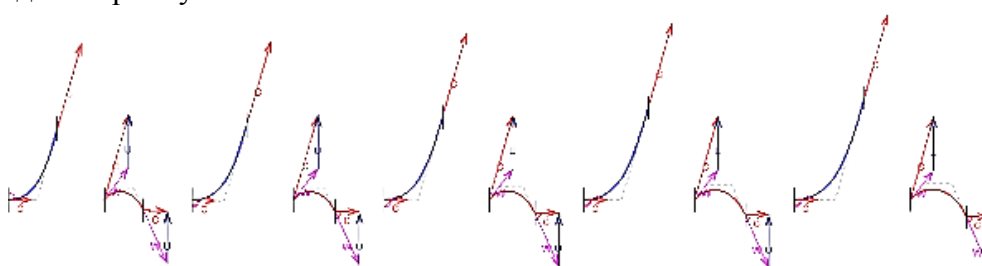


Рисунок 4 – Треугольники скоростей на средней линии лопаток

В результате были получены конструктивные параметры проточной части отсека паровой турбины, рассчитанные на основе эффективного распределения степени реактивности ступеней.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. SoftInWay – Turbomachinery Mastered. – Раздел сайта «ABOUT-US». – URL: <https://www.softinway.com/about-us/> (дата обращения: 05.11.2022)

УДК 621.438.9

Попов Алексей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки», Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Popov Alexey Yurievich, candidate of engineering sciences, associate professor of the department «Heat power plants», Komsomolsk-na-Amure State University

Тарасов Семен Николаевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Tarasov Semyon Nikolaevich, student of Komsomolsk-na-Amure State University

#### **ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ГТУ С ИЗМЕНЕННОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ ПРОЦЕССОВ**

#### **FUNCTIONAL MODEL OF GTU WITH A MODIFIED SEQUENCE OF PROCESSES**

Аннотация. Данная работа посвящена вопросам разработки функциональной модели газотурбинной установки с измененной последовательностью процессов. На основе полученной модели были проведены расчеты параметров рабочего тела и характеристик данной газотурбинной установки применительно к задаче утилизации тепловой энергии, получаемой при сжигании остаточных газов нефтехимического производства в инсинераторе.

Abstract. This work is devoted to the development of a functional model of a gas turbine installation with a modified sequence of processes. On the basis of the obtained model, calculations of the parameters of the working fluid and the characteristics of this gas turbine installation were carried out in relation to the problem of utilization of thermal energy obtained by burning residual gases of petrochemical production in an incinerator.

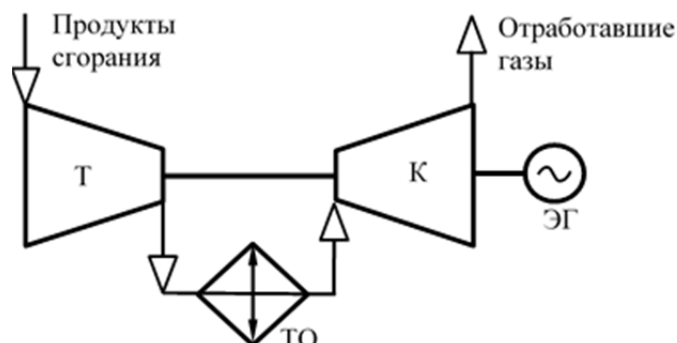
Ключевые слова: газотурбинная установка, функциональная модель, утилизация тепловой энергии.

Key words: gas turbine plant, functional model, heat energy utilization.

Газотурбинная установка (ГТУ) состоит из трех основных элементов: компрессора, камеры сгорания и газовой турбины. В традиционной ГТУ процессу получения механической энергии в газовой турбине предшествуют процесс повышения давления воздуха в компрессоре и процесс повышения температуры рабочего тела в камере сгорания. В газотурбинной установке с измененной последовательностью процессов выработка энергии происходит иначе (рисунок 1): продукты сгорания с высокой температурой и давлением, близким атмосферному, поступают в газовую турбину, где расширяются до давления ниже атмосферного. Далее отработавшие газы охлаждаются в теплообменном аппарате, поступают в компрессор и сбрасываются в атмосферу. Компрессор предназначен для создания разрежения и обеспечения перепада давлений рабочего тела на газовой турбине. Газовая турбина и компрессор выполнены на одном валу с электрогенератором, который вырабатывает электрическую энергию. Таким образом,

ГТУ с измененной последовательностью процессов позволяет получить электрическую энергию за счет избыточной мощности газовой турбины и тепловую энергию от охлаждения рабочего тела в теплообменном аппарате.

Эффективность ГТУ с измененной последовательностью процессов выше по сравнению с традиционными ГТУ из-за отсутствия энергетических затрат на сжатие топливного газа перед камерой сгорания. ГТУ с измененной последовательностью процессов могут применяться как утилизационные установки в технологических процессах сжигания попутного нефтяного газа с низким метановым числом (для такого газа велика вероятность возникновения детонации в камере сгорания традиционных ГТУ).



Т – газовая турбина; ТО – теплообменный аппарат; К – компрессор; ЭГ – электрогенератор  
Рисунок 1 – Принципиальная схема ГТУ с измененной последовательностью процессов

В данной работе рассмотрен вопрос создания функциональной модели такой ГТУ применительно к задаче утилизации теплоты, образующейся при сжигании горючих соединений, присутствующих в остаточных газах и других газообразных отходах, отводимых из установки очистки хвостовых газов АО «Ангарская нефтехимическая компания».

Сжигание происходит в блоке инсинератора, который представляет собой установку нагнетательного типа и предназначен для окисления горючих компонентов, включающих в себя хвостовые, продувочные и остаточные газы из установки по извлечению серы.

Параметры продуктов сгорания, образующихся в блоке инсинератора, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Состав и параметры продуктов сгорания

Состав, % по массе		
Азот	N <sub>2</sub>	79,0
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	9,5
Аргон	Ar	4,4
Двуокись углерода	CO <sub>2</sub>	6,7
Кислород	O <sub>2</sub>	0,4
Параметры		
Температура	954	°С
Давление	0,110	МПа
Расход	4,0	кг/с

Разработка функциональной модели проводилась в программном комплексе DWSIM v8.3[1]. DWSIM – это CAPE-OPEN система с открытым исходным кодом, управляемый имитатор химических и тепловых процессов, созданный на основе Microsoft .NET 4.0 и использующий точные термодинамические модели и единичные модели технологических операций.

Для расчета свойств рабочего тела в программном комплексе DWSIM был выбран термодинамический пакет CoolProp [2].

Этапы создания функциональной модели соответствуют общим положениям, рассмотренным в методических указаниях «Симуляторы тепловых схем энергетического оборудования» [3].

Технологическая схема функциональной модели, выполненная в программном комплексе DWSIM, приведена на рисунке 2.

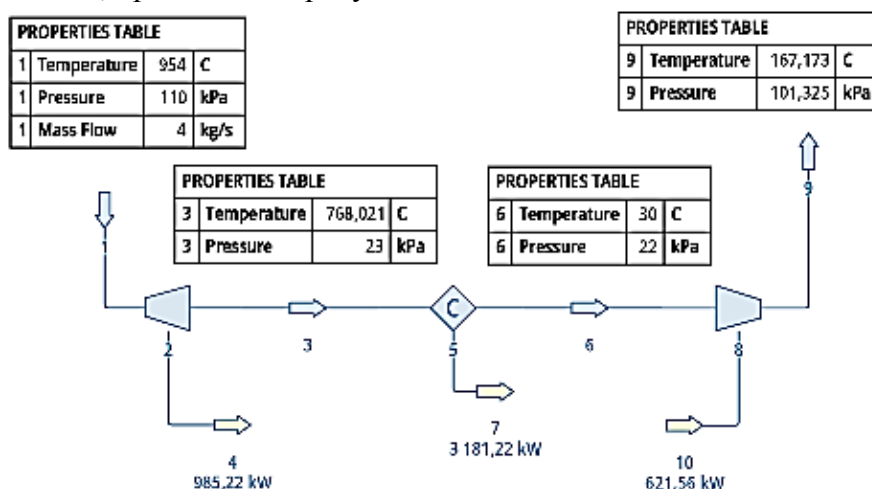


Рисунок 2 – Технологическая схема процесса

На рисунке 2 цифрами обозначены: 1 – продукты сгорания; 2 – газовая турбина (внутренний КПД принят равным 0,85); 5 – теплообменный аппарат (аэродинамическое сопротивление принято 1,0 кПа); 8 – компрессор (внутренний КПД принят равным 0,80; разрежение, создаваемое компрессором, принято 22 кПа); 9 – выход отработавших газов в атмосферу.

На основе разработанной функциональной модели ГТУ с измененной последовательностью процессов были получены результаты, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов

Название	Значение	Размерность
Электрическая мощность ГТУ (при $\eta_M=0,99$ ; $\eta_{ЭГ}=0,97$ )	349	кВт
Тепловая мощность ГТУ	11,45 2,74	ГДж/ч Гкал/ч
Температура уходящих газов	167,2	°C
Коэффициент использования тепловой энергии (при $t_{y_{Xmin}}=120$ °C)	94,3	%

Выполненная в программном комплексе DWSIM функциональная модель ГТУ с измененной последовательностью процессов позволяет оценивать возможность утилизации вторичных энергоресурсов с целью выработки тепловой и электрической энергии.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. DWSIM Chemical Process Simulation for Everyone. – Раздел сайта «HOME». – URL: <https://dwsim.org/> (дата обращения: 05.11.2022);
2. CoolProp. Раздел сайта «Home». – URL: <http://www.coolprop.org/index.html> (дата обращения: 05.11.2022);
3. Симуляторы тепловых схем энергетического оборудования: метод. указания по выполнению лаб. работ / сост. А. Ю. Попов. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2016. – 19 с.

Пухов Алексей Александрович, магистрант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Puhov Alexey Alexandrovich, master degree student of Komsomolsk-na-Amure State University

Гринкруг Мирон Соломонович, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Grinkrug Miron Solomonovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

## **ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО НЕДОЖОГА В КОТЛОАГРЕГАТАХ С ТВЕРДОТОПЛИВНЫМ ПИТАНИЕМ**

### **CAUSES OF PHYSICAL UNDERBURNING IN BOILERS WITH SOLID FUEL FEEDING**

Аннотация. В данной статье рассматриваются причины возникновения физического недожога при сжигании твёрдого топлива в котельных агрегатах, вызванных как конструкцией самого устройства, так характером осуществления процессов в нём протекающих. Причины возникновения физического недожога рассмотрены для различных видов котлов по временному и фракционному характеру подачи топлива, сделаны заключения о возможности и способах снижения указанного недожога для различных условий.

Abstract. This article discusses the causes of physical underburning during solid fuel combustion in boiler units caused by both the design of the device itself and the nature of the processes occurring in it. The causes of physical underburning are considered for various types of boilers according to the temporary and fractional nature of fuel supply, conclusions for various conditions about the possibility and methods of reducing this underburning are made.

Ключевые слова: физический недожог, твердотопливные котельные агрегаты.

Key words: physical underburning, solid fuel boiler units.

Сгорание топлива, в особенности твёрдого, представляет собой сложную совокупность параллельно протекающих процессов (возгонка, испарение, ионизация и другие), которые, по причине множественных взаимодействий как в самой области горения, так и, опосредованно, с окружающей средой, достаточно трудно поддаётся точно физико-химическому описанию. Отклонение же протекания процесса окисления топлива от идеальных параметров, которое непременно присутствует при нормальной работе котельных устройств, приводит к образованию двух видов потерь:

- потерь с химическим недожогом;
- потерь с физическим недожогом.

Химический недожог характеризует собой ситуацию, когда образующиеся при горении продукты имеют промежуточные степени окисления по отношению к максимальным для заданных элементов (образование монооксида углерода, например) и является отдельной проблемой для изучения [1].

Физический недожог характеризует собой ситуацию, когда исходное топливо покидает область сгорания в неизменном виде, в том числе в составе конгломератов. Также к физическому недожогу можно отнести происходящие внутри котла процессы, которые ведут к образованию покидающей его пределы сажи вне зависимости от причин, поскольку зачастую установить их не представляется возможным и, как следствие, невозможно разграничение физического и химического недожогов в этой области.

Процесс сгорания топлива можно разделить на две основные фазы, которые частично перекрывают по времени друг друга [1]. Во время первой фазы, наиболее близкой к моменту контакта топлива с поджигающим его фактором (тепловым излучением, высокоэнергетическими молекулами, атомами и так далее), происходит первоначальный разогрев и выделение из угля так называемых летучих веществ, представляющих



собой углеводороды различного состава, чья температура кипения ниже температуры вспышки или близка к ней. Испарение летучих веществ забирает часть передаваемого твёрдой фазе угля тепла, тем самым препятствуя сгоранию углеродной матрицы, которая, в случае достаточно крупнодисперсного состава топлива, тем не менее, может окисляться в местах наибольшей термической напряжённости. После того, как количество испаряющихся в единицу времени углеводородов достигнет критически малого количества, не обеспечивающего достаточный уровень охлаждения твердой фазы, начинается её горение в традиционном понимании.

Как можно видеть из вышесказанного, в виду наличия двух различных фаз, которые разнесены во времени, процесс сгорания топлива в котле имеет двухступенчатую структуру, что, конечно же, требует изменения условия сгорания для каждой из них - условия, зачастую игнорируемого при нормальной эксплуатации.

Так, например, совершенно очевидно, что летучие вещества угольного топлива, в виду своих физических свойств и невозможности мгновенного сгорания, имеют некое распределение по внутреннему объёму котельного агрегата, в контрпример поверхностного сгорания остающейся твёрдой фазы (за исключением случая с распылом угольной пыли). Это приводит к тому, что в тех местах, которые имеют температурные поля меньшей интенсивности или изменённые состояния по избытку воздуха, возможно образования продуктов неполного сгорания, часто принимающих вид сажи. Распределение подобных зон напрямую зависит от физической конфигурации топки котельного агрегата, его дутьевого и дымососного оборудования, а также фракционного состава топлива, где присосы воздуха через разуплотнение корпуса котла приводят к локальному снижению температуры и, как следствие, потенциально способствуют образованию сажи из летучих компонентов топлива. Скопление топлива в локальных пространствах (в случаях, например, котлов с ручной загрузкой) приводит к значительному избытку топлива над подачей воздуха (этому же способствует и застои от несовершенства тягодутьевой системы), что также благоприятствует физическому недожогу. Этот же процесс может происходить при использовании топлива крупной фракции, поскольку в таком случае естественным образом снижается как равномерность распределения топлива по области сгорания, так и появляется возможность изменения характера течения воздушных потоков из-за различий в газодинамических сопротивлениях, создаваемых телами разной формы.

С другой стороны, сгорание твёрдой фазы топлива имеет свои недостатки.

В виду наличия угля разных фракций, часть мелких крошек, но недостаточно мелких, чтобы успеть сгореть, появляющихся в результате механического дробления угля при перевозке, перегрузке, кантовании и так далее, может быть унесена потоками питающего котёл воздуха за пределы зоны горения. Также част случай, когда сжигаемое топливо по мере сгорания начинает проваливаться сквозь колосниковую решётку, тем самым попадая в состав убираемого шлака. В случае котлов на пылевом топливе, часть топлива захватывается шлаком при его выпадении из ядра факела (в системе с твёрдым шлакоудалением) [2].

Рассмотрим процесс физического недожога в котлах разных систем.

В текущей практике применяются два типа котельных агрегатов по характеру поступления в них топлива:

- с непрерывной подачей (котлы с распылением угольной пыли, с барабаном непрерывной подачи, с подвижной загрузочной сеткой);
- с периодической загрузкой (с шурующей планкой, с ручной загрузкой).

В котлах с распылением угольной пыли механизм образование физического недожога из-за нарушения процесса горения летучих веществ топлива представляется маловероятным в виду достаточно равномерного распределения топлива по области факела, а также того, что зачастую такие системы топливоподачи применяются на котлах большой мощности, в которые обладают значительным совершенством конструкции по отношению к котлам малой мощности с преимущественной топливоподачей

кусового топлива. Основная причина физического недожога в данном типе котлов – неполнота сгорания углеродной матрицы крупной пыли (поскольку соблюдение малой дисперсии по размерам при измельчении угля в пыль достаточно сложно в плане технического осуществления), которая выносится из котла течением газов. Несколько меньший унос образуется от захвата недогоревшего топлива выпадающим шлаком.

В системах с пылевой углеподачей основной мерой по снижению физического недожога является подбор правильной конструкции топливных форсунок и режимов их работы, которые гарантируют полноту сжигания топлива в пределах факела (увеличение «длины» факела за счёт его наклона по отношению к профилю топки, его турбулентное закручивание, образование факела из встречных потоков и так далее).

В котлах с топливоподачей кусковых форм угля можно выделить несколько причин физического недожога, которые могут иметь разную важность по причине различных конструкций котла:

- провал недогоревшего топлива сквозь колосниковую решётку;
- вынос частично сгоревшего топлива течением газов в воздушном тракте котельного агрегата;
- образование продуктов промежуточного окисления летучих веществ в местах с присосами воздуха через разуплотнение, в том числе через окна загрузки угольного топлива.

Понятно, что колосниковая решётка должна иметь некоторую пористость, поскольку избыточная сплошность препятствует подпитке воздухом и, как следствие, мешает горению топлива. Точно также невозможно и применение решёток, сделанных из сеток малого сечения прутьев (с целью сокращения размеров ячейки), поскольку они должны удерживать заданную массу топлива, а также потому, что малость сечения прутьев способствует их ускоренному механическому и химическому (в результате окисления) износу. Таким образом сокращение физического недожога путем сокращения провала топлива в шлаковое хранилище является компромиссным состоянием по отношению к производительности и надёжности котла в связи с чем зачастую неустранимо.

В действительности присутствуют решения, которые при формальном наличии колосниковой решётки производят сжигание топлива в условиях маловероятности провала топлива сквозь неё (сжигание в кипящем слое) [2]. Однако, они обладают иными недостатками, вроде повышенных требований к фракционному составу топлива и инертного наполнителя, которые негативно влияют на стоимость как самой установки, так и на затраты на её функционирование.

Вынос частично недогоревшего топлива в условиях кускового сжигания происходит из-за, в первую очередь, постоянства объёмного расхода топлива через воздушный тракт котла. В первое время после загрузки топлива, куски угля обладают значительными габаритами, в связи с чем их унос воздухом практически невозможен. Однако, по мере сгорания (а происходит оно, преимущественно, по поверхности), размер кусков уменьшается, что, при условии сохранения скорости потока газов в котле, создаёт предпосылки к уносу топлива. Решение данной проблемы может быть найдено в регулировании объёмных расходов воздуха (частотное регулирование привода дутьевого насоса и дымососа) в течении одного цикла загрузки. При этом, скорость сгорания топлива и поступление тепла в результате горения может иметь незначительные флуктуации, поскольку уменьшение расхода воздуха снижает коэффициент избытка воздуха, что приводит к повышению температуры газов внутри котла и, соответственно, увеличению теплоотдачи, при попутном росте эффективного КПД за счёт снижения потерь тепла с уходящими газами. Снижение коэффициента избытка воздуха рационально ещё и тем, то по мере уменьшения размеров кусков угля, удельная поверхность их возрастает, тем самым снижаются и требования к избытку воздуха для нормального процесса сгорания. Тем не менее, данный способ не применяется на практике, в особенности в области малой энергетики, поскольку запрашивает увеличенные требования к оборудованию и его настройке, чем обычно не занимаются.

Другой распространённой причиной возникновения физического недожога являются всевозможные присосы воздуха в котельном агрегате. Помимо уже обозначенных проблем, присосы воздуха также могут нарушать циркуляцию газов внутри котельного агрегата, значительно снижая эффективность работы частотного привода тягодутьевого механизма, что часто встречается на практике. Так, например, в случае, когда объем подаваемого дутьевым вентилятором воздуха превышает возможности по удалению его и продуктов сгорания дымососным устройством, возможно создание избыточного давления внутри котла и, как следствие, истечения газов из него через разуплотнение. Это, как и обратная ситуация с образованием сильного разрежения внутри котла, приводит к нарушению естественной циркуляции газов в котле, локальным изменениям температурных и скоростных полей, что может увеличивать величину физического недожога. Метод устранения проблемы – минимизация площади мест контакта внутренней среды котла с внешней, а также синхронизация режимов работы дымососа и дутьевого вентилятора.

В котлах с ручной загрузкой ситуация может ухудшаться за счёт уменьшения равномерности засыпки топлива. При таких условиях топливо в котельном агрегате на момент засыпки новой порции находится в разных степени сгорания, в связи с чем создаются условия для больших удельных величин провала недогоревшего топлива в шлаковую зону. Способ ликвидации проблемы – замена ручного труда системами автоматической подачи топлива.

Таким образом, физический недожог в котельных агрегатах представляется в виде совокупности различных взаимозависимых причин, часть из которых может быть устранена грамотной настройкой вспомогательного оборудования, а также ликвидацией дефектов конструкции самого котлоагрегата.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кнорре Г.Ф. Теория топочных процессов. - М.: "Энергия", 1966. - 477 с.
2. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Ч.1. Топливо: учеб. пособие / СПбГТУРП. – СПб., 2011. – 84 с.: ил.15.

УДК621.311

Смирнов Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Тепловые энергетические установки», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Smirnov Aleksey Vladimirovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of department of «Thermal Power Plants», Komsomolsk-na-Amure State University

Исаев Максим Сергеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Isaev Maxim Sergeevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University

#### **АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ**

#### **ANALYSIS OF ENERGY LOSSES IN STEAM TURBINE INSTALLATIONS AT THERMAL POWER PLANTS**

Аннотация. В работе приводится информация о потерях в паротурбинных установках. Рассмотрены различные виды энергетических потерь при работе паротурбинных установок, а также причины их возникновения. Представлены методы их уменьшения, использующиеся на предприятиях. Проанализированы возможные причины их игнорирования.

Abstract. The paper provides information about losses in steam turbine installations. Various types of energy losses during the operation of steam turbine installations are considered, as

well as the causes of their occurrence. The methods of their reduction used in enterprises are presented. The possible reasons for ignoring them are analyzed.

Ключевые слова: паровая турбина, потери, анализ, причины, повышение КПД.

Key words: steam turbine, losses, analysis, causes, increase in efficiency.

Паротурбинные установки на сегодняшний день по-прежнему сохраняют доминирующее положение по распространенности среди тепловых установок тепловых электростанций. Соответственно представляют интерес вопросы, связанные с повышением эффективности работы паровых турбоустановок. В этом свете целесообразным представляется анализ энергетических потерь в таких установках, по результатам которого можно предлагать и решения по повышению эффективности работы.

Энергетические потери в паровой турбине делятся на два типа в зависимости от основных причин их возникновения:

1. Внутренние потери, обусловленные, в первую очередь, движением рабочего потока пара через различные части турбины.

2. Внешние потери, включающие различные механические потери и утечки пара в конструкции турбины.

Раскроем основные причины возникновения потерь в паровой турбине. Несовершенство преобразования тепловой энергии в механическую из-за почти полной невозможности реализовать в реальных условиях изоэнтропический процесс расширения приводит к его замене политропными процессами. Как следствие, реальное количество энергии, вырабатываемое в ступенях, меньше теоретически возможного. Часть энергии пара, подведенного в цилиндр турбины, рассеивается в окружающую среду, не участвуя в работе турбины. Также небольшая часть работы, выработанная на ступенях и переданная валу, расходуется на преодоление механических сопротивлений, например, трение в подшипниках, приведение в действие системы регулирования и другие.

Рассмотрим подробнее внутренние потери в турбине [1, 2].

Потери трения пара о диск заключаются в преодолении трения пара о диск и сообщении пару ускорения после преодоления вращающегося диска.

Потери в вентиляции возникают на первых ступенях турбин с парциальным пропуском пара. Рабочие лопатки вращаются между сопловыми аппаратами и действуют как вентилятор, перекачивая пар с одной стороны диска на другую. На это затрачивается доля энергии рабочего потока пара.

Потери на утечку пара через внутренние зазоры. Такие потери возникают у активных турбин между валом и диафрагмами, а у реактивных турбин – в радиальных зазорах. При этом пар не вырабатывает энергию в пропущенных им ступенях и тем самым снижает эффективный коэффициент полезного действия турбины.

Потери от влажности пара. Возникают в последних ступенях конденсационных турбин, если они работают в области влажного пара. Частицы влаги летят под неправильным углом к кромке лопаток, оказывая тем самым тормозящее действие на ротор. Также капельки воды оказывают разрушительное действие на лопатки, что в долгосрочной перспективе приводит к их замене раньше окончания срока эксплуатации.

Существуют также и другие потери, но обычно они не настолько значительны, либо сложно выявляемы, поэтому их зачастую не рассматривают вовсе.

Следует также рассмотреть более подробно внешние потери турбины [1]. Их суть состоит в том, что такие потери не влияют на состояние и количество рабочего пара в проточной области турбины. К таким потерям можно отнести затрату энергии на вращение неработающих ступеней турбины заднего хода, а также на трение в подшипниках турбин и др.

Механические потери возникают при затрате энергии на преодоление трения в подшипниках, привод регулятора и других вспомогательных механизмов. К данным потерям относят также затраты энергии в зубчатом редукторе, если он необходим для

передачи работы от вала турбины. Сюда же относят и непосредственные утечки пара через внешние уплотнения вала в окружающую среду.

При непосредственном выпуске пара из турбин и парогенераторов, часть конденсата этого пара не возвращается на ТЭС. Это также относят к внешним потерям [3].

Выше мы рассмотрели большинство видов энергетических потерь в паровой турбине. Интересным представляется следующий вопрос: может ли часть внешних потерь от рассеяния пара, подведенного к турбине, повлиять на внутреннее состояние пара главного потока, и не попадет ли такой вид потерь в категорию внутренних? Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Представим отделенный поток пара, который прошел ряд процессов и вернулся в главный поток. Процессы, которые совершаются ответвленными потоками за пределами главного, могут быть различны. Например, некоторые процессы могут привести к уменьшению в них теплосодержания и давления в отделенном потоке, другие же (теоретически) – к снижению теплосодержания без изменения давления. Также возможны процессы, в результате которых снизится давление без снижения теплосодержания. Совершив какую-либо комбинацию этих процессов и вернувшись в турбину, при смешивании ответвленного и главного потоков, первый окажет влияние на последний, что, в свою очередь, будет считаться внутренними потерями. Можно сделать вывод, что некоторые внешние потери могут влиять на состояние главного потока, следовательно, переходить в категорию внутренних потерь [4].

После того, как мы рассмотрели виды потерь и причины их возникновения, а также возможные пути перехода потерь из одного вида в другой, можно приступить к рассмотрению путей или решений для их устранения, применяющихся на тепловых электростанциях.

Одним из решений является применение устройства для уплотнения регулирующей диафрагмы, которое используется в турбинных установках с регулируемым отбором пара [5]. Полное закрытие такой диафрагмы позволяет турбине работать по тепловому графику с наименьшими отборами пара в часть низкого давления. Такие турбинные установки зачастую используются при комбинированной выработке электрической и тепловой энергии для лучшей регулировки процессов. Уплотняющее устройство представляет собой элементы, расположенные в пазах на сторонах разгрузочных камер, и обязательно контактирующих с обеими частями диафрагмы: подвижной и неподвижной. Данные элементы в обязательном порядке должны обладать антифрикционными свойствами. Они могут быть изготовлены, например, из латуни, бронзы или фторопласта. Также необходимо сохранять паровую разгрузку поворотного кольца. Это сильно усложняет технологию уплотнения. Для определения перспектив в этой области проведено исследование возможности снижения пропуска пара с одновременной ликвидацией системы разгрузки. В результате проведенных исследований, ученые подтвердили эффективность такого метода [6].

Еще одним методом уменьшения потерь, используемым на производстве, является применение саблевидных лопаток. Саблевидные лопатки – это изогнутые лопатки, напоминающие по внешнему виду саблю. При использовании данных лопаток, корневые сечения наклоняют в окружном направлении в сторону вращения рабочего колеса, а периферийные – навстречу вращению. Как следствие, мы получаем уменьшение количества пара, протекающего через корневую периферийную зону ступени, где обтекание происходит хуже. Также происходит увеличение степени реактивности в корневых сечениях и уменьшение в периферийных, то есть снижаются интенсивность конечных потерь и периферийные утечки пара. В том числе происходит выравнивание поля выходных скоростей, что также снижает потери. Наиболее эффективно применение саблевидных лопаток для последних ступеней цилиндра низкого давления мощных паровых турбин [7].

Данные методы либо уже используются на производстве, либо находятся на стадии внедрения. Зачастую на тепловых электростанциях используются комплексные

приемы совершенствования рабочих процессов, и суммирование их эффектов дает хорошую прибавку к КПД турбины. Что касается других внутренних потерь, то их стараются снизить, совершенствуя конструкцию турбины и паровые циклы. Некоторые же из потерь попросту игнорируются. Этому есть несколько объяснений: либо они настолько малы, что не оказывают существенного влияния на КПД установки, либо требуют такого усложнения конструкции, что наличие потерь выходит дешевле, чем их устранение. Но следует отметить, что в связи с продолжающимся развитием техники, в том числе паротурбинной, потери уменьшаются и их влияние на коэффициент полезного действия паротурбинной установки становится все менее существенным.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Быстрицкий Г.Ф., Гасангаджиев Г.Г., Кожиченков В.С. Общая энергетика (Производство тепловой и электрической энергии): учебник - 2-изд., стер.-М.: КНО-РУС, 2016. - 408с.
2. Турбины тепловых и атомных электрических станций / Под ред.А.Г. Костюка, В.В. Фролова.-М.: Издательство МЭИ, 2001.– 488с
3. Трухний А.Д. Стационарные паровые турбины.- М.: Энергоатомиздат, 1990.–640с.
4. «Повышение эффективности эксплуатации паротурбинных установок ТЭС и АЭС» – Том 1, Хоменок Л.А., Ремезов А.Н., Ковалёв И.А., 2001г.-264с.:ил.
5. Исследование и совершенствование проточной части низкого давления мощных паровых турбин / В.П.Лагун, Л.Л. Симою- В кн.: Котельные и турбинные установки энергоблоков мощностью 500 и 800 МВт. Под ред. В.Е. Дорощука и В.Б. Рубина.- М.,1979–340с.
6. Поворотная регулирующая диафрагма турбины / Г.А.Шапиро, А.Г. Шемпелев, В.М.Карцев, Е.И.Эфрос, С.И.Иванов.-Опубл.вБ.И.,1990,№4.
7. Исследование ЧНД турбины ПТ-60-130/13 при работе с уплотненной регулирующей диафрагмой низкого давления /Г. А. Шапиро, В.А. Матвеевко, Ю.В. Нахман и др. - Теплоэнергетика, 1980, № 2 – 35с.

УДК 621.039.58

Колмыкова Валерия Олеговна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Kolmykova Valeria Olegovna, student of Komsomolsk-na-Amure State University

Смирнов Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Тепловые энергетические установки», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Smirnov Alexey Vladimirovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Department “Thermal power plants”, Komsomolsk-na-Amure State University

#### **ОСОБЕННОСТИ ЯДЕРНОЙ АВАРИИ НА АТОМНОЙ ПОДВОДНОЙ ЛОДКЕ К-431 В БУХТЕ ЧАЖМА**

#### **FEATURES OF THE NUCLEAR ACCIDENT ON THE K-431 NUCLEAR SUBMARINE IN CHAZHMA BAY**

Аннотация. В статье рассматриваются события ядерной аварии на атомной подводной лодке К-431 в Бухте Чажма, а также приводится сравнительный анализ с другими ядерными авариями.

Abstract. The article discusses the events of the nuclear accident on the nuclear submarine K-431 in Chazhma Bay, and also provides a comparative analysis with other nuclear accidents.

Ключевые слова: атомная подводная лодка, Уссурийский залив, ядерная авария в бухте Чажма.

Key words: nuclear submarine, Ussuri Bay, nuclear accident in Chazhma Bay.

Двадцать шестого апреля 1986 года произошла авария на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС), которая заставила весь мир задуматься о целесообразности использования энергии мирного атома. Менее чем за год до этих событий произошла одна из значительных аварий на советском атомном флоте, масштабы которой до сих пор многими специалистами в сфере атомной энергетики сравниваются с аварией на 4 энергоблоке ЧАЭС. Даже в эпоху гласности и перестройки руководители страны не открыли подробности аварии на К-431 в бухте Чажма. Более детальная информация стала известна только после развала Советского Союза.

Послевоенное оснащение Тихоокеанского флота (ТОФ) в виде самого совершенного вооружения того времени, подводных и надводных кораблей, атомных ракетноносцев с большой автономностью плавания, позволило флоту выйти из прибрежных вод на просторы Мирового океана. Начиная с 1968 г., пребывание кораблей ТОФ в Тихом и Индийском океанах стало обычной практикой [1].

Регионами базирования атомных подводных лодок (АПЛ) на ТОФ стали Камчатка и Приморский край. Приморская военно-морская база располагалась на расстоянии 30-40 км от Владивостока через Уссурийский залив, в заливе Стрелок и входящих в него бухтах.

Сведения о подводной лодке К-431 и произошедших с ней событиях в 1985 году подробно описаны в работе [2]. Приведем основные сведения и факты из этой работы.

Подводная лодка К-31, в 1978г. переименованная в К-431, была заложена на заводе имени Ленинского Комсомола города Комсомольска-на-Амуре 11 января 1964 года. Темпы строительства вооружения достигали грандиозных масштабов, поэтому уже 8 сентября того же года лодка была выведена из цехов и спущена на воду. После прохождения заводских и государственных испытаний 30 сентября 1965 года лодка вошла в состав ТОФ.

Проектирование лодки велось в конструкторском бюро «Рубин» под руководством конструктора П.П. Пустынцева. Разработчикам была поставлена задача в короткие сроки сконструировать новый тип подводных лодок, которые могут стоять на одном уровне с разработками американских учёных. Для быстроты проектирования разработчики взяли за основу дизельную подводную лодку проекта 651, оснащённую четырьмя крылатыми ракетами. В основу энергетической установки была взята уже отработанная систему ЯЭУ проекта 627. Энергетическая система состояла из двух водо-водяных реакторов на тепловых нейтронах типа ВМ-А. В качестве ядерного топлива использовалась высокообогащенная по 235-му изотопу двуокись урана. Реакторы располагались за ходовой рубкой в шестом необитаемом реакторном отсеке, в котором несли только вахту. Для обеспечения безопасности военнослужащих, жилые отсеки, второй и девятый, располагались на удалении 20-30 м от реакторов. Для экранирования окружающей АПЛ среды от радиационных излучений использовалась твердотельная биологическая защита. Также между лёгким и прочным корпусом протекала морская вода.

Для поддержания цепной реакции в процессе эксплуатации АПЛ производится плановая перезарядка реакторов. Путем загрузки новых тепловыделяющих сборок (ТВС) в активную зону реактора отработанное топливо заменяется на более «свежее». Процедура перезарядки представляет собой достаточно сложный комплекс технических операций из демонтажно-монтажных работ с полной заменой активной зоны и последующими физическими и энергетическими пусками. На АПЛ первого поколения, которой являлась К-431, перезарядка топлива выполнялась в среднем один раз в 5-7 лет. До аварии подлодка прошла две процедуры перезарядки реакторов.



С развитием ядерных технологий изменились и сроки перезарядки топлива. На АПЛ нового поколения перезарядка происходит значительно реже в связи с более высоким энергоресурсом новых типов активных зон и повышением надежности энергетического оборудования.

Десятого августа 1985 года, в день аварии, атомная подводная лодка располагалась у пирса №2 судоремонтного завода ВМФ в бухте Чажма, залива Стрелок в Японском море. Предприятие находилось вблизи посёлка Шкотово-22, ныне посёлок Дунай. Данное подразделение занималось перезагрузкой активных зон ядерных реакторов, а также ремонтом кораблей ТОФ.

Авария случилась в ходе плановых мероприятий по перезарядке активных зон двух установленных на лодке реакторов типа ВМ-А. Специалисты, принимавшие участие в процедуре перезагрузки, имели большой опыт подобных мероприятий, также прошли специальную подготовку, надлежащий инструктаж и имели допуски к проведению работ. Специалист-физик был подготовлен в ИАЭ им. И.В. Курчатова и допущен к самостоятельному проведению ядерно-опасных работ.

Перед процедурой перезагрузки проводилась обычная работа по уплотнению крышек реакторов с проверкой герметичности путём гидравлических испытаний. Проверки были закончены успешно, и кормовой реактор был принят в эксплуатацию. В ходе испытаний носового реактора была обнаружена капельная течь между крышкой и корпусом реакторной установки [2]. Специалисты попытались устранить негерметичность крышки путём поджатия гаек, что не дало успешного результата. Испытания прекратили, и руководитель работ доложил о технических проблемах вышестоящему начальству.

В ходе осмотра носового реактора был выявлен посторонний предмет в виде сварочного электрода, располагавшийся между реакторной крышкой и прокладкой. Об этом 8 августа немедленно было доложено в Техническое управление флота. Была выявлена необходимость замены испорченной уплотнительной прокладки, но на береговой базе её не оказалось. Руководители перезагрузки приняли решение самостоятельно поднять крышку реактора для устранения постороннего предмета.

Впоследствии комиссия установила, что работы на К-431 проводились с нарушением правил технологического процесса, а также требований ядерной безопасности. Например, чтобы поднять крышку реактора, следует использовать стандартные жесткие упоры для поглощения ударов, но специалисты пренебрегли этой необходимостью. При подъеме на стропях крана крышка реактора слегка перекрутилась и задела компенсирующую решетку реактора, потянув за собой топливные элементы вместе с ней. В этот момент катер-торпедолов вошел в бухту, игнорируя поступающие предупреждающие знаки, ограничивающие скорость движения. Лодка прошла через бухту со скоростью 12 узлов, поднимая волну. Волна, поднятая кораблем, достигла берегов и причальных стенок, качнув плавмастерскую, которая никак не была стабилизирована.

Тепловой взрыв с уровнем радиации в эпицентре около 90 тысяч рентгеновских лучей в час отбросил многотонную крышку реактора. Восемь офицеров и два моряка, находившиеся в реакторном отделении, погибли на месте. На подводной лодке начался пожар с мощными выбросами радиоактивной пыли и пара. В образовавшуюся трещину прочного корпуса стала поступать забортная вода, К-431 осела на корму.

Сходство аварии на К-431 и Чернобыльской АЭС заключается в том, что они произошли на ядерных реакторах с топливом на основе обогащенного урана и с водным теплоносителем. В обоих случаях, это были реактивностные аварии, которые сопровождались гибелью части персонала. Различия аварий проявляются при переходе от качественного к количественному сопоставлению физико-технических характеристик реакторов, радионуклидного состава выбросов и радиологических последствий [3].

В качестве замедлителя нейтронов в транспортном реакторе типа ВМ-А использовалась вода, тогда как в РБМК использовался графит. Также стоит отметить различие в тепловой мощности установок: мощность транспортного реактора – 70 МВт, мощ-

ность реактора на ЧАЭС – 3200 МВт. Следовательно, активная зона, в которой протекает цепная реакция деления урана транспортного реактора имеет диаметр около 1 м и высоту примерно 1,5 м, РБМК – 12 м и 7 м соответственно. Габариты реактора ВМ-А позволяют размещать установку в корпусе подлодки диаметром 6 м, тогда как машинный зал энергоблока РБМК имеет длину 220 м, ширину 130 м, высоту 7 м.

Специалисты, изучавшие состав воздуха после выбросов при данных авариях, отметили доминирование продуктов деления урана, но количество коротко- и долгоживущих изотопов, а также радионуклидный состав разительно отличался. Причиной данных результатов можно назвать то, что четвертый энергоблок Чернобыльской АЭС работал на высокой мощности на протяжении 3 лет, при этом при аварии в бухте Чажма, самопроизвольная цепная реакция возникла в только что загруженном топливе, в котором отсутствовали продукты деления от прежней работы.

Из данных событий можно сделать вывод: непреложное выполнение положений культуры безопасности является основой обеспечения технологического процесса на любом объекте атомной энергетики.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Роль российской науки в создании отечественного подводного флота / Под общей редакцией А.А. Саркисова. М.: Наука, 2008.
2. Саркисов А. А., Высоцкий В. Л. Ядерная авария на атомной подводной лодке в бухте Чажма. Реконструкция событий и анализ последствий // Вестник российской академии наук. – 2018. – Т. 88. – №. 7. – С. 599-618.
3. Припачкин Д. А. и др. Оценка радиационной аварии на АПЛ в бухте Чажма по международной шкале ядерных и радиологических событий (ИНЕС) // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2019. – №. 6. – С. 39-45. Петяг, А. Нечеткое моделирование и управление // Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 798 с.

УДК 621.18

Смирнов Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Тепловые энергетические установки», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Smirnov Alexey Vladimirovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Department “Thermal power plants”, Komsomolsk-na-Amure State University

Попов Никита Алексеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Popov Nikita Alexeyevich, student of Komsomolsk-na-Amure State University

#### **ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЦИЛИНДРОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН**

#### **PROBLEMS OF OPERATION OF LOW-PRESSURE CYLINDERS OF STEAM TURBINES**

Аннотация. Данная работа посвящена вопросам исследования существующих негативных процессов в цилиндрах низкого давления турбоустановок, снижающих эффективность этой части турбины, её эксплуатационную надёжность и технико-экономические показатели.

Abstract. This work is devoted to the study of existing negative processes in low-pressure cylinders of turbine installations that reduce the efficiency of this part of the turbine, its operational reliability and technical and economic indicators.

Ключевые слова: ТЭЦ, паровая турбина, ЦНД, малорасходный режим.

Key words: TPP, steam turbine, LPC, low-flow mode.

В настоящее время стационарные паровые турбины являются основой в тепловой и атомной энергетике. Именно на паротурбинные установки приходится большинство мощностей централизованной выработки электрической энергии, а большинство тепловых электростанций (ТЭЦ) на твёрдом топливе используют только паровые турбины.

Паровая турбина является разновидностью теплового двигателя. Степень её термодинамической эффективности во многом повышается из-за использования нескольких стадий расширения рабочего тела (пара), что позволяет максимально приблизить процесс работы турбоустановки к идеальному обратимому процессу расширения (цикл Карно) [1]. Такое техническое решение становится возможным за счёт физического разбиения системы корпус-ротор турбины на цилиндры – части сверхвысокого, высокого, среднего и низкого давлений. Тип цилиндра определяется по значению давления пара на входе. Для цилиндров сверхкритического давления это, как правило, давление больше 30,0 МПа, для цилиндров высокого давления – значение колеблется в пределах 23,5 – 9,0 МПа, цилиндров среднего давления – около 3,0 МПа, для цилиндров низкого давления давление пара на входе не превышает 0,2 МПа [2].

В условиях ограниченности энергоресурсов, их постепенном истощении и наращивании объёмов потребления электроэнергии становится актуальной проблема морального устаревания имеющегося на ТЭЦ основного оборудования. Решить эту проблему без массового переоборудования действующих электростанций возможно за счёт модернизации уже работающих турбоустановок.

Анализ путей повышения эффективности работы турбоустановок показывает, что повысить внутренний относительный КПД турбины, а также её эксплуатационную надёжность, можно, в первую очередь, за счёт улучшения работы цилиндра низкого давления (ЦНД). Ведь в ЦНД происходят наибольшие потери эффективности, а также выходит из строя большинство компонентов по сравнению со всей турбиной. Все это указывает на наличие довольно широких возможностей в части поиска путей повышения эффективности и повышения экономических показателей этой части паровой турбины [3].

Значительную часть от общих дефектов и поломок компонентов турбоустановок составляют повреждения лопаток. Основными причинами, приводящими к разрушению рабочих лопаток ЦНД являются вибрационное воздействие, вызывающее изломы усталостного характера, и эрозионное воздействие под действием потока влажного пара, приводящее к выкрашиванию материала лопаток.

В связи с этим основной проблемой эксплуатации ЦНД ТЭЦ являются малорасходные режимы, или режимы больших теплофикационных нагрузок. На таких режимах большая часть парового потока уходит в отборы к тепловому потребителю, в результате чего в проточную и выхлопную части ЦНД поступает довольно малое количество пара. Паровые потоки в выхлопной части имеют отчетливо выра-

женную пространственную ориентацию (рисунок 1). При режимах пуска и холостого хода в картину движения паровых потоков также добавляются потоки из пароприемных, охлаждающих и сбросных устройств. В итоге схема движения складывается из сложения траекторий трех потоков: активного пара из проточной части, обратных потоков из конденсатора и системы струй пароприёмных устройств. Данный процесс приводит к тому, что при малорасходном режиме в

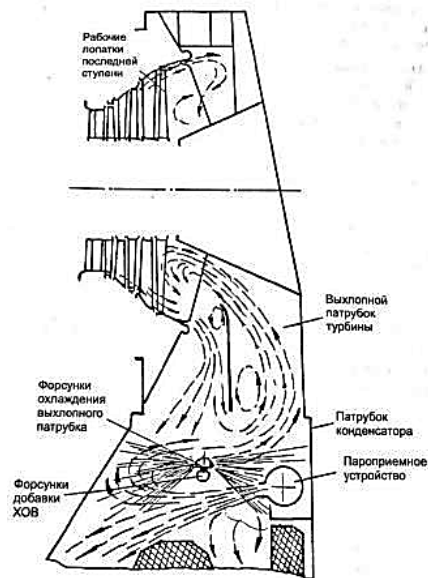


Рисунок 1 – Схема движения влажно-паровых потоков в выхлопной части ЦНД на режиме холостого хода

зону рабочих лопаток последних ступеней устремляются потоки пара, несущие с собой капельную влагу, в том числе влагу охлаждающих и подпиточных устройств [3].

Интенсивность обратных потоков довольно значительна, что приводит к отклонению части струй пароприёмного устройства конденсатора, их развороту и перемещению к задней стенке выхлопного патрубка турбины. Затем обратные потоки по кратчайшему пути поднимаются к рабочим лопаткам, где основная часть капель влаги дробится и отражается выходными кромками. После обратные потоки отбрасывает к периферии, где они смешиваются с активным паром и направляются по каналам выходного патрубка в конденсатор. Часть потока при этом уходит в конденсатор, а часть снова увлекается восходящим течением. Этот процесс значительно увеличивает каплеударную нагрузку на рабочие лопатки последних ступеней, что ускоряет их износ [3].

Также при малорасходных режимах расход пара в отборы турбины является причиной нарушения осевой симметрии течения пара. В окружной плоскости неравномерность давления пара ведет к возникновению неуравновешенных поперечных сил, способных привести к развитию низкочастотной вибрации ротора турбины, что опасно как возможной деформацией самого ротора, так и выходом из строя лопаток. Также может снизиться экономичность ступени [2]

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Костюк А.Г., Фролов В.В., Булкин А.Е., Трухний А.Д. Турбины тепловых и атомных электрических станций. М.: Издательство МЭИ, 2001. 488 с. ил.
2. Лосев С.М. Паровые турбины и конденсационные устройства. М.–Л.: Издательство «Энергия», 1964. 376 с. с черт.
3. Малорасходные режимы ЦНД турбины Т-250/300-240 / Под ред. Хаимова В.А. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 240 с. ил.

УДК 347.463

Сухотская Анастасия Юрьевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Sukhotskaya Anastasia Yurievna, student of Komsomolsk-na-Amure State University

Гулькина Ольга Владимировна, старший преподаватель кафедры «Кораблестроение и компьютерный инжиниринг»; Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Gunkova Olga Vladimirovna, Senior Lecturer of the Department of Shipbuilding and Computer Engineering; Komsomolsk-na-Amure State University

#### **ТРАНСПОРТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАУЧУКА И ОСОБЕННОСТИ ЕГО ТРАНСПОРТИРОВКИ**

#### **TRANSPORT CHARACTERISTICS OF RUBBER AND FEATURES OF ITS TRANSPORTATION**

Аннотация. В данной работе описаны транспортные характеристики каучука, особенности его перевозки и влияние внешней среды на свойства и качества каучука. Даны размеры, вес перевозимого груза и общий вид кипы каучука. Представлены этапы загрузки кип каучука в контейнер. Дана характеристика укрупненной грузовой единицы. Представлен контейнер с загруженными кипами.

Abstract. This paper describes the transport characteristics of rubber, the features of its transportation. The stages of loading bales of rubber into a container are presented. The characteristics of the enlarged cargo unit are given. A container with loaded bales is presented.

Ключевые слова: каучук, кипа, транспортная характеристика, контейнер, транспортировка.

Key words: rubber, bales, transport characteristics, container, transportation.

В современном мире практически любое производство связано с применением каучука. Его используют в медицинской, обувной, строительной областях, при производстве труб, шин и кабелей.

Каучук бывает натуральный и синтетический. Ведущими производителями натурального каучука являются Таиланд, Малайзия и Индонезия. В природном каучуке больше всего нуждается шинная промышленность, производящая зимние, летние шины и шины для специальной техники, автомобилей и велосипедов.

К наиболее важным свойствам каучука относятся: эластичность, вязкость, клейкость, растяжимость, водонепроницаемость. Каучук – горючий материал, но не способен к самовозгоранию.

Каучук реагирует на воздействия внешней среды, что приводит к изменению его структуры, вследствие чего он теряет свои свойства и качества. Каучук нельзя размещать рядом с другими грузами по этой же причине.

К воздействиям внешней среды относятся такие факторы, как: солнце, влажность, температура. При воздействии солнечного света каучук может окисляться, при этом становится липкий, может превратиться в неэластичную массу, потерять свои качества и на поверхности могут образоваться смолоподобные полосы и пятна.

При повышении температуры и влажности в транспортных средствах на поверхности каучука может появиться плесень. Если каучук намокнет, то плесень будет развиваться гораздо активнее. При взаимодействии с плесневелыми и мокрыми кипами может произойти порча остального груза.

При загрязнении каучука землей, песком, цементом запрещается его дальнейшее использование.

При неправильной подготовке каучука от действия температур и под давлением кипы могут склеиться между собой, что приведет к потере качества, товарного вида груза и потребует совершения специальных мероприятий при выгрузке груза.

Для транспортировки кипы каучука покрываются специальной эмульсией и маркируются следующим образом: указывается компания поставщика, сорт и масса нетто. Маркировка различных сортов груза наносится разноцветной краской для исключения смешения.

Нельзя загружать в транспортные средства кипы каучука поврежденные, грязные, мокрые и деформированные.

Свежий каучук дает усадку, что может позволить через сутки загрузить еще 1 – 2 яруса кип, это надо учитывать при загрузке транспортного средства.

Низшие сорта каучука менее эластичные, поэтому их укладывают сверху на более высокие сорта. Между разными сортами должны лежать листы фанеры. Рекомендуется в одном грузовом помещении или в одном транспортном средстве перевозить один сорт груза. Поверх каучука нельзя грузить никакой груз.

Запрещается проводить погрузочно-разгрузочные операции с каучуком во время осадков.

Нельзя разводить открытый огонь и курить вблизи каучука.

Из Таиланда каучук экспортируется кипами размерами 800 x 400 x 150 мм и массой 33 кг. Общий вид кипы представлен на рисунке 1. Потребительской упаковкой является пленка.



Рисунок 1 – Кипы каучука

Для удобства транспортировки и перегрузочных операций каучук перевозится в двадцатифутовом контейнере.

Далее, на рисунке 2 представлен контейнер с загруженными брикетами каучука.



Рисунок 2 – Загруженные брикеты каучука в контейнере

На рисунке 3 представлены этапы размещения каучука в брикетах в 20 футовый контейнер.

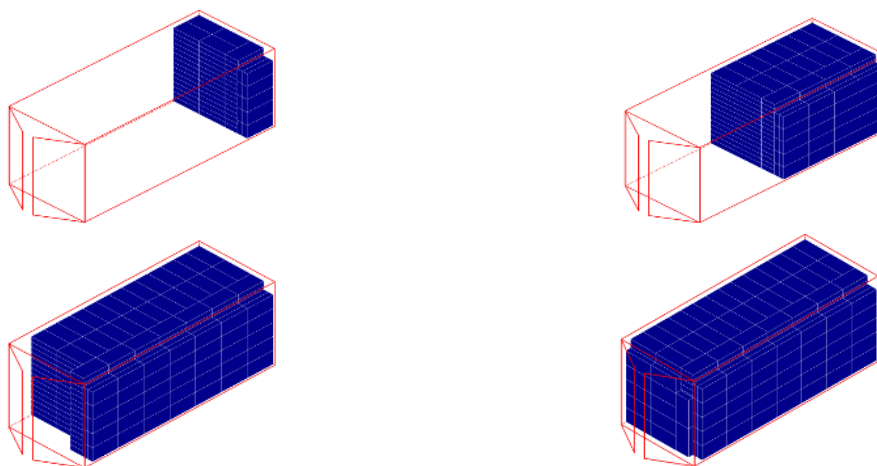


Рисунок 3 – Этапы размещения брикетов каучука в контейнере

Таблица 1 – Характеристика укрупненной грузовой единицы

Параметры	Значение
Количество брикетов в контейнере, шт	607
Масса груза в контейнере, т	20

При перевозке каучука в контейнерах предъявляются обычные правила перевозки груза в контейнерах.

Для полного использования вместимости контейнера при погрузке должна быть обеспечена плотная укладка кип. Торцевые и боковые стенки контейнера должны быть застелены плотной бумагой.

При выгрузке каучука из транспортных средств на склады должна соблюдаться пожарная безопасность, склады должны быть вентилируемые и иметь соответствующее освещение. Штабелирование каучука производится по партиям и сортам. Нельзя производить сварочные работы и работы с открытым огнем рядом со штабелем каучука. Разбитые и поврежденные кипы укладываются отдельно от штабелей с основным грузом.

Рассмотренные в данной работе вопросы, связанные с характеристиками каучука и особенностями его перевозки позволят выбрать наиболее эффективные способы транспортировки.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рябчинский А.И. Организация перевозочных услуг и безопасность транспортного процесса: учебник для вузов / А. И. Рябчинский, В. А. Гудков, Е. А. Краченко. – М.: Академия, 2013; 2011. – 255с. – (Высшее профессиональное образование).

2. Деружинский В.Е., Аблязов Э.К., Мальцева Н.Е. Технология перевозки и перегрузки каучука. // Вестник государственного морского университета имени Адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2021. – с 28-33.

УДК 347.463

Табakov Евгений Васильевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Tabakov Evgeny Vasilyevich, student of Komsomolsk-na-Amure State University

Гуныкова Ольга Владимировна, старший преподаватель кафедры «Кораблестроение и компьютерный инжиниринг»; Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Gunkova Olga Vladimirovna, Senior Lecturer of the Department of Shipbuilding and Computer Engineering; Komsomolsk-na-Amure State University

#### **ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЕРЕВОЗКИ ЗЕРНА ИЗ РОССИИ НА ЭКСПОРТ**

#### **ORGANIZATION AND TECHNICAL SUPPORT OF GRAIN TRANSPORTATION FROM RUSSIA FOR EXPORT**

Аннотация. В данной работе описывается организация и техническое обеспечение перевозки зерна из России в Турцию. Транспортировка зерна начинается со станции Ипатово Ставропольского края железнодорожным транспортом, далее в порту Новороссийск происходит перевалка зерна в морское судно и груз доставляется в турецкий порт Стамбул. В работе представлены маршруты перевозки, транспортные узлы и транспортные средства. Произведены расчеты продолжительности рейса и стоимости перевозки.

Abstract. This paper describes the organization and technical support of grain transportation from Russia to Turkey. Grain transportation begins from the Ipatovo station of the Stavropol Territory by rail, then grain is transshipped to a sea vessel in the port of Novorossiysk and the cargo is delivered to the Turkish port of Istanbul. The paper presents transportation routes, transport hubs and vehicles. Calculations of the duration of the flight and the cost of transportation were made.

Ключевые слова: зерно, транспортировка, вагон-зерновоз, сквозная тарифная ставка, продолжительность рейса.

Key words: grain, transportation, grain car, through tariff rate, duration of the flight.



Зерно – это продовольственный ценный груз, при транспортировке которого следует соблюдать его сохранность в качественном отношении и количественном.

Из зерновых грузов получают муку, крупу, корм для животных.

В данной работе рассматривается доставка зерна с железнодорожной станции Ипатово Ставропольского края до порта Новороссийск, далее морским путем в порт Стамбул (Турция).

В железнодорожный транспорт зерно загружается на Ипатовском комбинате хлебопродуктов, который представляет собой элеваторный современный комплекс, обладающий двумя точками приема автомобильного транспорта, развитой инфраструктурой железнодорожного транспорта, собственным маневровым локомотивом и линией очистки зерна. На складах комбината можно одновременно хранить 75 тысяч тонн зерна, производительность оборудования составляет 175 тонн-час. Железнодорожный комплекс комбината отгружает до 50 вагонов в сутки. После загрузки вагонов на Ипатовском комбинате хлебопродуктов железнодорожный состав формируется на станции Ипатово.

Железнодорожная станция Ипатово расположена в Ставропольском крае городе Ипатово, относится к Минераловодскому региону СевероКавказской железной дороги.

В ООО «Новороссийский зерновой терминал» производится перегрузка зерна с железнодорожного транспорта на морской. В инфраструктуру зернового терминала входит устройство для приема автомобильного транспорта на три единицы производительностью 1200 тонн в час, устройство для приема с железнодорожного транспорта (три пути по два вагона) производительностью 2400 тонн в час и элеватор вместимостью 126 тысяч тонн для накопления судовых партий.

Так же на терминале имеется система перегрузки зерна на морские суда производительностью 1600 тонн в час, зернопогрузочные машины Neuerо 157 NgTSL производительностью 800 тонн в час, способные перемещаться вдоль пирса.

Морские суда, перевозимые зерно с данного терминала, должны иметь длину не больше 256 метров, ширину – не более 40 метров и осадку 13,2 метра.

Перегрузка зерна производится на двадцать третьем и двадцать четвертом причалах Пристани № 3 Новороссийского порта.

Пунктом назначения является порт Стамбул – крупный транспортный узел Турции, находящийся на обоих берегах южной части пролива Босфор и связывающий азиатские и европейские дороги автомобильного транспорта и имеющий аэропорт.

Расстояние железнодорожного маршрута от станции Ипатово до станции Новороссийск составляет 536 км. Железнодорожный путь проходит по СевероКавказской железной дороге.

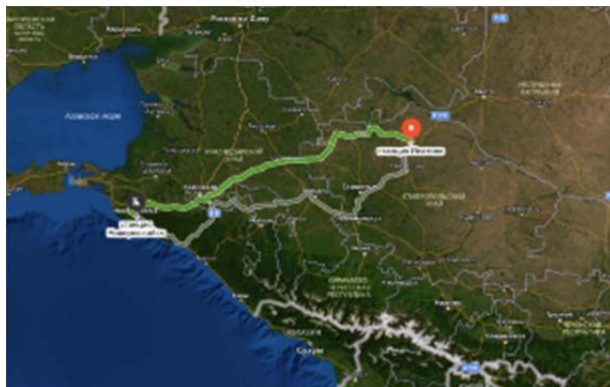


Рисунок 1 – Железнодорожный маршрут Ипатово – Новороссийск

Расстояние перевозки морским транспортом от порта Новороссийск до порта Стамбул составляет 467 миль. Морской путь проходит по Черному морю.

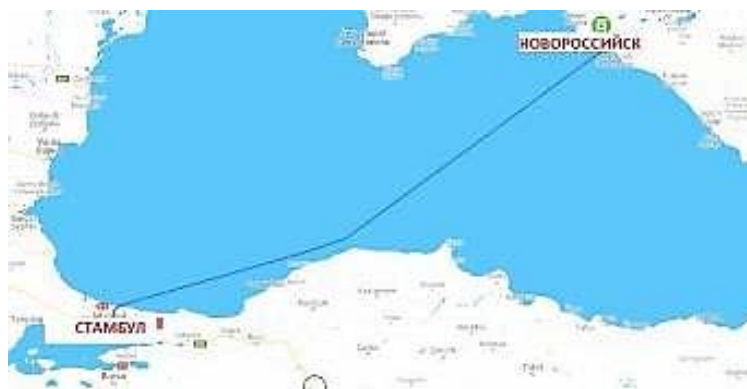


Рисунок 2 – Морской маршрут Новороссийск – Стамбул

Перевозка зерна по железной дороге осуществляется в вагонах-зерновозах, предназначенных для транспортировки зерна с гравитационной системой выгрузки-загрузки в межрельсовое пространство. Данные вагоны защищают груз от влияния внешней среды и атмосферных осадков.

В данной работе для перевозки груза железнодорожным транспортом принят 4-осный вагон для зерна модели 11-739.

Транспортировка зерна морским транспортом производится судном «MATRIX».

Судно «MATRIX» (ИМО: 9454125) – балкер, 2007 года, ходит под флагом государства Италия. Судно имеет следующие характеристики: длину 113 м, ширину 17 м, валовый тоннаж 5087 тонн, осадку 6,9 м, дедвейт 7300 т.

В результате расчетов продолжительность рейса на железнодорожном транспорте от станции Ипатово до порта Новороссийск составила 3 суток, продолжительность рейса на морском транспорте от порта Новороссийск до порта Стамбул – 5,35 суток. Общее время доставки зерна от станции Ипатово до порта Стамбул составляет 8,35 суток.

В работе был проведен расчет сквозной тарифной ставки, определяемый путем суммирования себестоимости доставки груза на различных видах транспорта и тарифа за производство погрузочно-разгрузочных работ в порту.

$$f_{смс} = \sum f_{неpi} + \sum f_{нрpi},$$

где  $\sum f_{неpi}$  - тариф на перевозку одной тонны груза  $i$ -ом транспорте, р/т;

$\sum f_{нрpi}$  - тариф на погрузо-разгрузочные работы в порту, р/т.

На маршруте Ипатово – Новороссийск – Стамбул сквозная тарифная ставка будет складываться из:

– тариф на перевозку одной тонны груза железнодорожным транспортом от станции Ипатово до Новороссийска (тариф на перевозку одного вагона – 57259 рублей, так как масса зерна в вагоне составляет 65 тонн, себестоимость перевозки одной тонны зерна будет равна 880 руб.);

– тариф на погрузочно-разгрузочные работы в порту Новороссийск (1300 рублей за 1 т груза);

– себестоимость перевозки одной тонны груза на морском транспорте от порта Новороссийск до порта Стамбул (440 рублей за 1 т груза).

Тариф за производство погрузочно-разгрузочных работ в порту составляет 1300 рублей за 1 т груза.

$$f_{смс} = 880 + 1300 + 440 = 2620 \text{ руб.}$$

Сквозная тарифная ставка перевозки зерна от станции Ипатово до порта Стамбул составляет 2620 рублей.

Структура сквозной тарифной ставки представлена на рисунке 3.

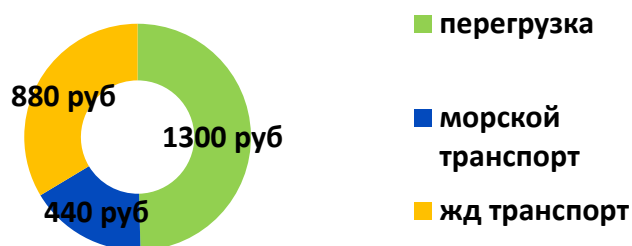


Рисунок 3 – Структура сквозной тарифной ставки

Результатом определения оптимальной схемы перевозки зерна явилось определение двух показателей: продолжительность рейса от станции Ипатово до порта Стамбул, которая составила 8,35 суток, и сквозная тарифная ставка, составившая 2620 рублей.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Митько О.А. Логистические технологии перевозки и экспорта Российского зерна: тенденции и перспективы // Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ) № 4 (52). 2015. – С 33-40.

2. Головин В.В. Перспективы развития железнодорожных перевозок зерна // Наука и образование транспорту. 2011. С. 38-39.

УДК 621.822.574

Хвостиков Александр Станиславович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Khvostikov Flexandr Stanislavovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the department "Thermal power plants", Komsomolsk-na-Amure State University

Лынная Анастасия Александровна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Lynnik Anastasia Alexandrovna, student of Komsomolsk-na-Amure State University

#### **УРАВНЕНИЕ РЕЙНОЛЬДСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА В СМАЗОЧНОМ СЛОЕ ЧАСТИЧНО-ПОРИСТОГО КОНИЧЕСКОГО ГАЗОСТАТИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА**

#### **THE REYNOLDS EQUATION FOR DETERMINING THE GAS PRESSURE IN THE LUBRICATING LAYER OF A PARTIALLY POROUS CONICAL GAS-STATIC BEARING**

Аннотация. Совершенствование роторных систем возможно с помощью увеличения частоты вращения ротора. Применение газостатических подшипников, нашедшее применение во многих отраслях техники, позволяет значительно повысить частоту вращения из-за низких потерь на трение. В работе выведено дифференциальное уравнение, которое позволяет вычислить распределение давления в зазоре частично-пористого газостатического подшипника и получить эксплуатационные характеристики опоры.

Abstract. The improvement of rotary systems is possible by increasing the rotor speed. The use of gas-static bearings, which have found application in many branches of technology, can significantly increase the rotational speed due to low friction losses. In this paper, a differential equation is derived that allows us to calculate the distribution of the pressure field in the

gas-static gap of a partially porous gas-static bearing and obtain the operational characteristics of the bearing.

Ключевые слова: уравнение Рейнольдса, газостатический частично пористый подшипник, эксплуатационные характеристики, поле давления

Key words: Reynolds equation, gas-static partially porous bearing, performance characteristics, pressure field

### Введение

Совершенство роторных систем, применяемых во многих отраслях техники (машиностроении, энергетике, текстильной промышленности и др.), зависит от частоты вращения. При увеличении частоты вращения снижаются массогабаритные характеристики системы при сохранении мощности и производительности. Требование производителей техники к повышению частоты вращения заставляют переходить к бесконтактным подшипникам. Газостатические подшипники не имеют ограничения по частоте вращения из-за низкой вязкости и, как следствие, низкого коэффициента трения. Частично пористые газостатические подшипники имеют более высокую нагружающую способность при низком расходе воздуха. Конические подшипники, способные воспринимать как радиальную, так и осевую нагрузку имеют более простую конструкцию. Для расчета эксплуатационных характеристик подшипника необходимо составить дифференциальное уравнение Рейнольдса.

### Основная часть

Для определения поля давления в зазоре частично пористого конического подшипника с внешним наддувом газа (рисунок 1) воспользуемся:

$$\text{уравнением политропы } \frac{p}{\rho^n} = \text{const};$$

$$\text{уравнением неразрывности } \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div}(\rho V) = 0$$

$$\text{уравнением движения } \rho \frac{dV}{d\tau} = \rho \bar{f} - \text{grad } p + 2\text{div}(\mu E) - \frac{2}{3} \text{grad}(\mu \text{div} V);$$

$$\text{уравнением энергии } \rho \frac{d}{d\tau}(c_p T) = \frac{\partial Q}{\partial \tau} + \frac{dp}{d\tau} + \text{div}(\chi_t \text{grad } T) + \Phi$$

где  $\tau$  - время,  $V$  - скорость газа,  $\bar{f}$  - внешняя сила, отнесенная к единице массы газа,  $E$  - тензор скоростей деформации,  $c_p$  - удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $Q$  - внутренняя теплота,  $\chi_t$  - коэффициент теплопроводности,  $\Phi$  - диссипативная функция [1].

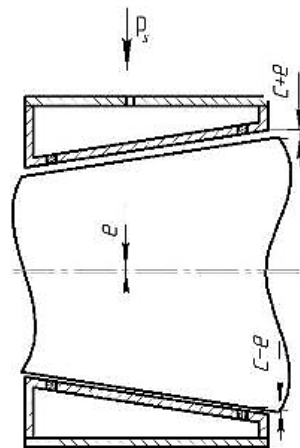


Рисунок 1 – Газостатический конический подшипник с пористыми вставками

Совместное решение уравнений с учетом допущений, рассмотренных в [1], с развернутой поверхностью подшипника примет вид

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{dp^2}{dx} \right) + \frac{d}{dz} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{dp^2}{z} \right) = 24pV_{2y}f + 12V \frac{d(ph)}{dx}.$$

В соответствии с законом Дарси поток может считаться вязким и ламинарным. Коэффициент проницаемости обозначим  $k_p$ . Из вышесказанного компонента скорости в направлении, перпендикулярном к зазору, в пористой среде может быть определена по формуле:

$$V_{2y} = \frac{k_p (p_s^2 - p^2)}{2\mu\delta p}$$

Подставив выражение в исходное дифференциальное уравнение, получим

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{dp^2}{dx} \right) + \frac{d}{dz} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{dp^2}{dz} \right) = \frac{12k_p (p_s^2 - p^2)}{\mu\delta} + 12 \frac{d(ph)}{dx}$$

Область интегрирования удобно представить в полярных координатах. В качестве координат примем угол подшипника  $\varphi = \frac{x}{R(z)}$ , пропорциональный углу развертки, и длину подшипника (рисунок 2).

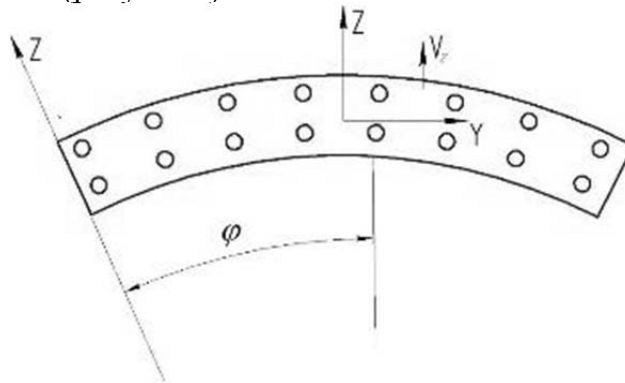


Рисунок 2 – Декартова и полярная система координат

Введем следующие относительные параметры газа и координаты:

1. Относительная длина подшипника  $\bar{z} = \frac{z}{L}$ . В отличие от цилиндрического подшипника конический не симметричен по своей длине.
2. Относительное давление газа в зазоре подшипника  $\bar{p} = \frac{p}{p_s}$ .
3. Угловая координата  $\varphi = \frac{x}{R_2(z)} = \frac{x}{r_2 + z \sin \alpha} = \frac{x}{r_2 + z \frac{(r_2 - r_1)}{L}}$
4. Относительный зазор между валом и вкладышем  $\bar{h} = \frac{h}{c} = 1 - e \cos \varphi$

В безразмерных координатах область интегрирования задается неравенствами  $0 \leq \bar{z} \leq 1$  и  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ .

$$\begin{aligned} & \frac{d}{d\left(\varphi \left( r_2 + z \frac{(r_2 - r_1)}{L} \right)\right)} \left( \frac{\bar{h}^3 c^3}{\mu} \frac{d(\bar{p}^2 p_s^2)}{d\left(\varphi \left( r_2 + z \frac{(r_2 - r_1)}{L} \right)\right)} \right) + \frac{d}{d(\bar{z} \cdot L_2)} \left( \frac{\bar{h}^3 c^3}{\mu} \frac{d(\bar{p}^2 p_s^2)}{d(\bar{z} \cdot L_2)} \right) = \\ & = \frac{12fk_p (p_s^2 - \bar{p}^2 p_s^2)}{\mu\delta} + 12V \frac{d(\bar{p} \cdot p_s \cdot \bar{h} \cdot c)}{d\left(\varphi \left( r_2 + z \frac{(r_2 - r_1)}{L} \right)\right)} \end{aligned}$$

Удобнее значение угловой координаты представить в виде  $\varphi = \frac{x}{zk}$ , где  $k$  для

усеченного конуса  $k = \sqrt{1 + \left(\frac{L}{r_2 - r_1}\right)^2}$ . Тогда область интегрирования задается неравен-

ствами  $R_1 \leq \bar{z} \leq R_2$  и  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ , где  $R_1 = k \cdot r_1$ ,  $R_2 = k \cdot r_2$ . Представленное выше уравнение после преобразований примет вид

$$\frac{1}{R_{cp}} \frac{d}{d(\varphi)} \left( \frac{c^3 p_s^2}{\mu R_{cp}} \bar{h}^3 \frac{d\bar{p}^2}{d(\varphi)} \right) + \frac{4c^3 p_s^2}{L_2^2 \mu} \frac{d}{d(\bar{z})} \left( \bar{h}^3 \frac{d(\bar{p}^2)}{d(\bar{z})} \right) = \frac{12k_p p_s^2}{\mu \delta} f(1 - \bar{p}^2) + \frac{12V p_s \cdot c}{R_{cp}} \frac{d(\bar{p} \cdot \bar{h})}{d(\varphi)}$$

### **Заключение**

Выведенное дифференциальное уравнение позволяет вычислить распределение давления в зазоре частично-пористого газостатического подшипника, которое, в свою очередь, позволяет получить эксплуатационные характеристики подшипника. Методика расчета эксплуатационных характеристик аналогична цилиндрическим подшипникам и описана в [1].

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки Хабаровского края.

### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Бесконтактные опоры высокоскоростных роторных систем. Эксплуатация и проектирование: монография / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, А. В. Смирнов, А. С. Хвостиков. - Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. - 372 с.

УДК 621.311

Шаломов Вячеслав Иванович, кандидат технических наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Shalomov Vyacheslav Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

Макаров Вячеслав Владимирович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Makarov Vyacheslav Vladimirovich, student of Komsomolsk-na-Amure State University

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЕЖЕГО ПАРА НА МОЩНОСТЬ И ЭКОНОМИЧНОСТЬ ЭНЕРГООБЛОКА ТЭС НА СВЕРХКРИТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ НА БАЗЕ ТУРБИНЫ К-300-240**

### **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF INCREASING THE PARAMETERS OF FRESH STEAM ON THE POWER AND EFFICIENCY OF THE TPP POWER UNIT ON THE OVER-CRITICAL PRESSURE BASED ON THE K-300-240 TURBINE**

Аннотация. В работе представлены некоторые результаты расчётного исследования влияния повышения начальных параметров пара на мощность и тепловую экономичность паротурбинной установки сверхкритического давления при переходе на суперкритические параметры пара.

Abstract: The paper presents some results of a computational study of the effect of increasing the initial steam parameters on the power and thermal efficiency of a supercritical pressure steam turbine installation when switching to supercritical steam parameters.

Ключевые слова: расчётные исследования, сверхкритические начальные параметры пара, паровая турбина, электрическая мощность, тепловая экономичность.

Key words: computational studies, supercritical initial parameters of steam, steam turbine, electric power, thermal efficiency.

Как известно, все энергоблоки с турбинами семейства «К-300» работают на традиционных сверхкритических параметрах пара  $p_0 = 23,5$  МПа и  $t_0/t_{\text{нп}} = 540/540$  °С. Однако, первые турбины К-300-240 были созданы с начальными параметрами пара и пара промперегрева: на Ленинградском металлическом заводе (ЛМЗ) -  $p_0 = 23,5$  МПа и  $t_0/t_{\text{нп}} = 560/565$  °С; на Харьковском турбогенераторном заводе (ХТГЗ) -  $p_0 = 23,5$  МПа и  $t_0/t_{\text{нп}} = 565/565$  °С [1]. Поэтому, по мнению многих специалистов, повышение начальных параметров и параметров промперегрева пара турбоустановок (ТУ) нужно начинать с восстановления проектных параметров.

Для расчётных исследований в качестве базовой выбрана паровая турбина на сверхкритические параметры свежего пара К-300-240 ХТГЗ (ныне – «Турбоатом»).

Паровая турбина К-300-240 ХТГЗ представляет собой одновальный трёхцилиндровый агрегат: цилиндр высокого давления (ЦВД), в одном корпусе цилиндр среднего давления и часть цилиндра низкого давления (ЦСНД), цилиндр низкого давления (ЦНД) с промежуточным перегревом пара после ЦВД. Номинальная мощность – 300 МВт, номинальный расход свежего пара 960 т/ч. Параметры пара перед стопорным клапаном ЦВД:  $p_0 = 23,5$  МПа,  $t_0 = 540$  °С. Температура промежуточного перегрева пара  $t_{\text{нп}} = 540$  °С (далее 23,5, 540/540). Структурная формула регенеративной системы: 3 подогревателя высокого давления (ПВД) + деаэратор (Д) + 5 подогревателей низкого давления (ПНД). Давление в деаэраторе 0,69 МПа. Температура питательной воды 268 °С. Температура охлаждающей воды 12 °С. Расчётная принципиальная тепловая схема несколько отличается от исходной, в частности: деаэратор подключён к отдельному отбору турбины для обеспечения скользящего режима работы, испаритель из тепловой схемы исключён.

Для того чтобы увидеть, как изменяются технико-экономические показатели ТУ при переходе с традиционных на проектные начальные параметры, по методу тепловых и материальных балансов выполнены расчёты тепловой схемы ТУ на сопоставляемых вариантах параметров пара. Итоги расчёта сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Сравнительные данные технико-экономических-показателей ТУ и энергоблока

Технико-экономические показатели	Параметры пара $p_0$ , МПа; $t_0/t_{\text{нп}}$ , °С	
	23,5; 540/540	23,5; 565/565
Мощность ТУ $N_{\Sigma}$ , МВт	300	330
Электрический КПД ТУ $\eta_{\text{ТУЭ}}$	0,446	0,467
Удельный расход теплоты $q_{\text{ТУЭ}}$ , кДж/(кВт·ч)	8074	7712
КПД блока $\eta_{\text{э}}$	0,402	0,421
Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии $b_{\Sigma}$ , г/(кВт·ч)	306	292

Сопоставление расчётных данных в таблице 1 показывает, что при возвращении к проектным параметрам свежего пара и пара промперегрева мощность ТУ увеличивается на 30 МВт и электрический КПД ТУ повышается на 2,1 %.

Двадцать седьмого июня 2022 г. на ТЭЦ-22 Мосэнерго запущен энергоблок № 9 с мощнейшей в мире теплофикационной турбиной Т-295/335-23,5 на сверхкритические параметры Уральского турбинного завода. Новые турбины пришли на замену турбин Т-250/300-240, имеющих традиционные сверхкритические параметры пара (СКП). Параметры ТУ на ТЭЦ-22:  $p_0 = 23,5$  МПа и  $t_0/t_{\text{нп}} = 565/565$  °С. КПД турбоустановки в конденсационном режиме вырос до 40 %.



Целью данного расчётного исследования является определение мощности и тепловой экономичности ТУ и энергоблока ТЭС при переходе с уровня параметров  $p_0 = 23,5$  МПа и  $t_0/t_{\text{нп}} = 560/560$  °С на суперкритические начальные параметры пара  $p_0 = 29,4$  МПа,  $t_0/t_{\text{нп}} = 600/600$  °С [2].

Для выполнения поставленной в работе задачи принимаем следующие условия исследования. Для исходного варианта выбираем параметры пара  $p_0 = 23,5$  МПа и  $t_0/t_{\text{нп}} = 560/560$  °С. Расход пара в турбину принимаем  $D_0 = 260$  кг/с = const при всех вариантах исследования. Давление в конденсаторе  $p_k = 3,57$  кПа = const. Значения внутреннего относительного КПД цилиндров приняты постоянными: ЦВД – 87 %, ЦСД – 91 %, ЦНД – 83 %. Сопряжённые параметры пара, принимаемые для расчётного исследования, сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Параметры пара

Название параметров	Значения параметров пара и питательной воды						
	23,5	24,5	25,5	26,5	27,4	28,4	29,4
Начальное давление пара $p_0$ , МПа	23,5	24,5	25,5	26,5	27,4	28,4	29,4
Температура пара $t_0/t_{\text{нп}}$ , °С	560/560	567/567	573/573	580/580	587/587	593/593	600/600
Варианты параметров	1	2	3	4	5	6	7

Для детального анализа результаты расчётного исследования представлены в графической форме. График изменения электрической мощности энергоблока изображён на рисунке 1.

Итоги расчёта показывают, что при достижении суперкритических параметров пара –  $p_0 = 29,4$  МПа ( $300$  кгс/см<sup>2</sup>),  $t_0 = 600$  °С, электрическая мощность энергоблока может быть примерно равной  $345$  МВт, что на  $45$  МВт превышает мощность базового энергоблока с параметрами  $p_0 = 23,5$  МПа ( $240$  кгс/см<sup>2</sup>),  $t_0 = 560$  °С. Переход с одного уровня параметров на другой обеспечивает увеличение мощности энергоблока в среднем на  $7,5$  МВт.

При принятом постоянном расходе пара на турбоустановку рост мощности определяется повышением внутреннего теплоперепада в отсеках турбины.

График изменения электрического КПД ТУ показан на рисунке 2.

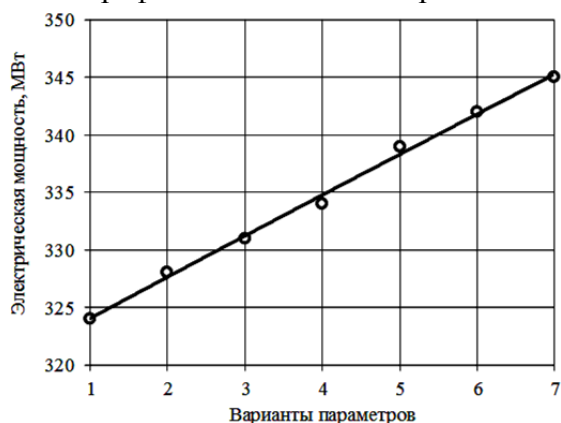


Рисунок 1 – График изменения мощности энергоблока

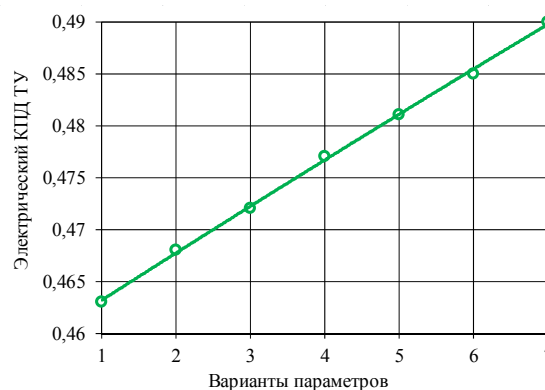


Рисунок 2 – График изменения электрического КПД турбоустановки

На уровне заявленных суперкритических параметров свежего пара электрический КПД ТУ достигает  $0,49$  (49%).

С повышением уровня начальных параметров пара мощность увеличивается, поэтому и растёт КПД ТУ. Увеличение КПД в абсолютном выражении составляет  $3$  %.

График на рисунке 2 показывает, что при переходе на следующий уровень сопряжённых начальных параметров пара КПД ТУ повышается в среднем на 0,45 %.

КПД энергоблока выходит на значение 44,2 %. Его повышение по сравнению с исходным вариантом (41,7 %) составляет 2,5 %.

Наряду с КПД экономичность ТУ характеризуется также удельным расходом теплоты на выработку электроэнергии  $q_{\text{ТУЭ}}$ , кДж/(кВт·ч). При суперкритических параметрах свежего пара  $q_{\text{ТУЭ}} = 7350$  кДж/(кг·К), против 7778 кДж/(кг·К) на параметрах исходного уровня. Уменьшение показателя происходит на 5,5%.

Повышение КПД ТУ, связанное с переходом на суперкритические параметры свежего пара, способствует снижению удельного расхода условного топлива, что наглядно изображено на рисунке 3.

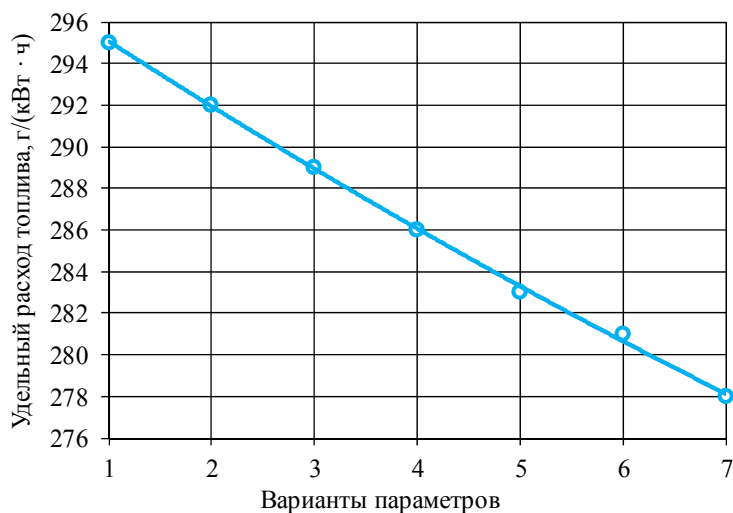


Рисунок 3 – График изменения удельного расхода условного топлива энергоблока

Удельный расход условного топлива уменьшается с 295 г/(кВт·ч) при исходном варианте до 278 г/(кВт·ч) при варианте с суперкритическими параметрами пара или на относительных 5,8 %.

Обратим также внимание на то, что степень сухости пара на выходе турбины  $x_k$  имеет практически постоянное значение, с разницей в значениях 0,2 %. Это говорит о достаточной точности выбора сопряжённых параметров пара при повышении их уровня. Влажность пара составляет примерно 8 %.

Вывод. Таким образом, переход на суперкритические параметры свежего пара на примере ТУ К-300-240 позволяет получить мощность энергоблока 345 МВт, электрический КПД ТУ 49 %, КПД энергоблока 44,2 % при снижении удельного расхода условного топлива на относительные 5,8 %.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кириллов И.И. Паровые турбины и паротурбинные установки / И.И. Кириллов, В.А. Иванов, А.И. Кириллов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отделение, 1978, - 276 с.

2. Разработка технических решений по созданию турбоустановки для блока суперкритических параметров пара / Г.Д. Авруцкий, И.А. Савенкова, М.В. Лазарев, В.В. Акуленко, А.Л.Шварц, С.А. Иванов. – Электрические станции № 10, 2005, С. 36 – 40.

Шевченко Денис Владимирович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Shevchenko Denis Vladimirovich, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Каменских Ираида Витальевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Кораблестроение и компьютерный инжиниринг», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Kamenskikh Iraida Vitalievna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department «Shipbuilding and Computer Engineering», Komsomolsk-na-Amure State University

## **ДОСТАВКА МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ ПРЕДПРИЯТИЯ КОМСОМОЛЬСКА-НА-АМУРЕ В МАГАДАН**

### **DELIVERY OF METAL PRODUCTS OF THE KOMSOMOLSK-ON-AMURENTERPRISE TO MAGADAN**

Аннотация. В статье обозначены проблемы с доставкой грузов для районов Дальнего Востока и Крайнего Севера из центральных районов страны. Проводится анализ стоимости перевозки металлопродукции в порт Магадан из Комсомольска-на-Амуре. Отмечены пути снижения стоимости на морском участке маршрута. Рассмотрена круглогодичная доставка груза и два морских маршрута.

Abstract. The article identifies problems with the delivery of goods for the regions of the Far East and the Far North from the central regions of the country. The analysis of the cost of transportation of metal products to the port of Magadan from Komsomolsk-on-Amur is carried out. The ways of reducing the cost on the sea section of the route are marked. The year-round cargo delivery and two sea routes are considered.

Ключевые слова: обеспечение грузами северных районов, металлопродукция, доставка, морской транспорт.

Key words: provision of cargo to the northern regions, metal products, delivery, sea transport.

Выполнение плана по северному завозу – основная задача для транспортников в период летней навигации. Большинство товаров народного потребления, строительных материалов, твердое и жидкое топливо и другие ресурсы завозятся в северные районы Дальнего Востока по морю. Доставка грузов для районов Дальнего Востока и Крайнего Севера из центральных районов страны железной дорогой возможна только до морских портов Приморья и Хабаровского края. Далее грузы морем доставляются в порты назначения. Круглогодичная перевозка грузов возможна авиационным транспортом. Но отсутствие современной инфраструктуры, высокие тарифы, ограничения по номенклатуре и объемам грузов, зависимость от погодных условий не способствуют развитию данного вида перевозок. Автомобильные перевозки более востребованы, но и у них имеются недостатки. Высокая стоимость топлива влияет на размер тарифов, также перевозки существенно зависят от сезона. Имеющиеся дороги в северных районах далеки по качеству от требуемого уровня, также сложная ситуация с переправами, которые периодически размываются бурными и полноводными сезонными реками. В результате, проблемы с доставкой грузов в удаленные населенные пункты северных районов не теряют своей актуальности. В работе [1] проводился анализ маршрутов доставки грузов по программе северного завоза для населенных пунктов Дальневосточного региона. В результате определены основные трудности при доставке грузов: низкий уровень развития транспортной инфраструктуры, сложные климатические условия, изношенность

транспортных средств большой грузоподъемности (речные и морские суда), высокие тарифы на перевозку.

Металлопродукцию для нужд Магадана доставляют от производителей из разных регионов России. В выпускной квалификационной работе (ВКР) Д.В. Шевченко рассматривается доставка из Комсомольска-на-Амуре. Единственный на Дальнем Востоке металлургический завод, производящий сталь с использованием электросталеплавильной технологии с дальнейшим переделом в сортовой и листовой прокат, является завод «Амурсталь» (ООО «Амурсталь»). Предприятие производит сталь, востребованную в производстве строительных конструкций: для армирования железобетонных конструкций, прокат угловой, круглый, катанку, проволоку, сортовую заготовку. Цель ВКР: проанализировать стоимость доставки металлопродукции и оценить возможные пути снижения затрат на транспортировку.

В ВКР рассмотрен маршрут, состоящий из двух основных участков: железнодорожного и морского. Основной железнодорожный участок Комсомольск-на-Амуре – Советская Гавань является одним из наиболее востребованных железнодорожных направлений. На заводе «Амурсталь» в г. Комсомольск-на-Амуре на узловой станции формируется состав из полувагонов с грузом и направляется в порт Ванино. Расстояние между начальной и конечной станцией составляет 467 км. ОАО «Ванинский морской торговый порт» – транспортный узел, связывающий автомобильный, железнодорожный, морской пути. Через Ванино поставляются грузы в северо-восточные регионы России и страны Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР). Ванинский морской торговый порт – один из северных портов России с круглогодичной навигацией. Самый удобный узел для транспортировки каботажных грузов для населенных пунктов дальневосточного побережья. Ориентация порта на угольный груз для стран АТР не снижает актуальности переработки российских грузов. Удобное расположение порта на западном побережье Татарского пролива, имеющееся оборудование и технические характеристики причалов позволяют обслуживать суда с осадкой до 18,5 м, длиной до 292 м, шириной до 45 м. Из Ванино по морскому участку маршрута металлопродукция доставляется до порта Магадан. Магаданский морской порт является крупнейшим на северо-востоке России. Морской порт принимает суда под обработку длиной до 200 м и осадкой до 11 м.

Основная задача при формировании маршрута доставки груза – сокращение затрат на транспортировку. Анализируя этапы транспортного процесса на маршруте Комсомольск-на-Амуре–Магадан, можно выделить составляющие цены, которые могут быть рассмотрены как постоянные величины в стоимости доставки. Это стоимость работы с грузом у грузоотправителя, работы в портах отправления и прибытия груза, агентские и складские услуги, стоимость услуг и тарифы на железнодорожную перевозку. В результате анализа только составляющие стоимости доставки по морскому участку могут быть рассмотрены как возможные для корректировки. Рассматривая круглогодичную доставку груза, можно предложить два морских маршрута. В качестве варианта снижения затрат в ВКР предложен вариант маршрута в летний период навигации через пролив Невельского (пролив скован льдом с января по март). При данных условиях расчетное расстояние принято 780 миль. В рейс могут быть привлечены суда с осадкой менее 7 м. Второй маршрут – в обход острова Сахалин, через пролив Лаперуза, расчетное расстояние – 1330 миль. Это основной маршрут доставки грузов до Магадана по морю во все сезоны. В ВКР были проведены расчеты по данным вариантам маршрута при выходе в рейс судна с требуемыми главными размерениями. При анализе стоимости перевозки на морском участке маршрута необходимо учесть довольно большое количество статей расходов, распределение статей затрат по маршрутам представлено на рисунке 1. Расходы на содержание экипажа за рейс, расходы на амортизацию, расходы на судовые сборы и услуги, расходы на страхование, расходы на менеджмент и управление. Учтены величины портовых сборов, которые взимаются в портах Ванино и

Магадан. В затраты входят прочие прямые расходы (расходы по осмотру судов Регистром и другие) и косвенные расходы. В составе косвенных расходов выделяют расходы по содержанию управления компанией (заработная плата административно-управленческого аппарата компании, расходы на содержание и текущий ремонт офиса, амортизационные отчисления по административным зданиям, содержание автотранспорта и др.). По летнему маршруту снижение стоимости перевозки составит до 28% по сравнению с основным маршрутом на морском участке. Анализ величины затрат за рейс указывает на две основные группы составляющих: оплата работы экипажа судна (оплата труда и отпускных, начисления на оплату труда) и затраты на топливо и масло (мазут, дизельное топливо и смазочные материалы). В качестве дополнительных мер по снижению стоимости перевозки можно указать следующие. Для первой группы составляющих затрат снижение может быть получено за счет привлечения в рейс современного судна с высоким уровнем автоматизации (на судне может быть задействован меньший по численности экипаж); для второй группы, связанной с рыночной стоимостью топлива, сокращение возможно за счет снижения в рейсе расхода топлива энергетической установкой. Для судов с большим сроком эксплуатации (более 25 лет и более) существенной экономии топлива достичь невозможно, следовательно, уменьшение расхода топлива можно получить за счет снижения скорости хода судна, а это повлечет нарушение сроков доставки грузов. Наилучшим решением проблемы станет эксплуатация современных судов с более эффективными энергетическими установками. Также снижение стоимости доставки тонны груза достигается за счет отправки в рейс судна с максимальной грузоподъемностью при обеспечении существующих требований к главным размерениям судов, заходящих в указанные порты, но здесь пароходства ограничены в выборе имеющимися в эксплуатации судами.

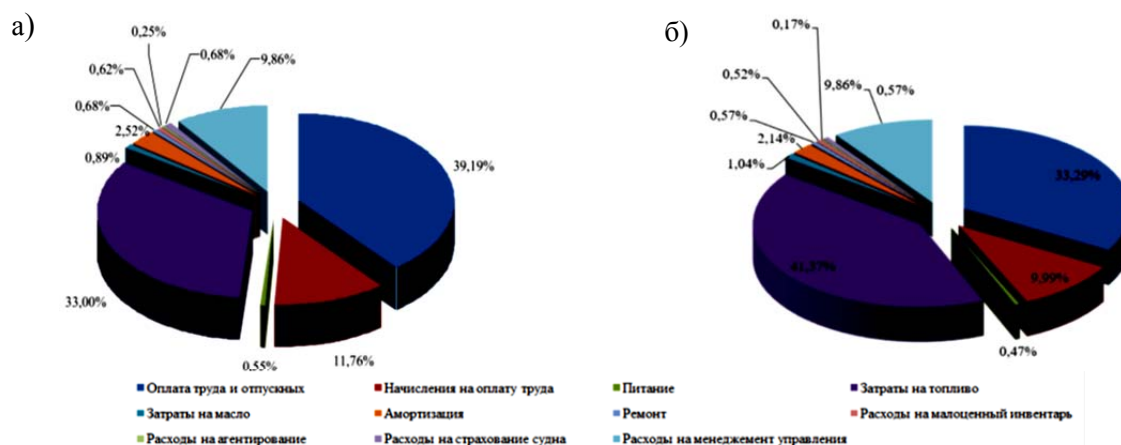


Рисунок 1 - Затраты на содержание судна:

а) по первому (летнему) маршруту; б) по второму маршруту

Обновление судов, задействованных на каботажных перевозках, в ближайшее время пароходствами не планируется, поэтому перевозки в удаленные Дальневосточные регионы будут дорогостоящими еще долгое время.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Петренко П. В., Каменских И. В. Технология доставки нефтепродуктов / П. В. Петренко, И. В. Каменских // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 г.: в 4 ч. / редкол. Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – Ч. 1. — С. 301-302.

Щекочихина Диана Валерьевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Shchekochikhina Diana Valerievna, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Каменских Ираида Витальевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Кораблестроение и компьютерный инжиниринг», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Kamenskikh Iraida Vitalievna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department «Shipbuilding and Computer Engineering», Komsomolsk-na-Amure State University

## **ИНСТРУМЕНТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРОДСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ**

### **URBAN TRANSPORT SYSTEM MODELING TOOLS**

Аннотация. В статье приведены уровни детализации транспортных моделей. Дан краткий обзор основных систем имитационного моделирования, используемых в транспортной сфере, позволяющих спроектировать и оптимизировать транспортные процессы различной сложности. Указаны преимущества моделирования в системе AnyLogic.

Abstract. The article presents the levels of detail of transport models. A brief overview of the main simulation systems used in the transport sector, allowing to design and optimize transport processes of varying complexity, is given. The advantages of modeling in the AnyLogic system are indicated.

Ключевые слова: имитационное моделирование, системы моделирования, городская транспортная система

Key words: simulation modeling, simulation systems, urban transport system

Проектирование и прогнозирование транспортной инфраструктуры с учетом всех особенностей ее использования и развития в долгосрочной перспективе остается важной задачей при создании новых районов городских агломераций или реконструкции старых городских территорий. В зависимости от детализации выделяют четыре уровня транспортной модели (таблица 1). Каждый из уровней предполагает определенные методы исследования и системы моделирования, реализующие данные методы.

В настоящее время выделено три основных метода имитационного моделирования: системная динамика; дискретно-событийное моделирование; агентное моделирование. Каждый из методов имеет свои особенности, преимущества и ограничения в описании и процедуре анализа модели транспортного процесса [1].

Для анализа городской транспортной системы часто упоминаются в различных учебных и научных изданиях [2, 3, 4] такие системы моделирования как AnyLogic (Россия), PTV Vision VISSIM (Германия), Arena (США), GPSS World (США).

AnyLogic от российской компании The AnyLogic Company (ранее «Экс Джей Текнолоджис» (XJ Technologies)) – система моделирования позволяет создать модели для всех трех методов имитационного моделирования. Программный продукт AnyLogic предназначен для создания имитационных моделей различных потоковых процессов. Он позволяет спроектировать и оптимизировать бизнес-процессы различной сложности. В системе для имитационного моделирования дорожного движения используются стандартные компоненты, элементы разметки пространства, ГИС-карты, анимация и визуализация. В трехмерном пространстве среды есть возможность отобразить взаимодействие потоков транспорта и пешеходов.

Таблица 1 – Уровни транспортных моделей

Исходная информация	Результат моделирования
<b>Макромодель (стратегический уровень)</b>	
Например, движение транспортных средств представляется как одномерный поток сжимаемой жидкости (плотность потока автомобилей, средняя скорость движения, пропускная способность дорожного участка) – гидродинамическая модель.	Функциональные зависимости между отдельными показателями транспортного потока (например, зависимость между скоростью и дистанцией между автомобилями в потоке).
<b>Мезомодель (тактический уровень)</b>	
Детализация автотранспорта как в микромоделях, а движение и взаимодействие между ними как описывается в макромоделях.	Характеристики транспортного потока (скорость, плотность, задержки). Характеристики пассажиропотока. Режимы светофорного регулирования.
<b>Микромодель (оперативный уровень)</b>	
Описывается движение каждого автомобиля (скорость, ускорение, маневрирование при движении, маршрут). Указываются количество и ширина полос для движения, структура транспортного потока, интенсивность транспортных потоков или матрица межрайонных корреспонденций, приоритетные направления и допустимая скорость движения, параметры светофорного регулирования и др.	Характеристики транспортного потока (длина очереди, задержки транспортных средств, уровень обслуживания, средняя скорость, максимальная или минимальная скорость, время движения). Оптимальная схема организации движения транспорта и пешеходов. Анимационное изображение локального участка сети.
<b>Суб-микромодель</b>	
Для каждого автомобиля указывается скорость, ускорение, маневрирование при движении, маршрут, вид топлива, вид двигателя, использование навигационной системы и другие «личные» характеристики транспортных средств.	Решение задач оптимизации функционирования перекрестков, «узких» мест транспортной сети, оценка степени загрязнения окружающей среды автотранспортом.

Для моделирования динамических систем используются так называемые среды схемотехнического моделирования PTV VISSIM (PTV VISUM - анализ и прогнозирование распределения транспортной сети). В системе реализуются макро-, мезо- и микромодели транспортных систем. Микромодели позволяют смоделировать взаимодействие потоков автомобильного транспорта и пешеходов. Планирование развития городской транспортной системы осуществляется по результатам имитационного моделирования макромодели. В системе созданы модели функционирования морского, авиационного транспорта, транспортных терминалов. Система VISSIM имеет русскоязычные версии, большое количество учебной литературы и примеров созданных моделей, но – с февраля 2022 года компания A+S Consut GmbH (официальный представитель компании PTV AG) прекратила свою деятельность в России.

Arena – система дискретно-событийного моделирования (разработчик – компания Rockwell Automation Inc), используется для имитационного моделирования широкого перечня задач, в том числе транспортных задач.

Для дискретно-событийного моделирования применяется современная версия GPSS Word (разработчик компания Minuteman Software Corp.) [4]. Сравнение систем имитационного моделирования по основным пользовательским критериям приведено в таблице 2.



Таблица 2 – Сравнение систем моделирования

Система, язык программирова- ния	Метод моделирования			Анима- ция	Язык интерфейса
	Системная динамика	Агентное	Дискретно- событийное		
AnyLogic, Java	+	+	+	+	Русский, Английский
Arena, SIMAN	-	-	+	+	Английский
GPSS World, GPSS	-	-	+	-	Английский

Дополнительно можно назвать еще несколько систем. Aimsun от компании Transport Simulation Systems (Испания) – среда для моделирования транспортных потоков микро- и мезомоделях. Созданы модели с учетом регулировки дорожного движения (светофорные объекты), с возможностью последующей актуализации по показаниям детекторов системы. Enterprise Dynamics от компании INCONTROL Simulation Solutions (Нидерланды) – среда моделирования для анализа и оптимизации транспортной системы или объектов инфраструктуры (программные продукты охватывают такие области как логистика, транспорт, транспортные терминалы).

По результатам выполненного обзора систему AnyLogic можно назвать наилучшим вариантом для выполнения имитационного моделирования и использования в учебном процессе при изучении дисциплины «Моделирование и оптимизация транспортных процессов» по направлению 23.03.01. Приведем основные преимущества среды для моделирования городской транспортной системы:

- стандартные библиотеки (процессы, пешеходы, потоки, дорожное движение, дополнительно использовать железнодорожную библиотеку для описания движения метро и трамваев, функционирования транспортных терминалов);

- проработанная графическая среда (диаграммы потоков и накопителей для системной динамики; для дискретно-событийного и агентного моделирования: карты состояний, блок-схемы);

- трехмерная анимация транспортных средств и пешеходов в реалистичной городской среде с привязкой к ГИС-карте исследуемой местности, транспортной системе конкретных населенных пунктов.

По процедуре моделирования городской транспортной системы в среде AnyLogic имеется обширная библиотека учебных и научных материалов [3], позволяющих студентам осваивать и пополнять знания в сфере имитационного моделирования, выполнять вне аудиторных занятий учебные, самостоятельные и научно-исследовательские работы.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Эльберг М. С. Имитационное моделирование: учеб. пособие / М. С. Эльберг, Н. С. Цыганков. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. – 128 с.

2. Имитационное моделирование в проектах ИТС: учебное пособие / С.В. Жанказиев, А.И. Воробьев, А.В. Шадрин, М.В. Гаврилюк; под ред. д-ра техн. наук, проф. С.В. Жанказиева. – М.: МАДИ, 2016. – 92 с.

3. AnyLogic : инструмент имитационного моделирования : сайт. – Санкт-Петербург, 2022 – . – URL: <https://www.anylogic.ru/road-traffic/> (дата обращения: 09.11.2022).

4. Маликов Р.Ф. Практикум по дискретно-событийному моделированию сложных систем в расширенном редакторе GPSS World [Текст]: практикум / Р.Ф. Маликов. – Уфа: Изд-во БГПУ, 2017. – 273с.

## **СЕКЦИЯ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВИАЦИОННОЙ И МОРСКОЙ ТЕХНИКИ**

УДК 629.7.048.7

Бобков Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Bobkov Alexandr Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Komsomolsk-na-Amure State University

Кривенко Марина Юрьевна, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Krivenko Marina Yurievna, Graduate student of Komsomolsk-na-Amure State University

### **ОРГАНИЗАЦИЯ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

### **ORGANIZATION OF CIRCULATION PROCESSES ON BOARD THE SPACECRAFT**

Аннотация. В статье рассматриваются циркуляционные процессы на борту космического аппарата, их виды и способы организации циркуляции рабочего тела.

Abstract. The article discusses the circulation processes on board the spacecraft, their types and methods of organizing the circulation of the working fluid.

Ключевые слова: космический аппарат, циркуляционная система, рабочее тело, нагнетатель.

Key words: spacecraft, circulation system, working fluid, supercharger.

Земля – система большого количества сложных циркуляционных процессов, как внутренних, так и внешних. Внешние процессы происходят на поверхности, под воздействием излучения Солнца, жизнедеятельности организмов и растений, гравитации [1].

К основным естественным циркуляционным процессам на Земле относятся:

- круговорот воды в природе;
- газообмен, через фотосинтез растений;
- теплообмен, через конвективные потоки в атмосфере.

Из-за отсутствия атмосферы и гравитации космические аппараты (КА) должны обладать полной автономностью, поэтому указанные выше естественные процессы воспроизводятся на борту КА с помощью искусственных циркуляционных систем, в которых рабочими телами являются жидкости или газы.

Функциональное назначение циркуляционных систем, как правило, отражено в их названии, например, система терморегулирования, система очистки атмосферы от CO<sub>2</sub>, система обеспечения кислородом на основе запасов перекиси водорода, система осушения воздуха на основе теплообменника – конденсатора паров воды и т.д. [2, 3].

В качестве иллюстрации, на рисунке 1 показан примерный состав циркуляционных систем КА, обеспечивающих следующие процессы: циркуляцию воды, газообмен и теплообмен [4].

По способу организации циркуляции системы на борту КА делятся на:

- пассивные (циркуляция рабочего тела по контуру происходит за счет капиллярных сил);
- активные (циркуляция рабочего тела осуществляется с помощью нагнетателей: вентиляторов и насосов).

В пассивных системах циркуляция рабочего тела происходит в тепловых трубах, заполненных пористым материалом. Он содержит большое количество капилляров, через которые рабочее тело проходит под действием сил поверхностного натяжения.

Тепловые трубы используются, в основном, в маломощных системах терморегулирования КА, т.к. могут обеспечить только малый расход рабочего тела [5].

Преимуществом пассивной циркуляции является надёжность, большой ресурс эксплуатации и отсутствие энергопотребления.

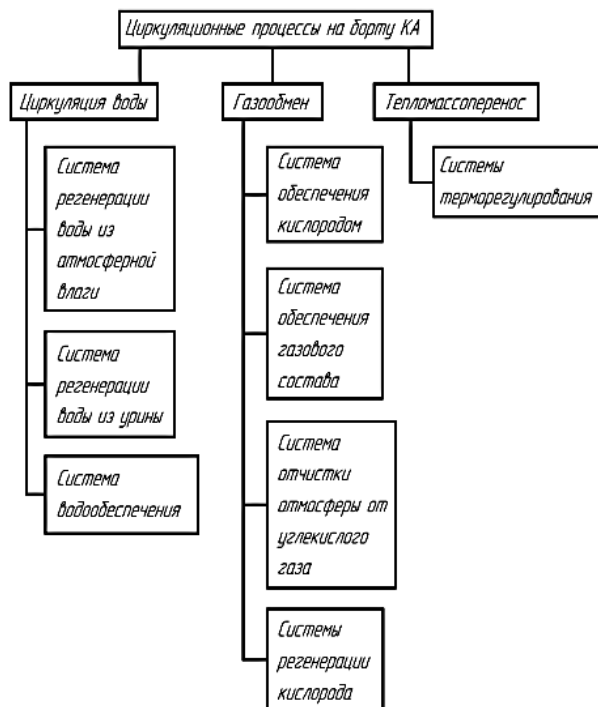


Рисунок 1 – Состав циркуляционных систем КА

К недостаткам относится малая удельная масса, равная отношению тепловой мощности к массе системы терморегулирования.

Большинство циркуляционных систем на борту КА относятся к активному типу. В них циркуляция рабочего тела осуществляется с помощью нагнетателей с электроприводом.

В зависимости от типа рабочего тела, требуемого напора и расхода рабочего тела, используют следующие виды нагнетателей:

- вихревые насосы (рабочее тело – жидкость, обеспечивают высокие напоры и низкие расходы рабочего тела);
- дисковые насосы (обеспечивают относительно низкий напор и расход рабочего тела и не генерируют колебания давления в проточном тракте);
- шестерённые насосы (рабочее тело – жидкость, имеют высокий КПД, обладают низким ресурсом работы из-за наличия пар трения);
- центробежные насосы (рабочее тело – жидкость, обеспечивают приемлемые напор и расход рабочего тела в широком диапазоне изменения их значений);
- центробежные вентиляторы (рабочее тело – газ, имеют высокий КПД, малый напор и большой расход рабочего тела);
- центробежные компрессоры (рабочее тело – газ, обеспечивают высокий напор).

К преимуществам нагнетателей активных циркуляционных систем относится способность обеспечить относительно большие, по сравнению с тепловыми трубами, расходы рабочего тела и требуемый напор.

К недостаткам можно отнести снижение надёжности из-за пар трения в опорах, большое энергопотребление и невысокий коэффициент полезного действия у большинства нагнетателей.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Халидуллин, О. Х. Человек и круговорот воды в природе / О. Х. Халидуллин, К. К. Дускаев // Наука без границ. – 2018. – № 3(20). – С. 96-102.
2. Чайкина, К. А. Современные системы жизнеобеспечения космонавтов / К. А. Чайкина // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3-х томах, Красноярск, 13–17 апреля 2020 года / Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Том 1. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 2020. – С. 250-252.
3. Регенерационные системы жизнеобеспечения экипажей космических станций / Н. М. Самсонов, Л. С. Бобе, Л. И. Гаврилов [и др.] // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2009. – № 1. – С. 61-68.
4. Серебряков, В. Н. Основы проектирования систем жизнеобеспечения экипажа космических летательных аппаратов / В. Н. Серебряков – Москва : Машиностроение, 1983. – 160 с.
5. Совершенствование агрегатов для транспортировки тепла в космических аппаратах / В. В. Двирный, Г. Г. Крушенко, В. В. Голованова [и др.] // Исследования наукограда. – 2016. – № 3-4(17-18). – С. 12-16.

УДК 629.5.01

Боярчук Иван Михайлович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Boyarchuk Ivan Mikhailovich, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Пак Таисия Игоревна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Pak Taisiya Igorevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Бурменский Андрей Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Кораблестроение и компьютерный инжиниринг», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Burmenskiy Andrey Dmitrievich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Shipbuilding and Computer Engineering, Komsomolsk-na-Amure State University

## **ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВМЕСТИМОСТИ СУДОВ В CAD-СИСТЕМЕ КОМПАС-3D**

### **FEATURES OF DETERMINING THE CAPACITY OF VESSELS IN THE CAD SYSTEM KOMPAS-3D**

Аннотация. В процессе разработки проектов судов с высоким расположением центра тяжести груза важной задачей является определение параметров вместимости балластных цистерн. Определение параметров вместимости можно выполнять как классическими методами, например, путем построения эпюры емкости, так и с использованием инструментов 3D моделирования, которые предоставляют проектанту современные САД системы. В статье рассматриваются особенности определения параметров вместимости средствами САД-системы КОМПАС-3D.

Abstract. In the process of developing projects for ships with a high center of gravity of the cargo, an important task is to determine the parameters of the capacity of ballast tanks. Determination of capacity parameters can be performed both by classical methods, for example, by constructing a capacity diagram, and using 3D modeling tools that provide the designer

with modern CAD systems. The article discusses the features of determining the capacity parameters using the KOMPAS-3D CAD system.

Ключевые слова: контейнеровоз, вместимость, судовая цистерна, объем, центр тяжести, КОМПАС-3D.

Key words: container ship, capacity, ship's tank, volume, center of gravity, KOMPAS-3D.

Одной из важных задач при проектировании контейнеровозов, которые относятся к судам с высоким расположением центра тяжести груза, является определение контейнероупругости судна. В отличие от контейнеровместимости судна, которая определяется геометрическими характеристиками судна и ограничениями нагрузки на нижний контейнер в грузовом штабеле и конструктивные элементы, на контейнероупругость влияет обеспечение требований безопасности мореплавания и параметров остойчивости. Исследования показывают, что обеспечение требований к остойчивости оказывают наибольшее влияние на рассматриваемую характеристику.

Обеспечение требуемых параметров безопасности мореплавания контейнеровозов, при неизменности главных размерений, осуществляется путем приема балласта с одновременным перераспределением груза (удаления контейнеров верхних палубных ярусов). Для этого необходимы данные по таким параметрам вместимости балластных цистерн, как их объемы и координаты центров тяжести.

Определение параметров вместимости судовых отсеков, а в особенности цистерн различного назначения является достаточно сложной процедурой. Это объясняется тем, что судовые цистерны располагаются в двойных бортах, в двойном дне, в пиковых отсеках. В общем, они занимают те объемы на судне, которые являются труднодоступными или не предназначенными для расположения грузов. Как правило, объем цистерны, с одной стороны, ограничивается наружной обшивкой, которая имеет криволинейную форму за исключением района цилиндрической вставки или двойного дна в килевой области. В этом случае приходится проводить сложные расчеты с проведением дополнительных геометрических построений, основанных на данных теоретического чертежа и чертежа разбивки корпуса грузовые отсеки и цистерны [1].

При наличии 3D модели корпуса судна процедуру определения геометрических характеристик отсеков и цистерн можно проводить с помощью CAD систем.

В Комсомольском-на-Амуре государственном университете в качестве базовой САД-системы для подготовки студентов по направлению «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры» был выбран комплекс КОМПАС-3D. В настоящее время параллельно с работой по внедрению данной САД-системы в учебный процесс, в рамках выполнения магистерских диссертаций и выполнения студентами научных проектов ведутся исследования по использованию КОМПАС-3D для задач судостроения.

В качестве одной из таких задач, была выполнена исследовательская работа по отработке алгоритма определения геометрических характеристик судовых отсеков на примере контейнеровоза «HELENE».

Исходными данными являются 3D-модель корпуса контейнеровоза, сформированная в пакете FreeShip и чертёж расположения балластных цистерн (рисунок 1).

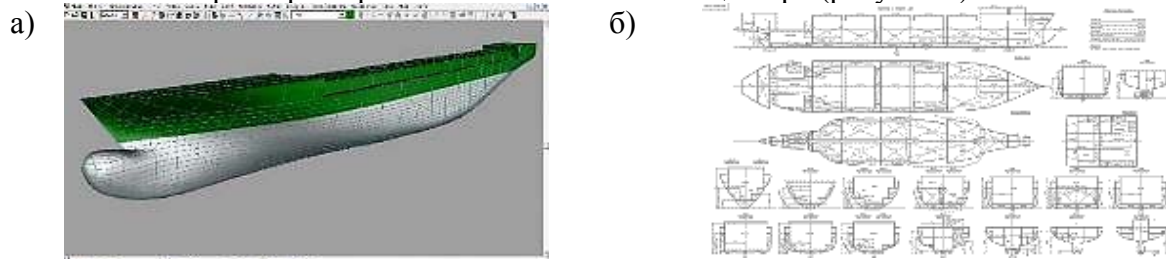


Рисунок 2 – Исходные данные для определения вместимости отсеков:  
а – модель корпуса; б – чертёж расположения балластных цистерн

Процесс определения геометрических характеристик отсеков в КОМПАС-3D состоит из нескольких шагов [2,3].

На первом шаге производится моделирование судовой поверхности в КОМПАС-3D. Для этого 3D модель корпуса судна в формате IGES из пакета FreeShip экспортируется в систему КОМПАС-3D. На основе экспортируемой поверхности получаем линии шпангоутов в виде сплайнов, как результат пересечения поверхности с теоретическими плоскостями шпангоутов (рисунок 2,а).

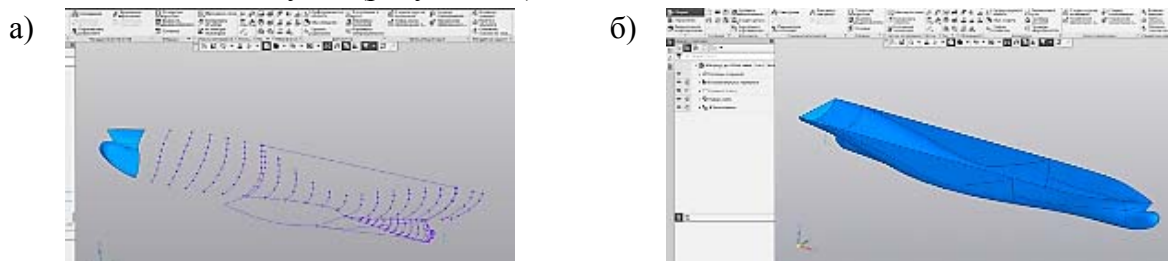


Рисунок 2 – Построение поверхности по сети кривых:  
а – сеть кривых; б – поверхность корпуса в КОМПАС-3D

Проводится анализ гладкости полученных линий шпангоутов. Окончательно построение поверхности корпуса контейнеровоза в КОМПАС-3D осуществляется с помощью инструмента «построение поверхности по сети кривых (рисунок 2,б).

На втором шаге проводится формирование на основе поверхности корпуса судовых отсеков и цистерн в соответствии с чертежом. Данная процедура заключается в моделировании плоскостных элементов, которые ограничивают объемы отсеков и цистерн: продольных и поперечных переборок, платформ и диафрагм, вертикального килля, сплошных флоров и днищевых стрингеров.

Для построения переборок следует построить поверхность на основе пересечения смещённой плоскости с поверхностью наружной обшивки. Построение платформ и диафрагм проводится при помощи эквидистанты поверхности наружной обшивки и отрезков, ограничивающих цистерну, по граням которой строятся поверхности (рисунок 3).

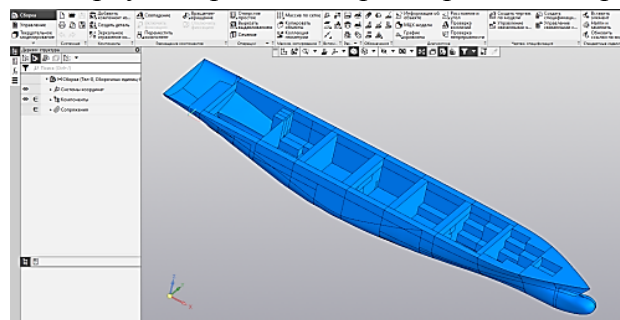


Рисунок 3 – Корпус судна после моделирования отсеков и цистерн

На основе выполненных геометрических построений, на третьем шаге производится процедура разбиения корпуса на отсеки и цистерны в виде отдельных 3D моделей последних. Для этого на нулевом расстоянии строятся эквидистанты поверхностей ограничивающих цистерны, проводится их рассечение. В результате получаем отдельные грани цистерн. Далее проводится сшивка данных граней в единую замкнутую поверхность, ограничивающую объем цистерны (рисунок 4).



Рисунок 4 – Варианты формы цистерн

На последнем шаге необходимо получить массо-центровочные характеристики (МЦХ) отсеков и цистерн. Основная сложность данной операции заключается в том, что нам необходимо определить объемно-центровочные характеристики внутреннего, т.е. «пустого» объема цистерны. А система АСКОН-3D позволяет определять данные характеристики только для твердотельных тел. Поэтому «пустое» пространство отсека надо предварительно преобразовать в твердое тело.

Но так форма отсеков, а в особенности цистерн может быть достаточно сложной, то последовательность данной процедуры, следующая (рисунок 5):

- предварительно строится параллелепипед, который полностью описывает модель отсека или цистерны;
- стенкам цистерны придаётся толщина наружу;
- с помощью булевой операции «вычитание» с выбором варианта получаемого результата получаем твердотельную модель «пустоты»;
- с помощью команды «МЦХ модели» получаем необходимые характеристики вместимости цистерны или отсека.

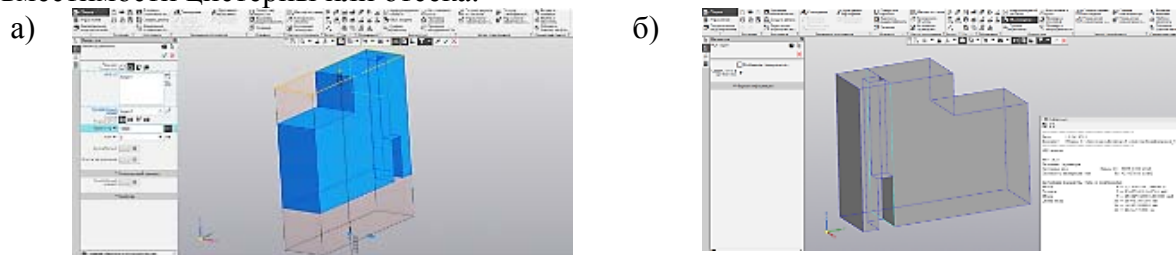


Рисунок 5 – Последовательность определения параметров вместимости:

а – создание описывающего параллелепипеда; б – расчёт МЦХ цистерны

В результате выполнения команды «МЦХ модели» получаем такие необходимые нам данные, как объем отсека или цистерны и координаты центра тяжести данного объема.

Результаты определения объёмов и центров тяжести цистерн оформляются в виде таблицы (таблица 1).

Таблица 1 – Фрагмент таблицы с характеристиками вместимости отсеков и цистерн

№	Наименование цистерны	$V_T, \text{M}^3$	$X_G, \text{M}$	$Y_G, \text{M}$	$Z_G, \text{M}$
1	HFO OVER TK1	11,89	85,75	0,046	7,910
2	HFO OVER TK2	48,71	56,0	0,00	7,910
3	HFO OVER TK3	9,80	26,23	-2,24	0,830

Следует отметить, что данный алгоритм определения параметров вместимости отсеков и цистерн предназначен для определения теоретических значений и наличие конструктивных элементов внутри объема учитывается коэффициентом утилизации. Если же в отсеке предполагается располагать крупногабаритное оборудование или через него проходят трубопроводы различных систем, то в этом случае необходимо учитывать их объем и исключать его из твердотельной модели «пустоты».

Хотя рассмотренный алгоритм достаточно эффективен и позволяет получать достаточно точные результаты, но хотелось бы иметь специализированный инструментарий в КОМПАС-3D по определению параметров «пустоты» отсеков и цистерн, что позволит исключить третий и четвертый шаги алгоритма.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Цыганкова, Н. И. Моделирование процесса формирования грузового плана контейнеровоза / Н. И. Цыганкова, А. Д. Бурменский // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 4-х частях. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2021. – Ч. 1. – С. 343-346.



2. Боярчук, И. М. Особенности разработки 3D - модели судовой поверхности контейнеровоза «Helene» / И. М. Боярчук, А. Д. Бурменский // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы V Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 4-х частях. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – Ч. 2. – С. 174-176.

3. Даманский, Д. В. Практическое трёхмерное моделирование судовых корпусных конструкций в системе КОМПАС–3D / Д. В. Даманский, В. А. Ярополов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в 3 ч., Комсомольск-на-Амуре, 06–10 апреля 2020 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2020. – Ч.1. – С. 392-394.

УДК 004.9:629.5

Гончаров Александр Сергеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Goncharov Alexander Sergeevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Жарихина Анастасия Владимировна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Zharikhina Anastasia Vladimirovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Бурменский Андрей Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Кораблестроение и компьютерный инжиниринг», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Burmensky Andrey Dmitrievich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Shipbuilding and Computer Engineering, Komsomolsk-na-Amure State University

## **АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ САПР И PLM-СИСТЕМ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СУДОСТРОЕНИИ**

### **ANALYSIS OF MODERN CAD AND PLM SYSTEMS USED IN SHIPBUILDING**

Аннотация. Современное судостроительное производство основывается на применении специализированных PLM-систем. Еще несколько лет назад в отечественной практике использовались в основном зарубежные PLM-системы. В настоящее время начата работа по созданию отечественных систем поддержки жизненного цикла судна. В статье приведен анализ ведущих зарубежных судостроительных PLM-систем и решений отечественных IT-компаний в области судостроения.

Abstract. Modern shipbuilding production is based on the use of specialized PLM-systems. A few years ago, foreign PLM-systems were mainly used in domestic practice. At present, work on building domestic ship life cycle support systems has begun. The article features analysis of leading foreign shipbuilding PLM-systems and solutions of domestic IT-companies in the field of shipbuilding.

Ключевые слова: PLM-системы, САД-системы, судостроение, проектирование, обзор.

Key words: PLM systems, CAD systems, shipbuilding, design, overview.

## **Введение**

Современная промышленность характеризуется глубоким внедрением PLM-систем и систем автоматизированного проектирования (САПР), которые используются на всех этапах производственного процесса. PLM-системы и САПР позволяют существенно повысить качество проработки технологической документации, как проектантом, так и заводом-изготовителем заранее рассчитать как материальные, так и временные затраты, а также вести контроль за ходом производственного процесса, что дает возможность выявить и оптимизировать потери [1-4].

Однако, в сравнении с другими областями промышленности, развитие и внедрение PLM-систем и САПР в судостроительной отрасли началось относительно недавно в виду того, что судостроительная промышленность является очень наукоемкой и технологически насыщенной.

### **Зарубежные PLM-системы**

**CATIA.** Одной из первых отраслевых САПР стала разработанная в 1982 году CATIA, на момент выхода способная лишь на простейшее твердотельное моделирование без инструментов, позволяющих получить модели более сложной геометрической формы. На сегодняшний день CATIA является САД-системой высшего уровня, позволяющая решать задачи инженерного анализа (CAE) и технологической подготовки производства (CAM). Инструментарий CATIA позволяет решать задачи на всех этапах проектирования и постройки судна.

В первую очередь САД-система CATIA имеет широкий диапазон возможностей по созданию сложных поверхностей корпуса судна:

- возможность создавать поверхности корпуса судна как автоматически по заданным граничным условиям, так и вручную по сетке, состоящей из множества точек;
- сегментирование поверхности с возможностью редактирования отдельных элементов с последующим обнаружением и устранением разрывов и коллизий.

На основе полученной поверхности CATIA позволяет провести базовые расчёты по теории корабля.

После создания готовой модели судовой поверхности CATIA позволяет пользователю определить основные опорные элементы судового корпуса: теоретические шпангоуты, батоксы и ватерлинии, которые в совокупности служат опорной координатной сеткой для проектирования корпусных конструкций.

CATIA позволяет пользователю проектанту работать со всеми видами металлоконструкций, используемых в судостроении. Важной особенностью является то, что спроектированная корпусная конструкция представляет собой иерархическую взаимосвязанную структуру. Так, например, при изменении обводов судна перестраивается и судовой набор. Модуль инженерного анализа CATIA позволяет выполнить расчёты как общей, так и местной прочности корпуса судна, а также провести анализ прочности отдельных конструктивных элементов.

САД-система CATIA способна автоматически генерировать чертежи секций и деталей со спецификаций, а также составлять карты раскроя корпусных деталей.

Такие монтажные элементы как трубопроводы, оборудование, опорные конструкции, вентиляция, кабельные магистрали и моделирование судовых помещений в CATIA реализовано с помощью модуля АЕС CATIA (CCPlant). Проектирование осуществляется на основе стандартизированных элементов конструкций, представленных в системе каталогов, отвечающих международным, отраслевым, либо стандартам предприятия.

Проектирование механизмов и корабельного оборудования представлено в виде пакета CATIA Mechanical, который способен выполнить прочностной, кинематический и монтажный анализ механизмов в пространстве корпуса судна.

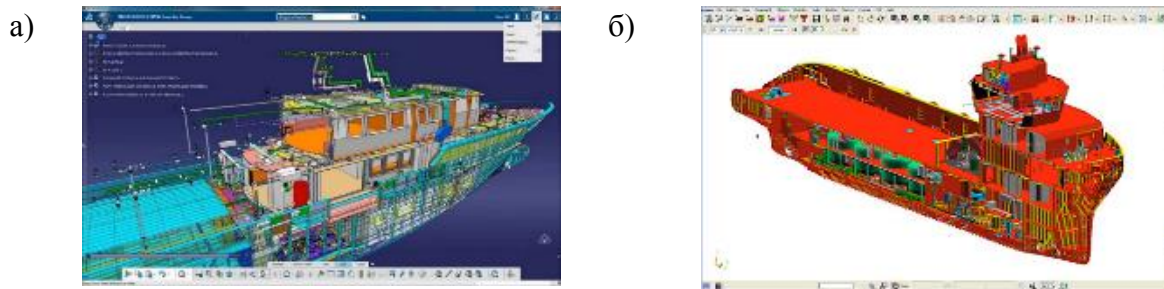


Рисунок 3 – Примеры 3D-моделей судов разработанных в CAD-системах:  
а – CATIA; б – FORAN

**FORAN.** Одной из первых специализированных судостроительных САПР является система FORAN, разработанная испанской инженерно-технологической компанией Sener Engineering.

База инструментов и модулей FORAN позволяет проектанту производить все этапы проектирования начиная от создания эскиза и заканчивая консультациями в ходе постройки судна. Система постоянно пополняется новыми инструментами в следствии чего в ней возможно проектирование судов любого типа с учетом особых требований заказчика, что делает эту CAD-систему наиболее подходящей для гражданского судостроения.

Результатом разработки проекта в системе FORAN становится единая 3D модель судна, включающая информацию о составляющих, которые параметрически связаны между собой. Точность и полнота модели, получаемой в ходе разработки, достигается за счёт использования развитой системы библиотек стандартов, которые могут быть адаптированы под требования верфи.

Инструменты создания поверхности корпуса судна позволяют пользователю проектировать корпуса любой формы, включая многокорпусные и ассиметричные суда. FORAN способен самостоятельно выполнять требуемые при проектировании расчёты гидростатики.

Лежащая в основе FORAN методология проектирования и моделирования корпусных конструкций позволяют с точностью воссоздать корпус судна, а затем получить информацию об используемых материалах, рассчитать прочность, центры тяжести и многое другое.

Для работы с элементами судового оборудования, трубопроводов, электрики и снабжения помещений FORAN использует специализированные модули.

**AVEVA Marine.** Одной из популярной в России зарубежной судостроительной CAD-системой является AVEVA Marine. Главным ее отличием от прочих является то, что она представляет собой набор интегрированных приложений, каждое из которых отвечает за определенные задачи.

Основными компонентами AVEVA Marine являются:

- AVEVA Engineer – отвечает за разработку теоретического корпуса и общего расположения судна, а также выполнение расчётов и построения диаграмм, связанных с теорией корабля.

- AVEVA Design – включает набор инструментов, позволяющих осуществлять 3D моделирование.

- AVEVA Manage – позволяет распределить работу между подразделениями, осуществляя проверку столкновений и визуализируя созданный в ходе проектирования объект.

Помимо трех основных AVEVA Marine включает ряд модулей, которые в совокупности позволяют проектанту решать любые задачи, начиная от проектирования корпусных конструкций с расчётом на прочность и заканчивая планировкой судовых помещений.

#### **Отечественные PLM-системы**

В период становления систем автоматизированного проектирования в 80-е годы отечественное судостроение было направлено в основном на военное кораблестроение.

Из-за «закрытости» проектно-конструкторских бюро и судостроительных заводов было невозможно внедрение и разработка «масштабных» специализированных САПР, работа которых опиралась на зарубежное графическое ядро. В связи с этим широкое развитие получили только общемашиностроительные САД-системы. Лишь после 90-х годов в отечественном судостроении произошли первые попытки стандартизировать и объединить требования к ведению проектной деятельности в САД-системах.

**T-FLEX.** Одной из внедряемых в отечественное судостроение САД-систем является T-Flex CAD, получившее свое развитие на Выборгском судостроительном заводе, где в настоящее время решается ряд задачи по внедрению T-Flex в судостроительную отрасль:

- работа с моделями корпуса судна, получаемой от проектанта (просмотр, снятие размеров, получение сечений, расчёт масс и центров тяжести);
- моделирование сборочных корпусных ступеней на базе имеющихся разработок ступенчатой оснастки;
- проектирование стоечных и лекальных сборочных постелей на основе 3D модели секции;
- моделирование строительных лесов на основе 3D модели корпуса;
- построение развёрток, шаблонов и прочие потребности плаза;
- анализ нагрузки оснастки методом конечных элементов.

**КОМПАС-3D.** Наиболее перспективной отечественной отраслевой САД-системой является Компас-3D. В 2018 году компания АСКОН протестировала Компас-3D V17 на создание трехмерных моделей корпуса судна. После тестирования выяснилось, что в КОМПАС можно эффективно создавать 3D модели конструкции корпуса. В 2020 году вышла версия КОМПАС-3D V19, где на основе анализа требований к цифровой модели судна и пожеланий наличию «специализированного» инструментария со стороны предприятий и проектных организаций судостроительной промышленности в модуль металлоконструкции были добавлены инструменты, которые позволяют более эффективно моделировать судовые конструкции и системы. В последующих версиях КОМПАС-3D V20 и V21 наблюдается дальнейшее развитие и расширение «судостроительного» инструментария.

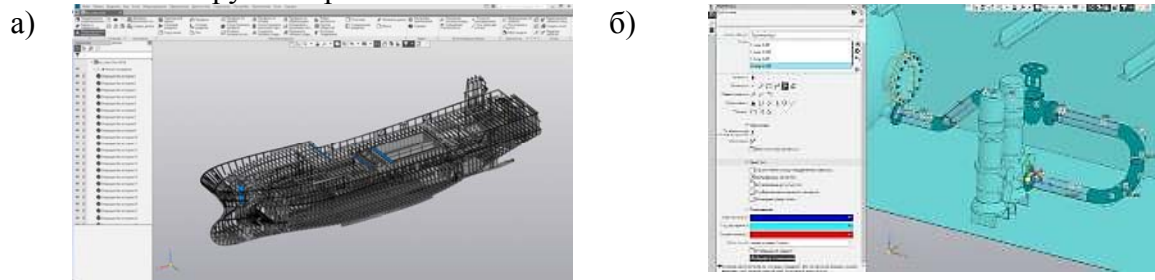


Рисунок 2 – Примеры применения САД-системы КОМПАС-3D в области судостроения:  
а – 3D-модель корпуса судна; б – 3D моделирование судовых систем

Для моделирования судовой поверхности в системе появились новые возможности построения поверхностей конических сечений и поверхностей по сети кривых. Обновлены инструменты анализа кривых и поверхностей и другие.

Для проектирования корпусных конструкций и фундаментов добавлены новые инструменты моделирования, основные из них:

- модифицирован инструмент «Пластина», в которой реализована возможность построения пластины по границе;
- команда «Разбить пластину», позволяет разбивать плоскостные элементы на отдельные детали;
- команда «Поясок», предоставляет возможность построения произвольного пояса с различными вариантами законцовок;

– команда «Прокол» позволяет производить автоматический подбор выреза для прохода основного и вспомогательного набора, в том числе с заделкой в непроницаемых элементах конструкции;

– команда «Кница», позволяет строить кницы с выбором формы и видом пояска.

Для проектирования судовых систем (трубопроводов) был полностью переработан работы команды «Построить трубопровод». Была добавлена команда «Создать точку подключения», позволяющая задать параметры подключения трубопроводов и добавления ответного элемента. Добавлена возможность построения гибких шлангов и возможность моделирования изоляции трубопроводов и другие.

В июне 2021 года в Санкт-Петербурге прошел X Международный военно-морской салон, частью которого стал PLM-форум «Управление жизненным циклом изделий судостроения». На форуме впервые были представлены пилотные проекты по применению решений АСКОН в ведущих конструкторских бюро судостроения, а также дорожная карта развития программного комплекса консорциума «РазВИТие» для задач судостроения.

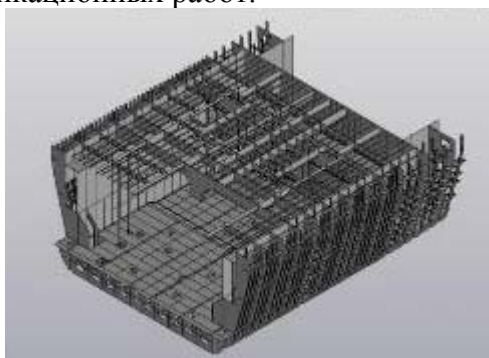
В «судостроительной» дорожной карте АСКОН предусмотрено постепенное наполнение программных продуктов функциональностью, необходимой для автоматизации отраслевых задач. Для системы проектирования КОМПАС-3D – это инструменты проектирования корпусных конструкций, судовых систем, изоляции, электрики, оснастки; специализированные расчеты (виртуальный опытовый бассейн) в интеграции с CFD-системой FlowVision; прочностные расчеты в продуктах линейки АРМ. Для системы управления инженерными данными ЛОЦМАН: PLM – средства визуализации цифрового макета и управления проектом разработки изделия судостроения.

#### **Заключение**

В 2019 году между компанией АСКОН и Комсомольским-на-Амуре государственным университетом было подписано соглашение о стратегическом партнерстве в сфере подготовки инженерных кадров, в том числе по направлению «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры». Выбор PLM-решений консорциума «РазВИТие» в области судостроения, в качестве базового программного обеспечения подготовки будущих корабелов как раз было обусловлено развитием специализированного инструментария для моделирования судовых конструкций и систем в новых версиях САД-системы КОМПАС-3D, а также наличием специализированных приложений к ней. В настоящее время на кафедре «Кораблестроение и компьютерный инжиниринг» ведется работа по внедрению в учебный процесс сквозной информационной подготовки в области жизненного цикла морской техники.

Работы в данном направлении ведутся путем разработки учебно-методического обеспечения, наработки базы учебных 3D моделей судовых конструкций, а также проведением исследований студентами эффективной методологии проектирования корпусов судов и их подсистем в рамках проектного обучения и выполнения выпускных квалификационных работ.

а)



б)



Рисунок 3 – Конкурсные работы студентов КНАГУ, победители конкурса компании АСКОН «Цифровой инженер»: а – 2020 г.; б – 2021 г.

Студенты КНАГУ являются активными участниками ежегодного международного конкурса компании АСКОН «Цифровой инженер» и их проекты регулярно становятся победителями в номинации «Лучший проект в области судостроения».

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бубнов, А. САПР в судостроении / А. Бубнов // САПР и Графика. – 2000. – №5 – С. 56-58.
2. Таскаев, К. А. использование программы САД САТІА в морском судостроении / К. А. Таскаев // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 7. – С. 214-218.
3. Минченко, Л. В. Системы автоматизированного проектирования в судостроении / Л. В. Минченко, Т. А. Кандратов // Современные тенденции технических наук. – 2017. – №5. – С. 73-75.
4. Петров, А. С. Новые инструменты консорциума "РазвИТие" для задач судостроения / А. С. Петров // Судостроение. – 2020. – № 6. – С. 41-43.

УДК 629.5.015:532.5:004.9

Каменских Ираида Витальевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Кораблестроение и компьютерный инжиниринг», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Kamenskikh Iraida Vitalievna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department «Shipbuilding and Computer Engineering», Komsomolsk-na-Amure State University

Мерзликينا Владислава Сергеевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Merzlikina Vladislava Sergeevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University

#### **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММЫ KOMPASFLOW В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ**

#### **EXPERIENCE OF USING THE KOMPASFLOW PROGRAM IN THE EDUCATIONAL PROCESS**

Аннотация. В статье приведены особенности изучения дисциплин для студентов кораблестроителей, описывающих процессы взаимодействия судна со средами. Показаны решения и результаты применения программы KompasFlow при исследовании некоторых задач гидродинамики в учебном процессе. Отмечены достоинства программы при использовании в учебном процессе.

Abstract. The article presents the features of the study of disciplines for students of shipbuilders describing the processes of ship interaction with environments. The solutions and results of using the KompasFlow program in the study of certain problems of hydrodynamics in the educational process are shown. The advantages of the program when used in the educational process are noted.

Ключевые слова: обтекание тела жидкостью, гидродинамика, KompasFlow.

Key words: fluid flow around a body, hydrodynamics, KompasFlow.

Повышение энергоэффективности новых судов – основная задача, над которой работают как научные, так и проектные организации. Необходимость постройки транспортных средств с новыми формами корпуса и режимами движения поддерживает актуальность проведения научных исследований в области теории корабля и гидродинамики. Для подтверждения результатов теоретических исследований и уточнения математических моделей широко используются численные методы и компьютерные техно-



логии. В настоящее время широко применяется быстро развивающаяся вычислительная гидродинамика (CFD). Разработаны компьютерные программы (на основе создания 3D моделей), эффективно применяемые к решению задач обтекания тел различными средами.

Основными дисциплинами при подготовке бакалавров кораблестроителей являются дисциплины, связанные с изучением особенностей поведения судна в морских условиях, воздействия на судно водной среды. Теория корабля и гидромеханика дают основные знания о взаимодействии сложного технического сооружения и водной среды. Ограниченное количество часов по учебному плану, отведенное для изучения данных дисциплин, не позволяет освоить новые инструменты для исследования процессов взаимодействия. Программа подготовки магистрантов кораблестроителей предлагает продолжение изучения разделов гидродинамики и теории корабля при освоении дисциплин «Экспериментальные исследования» и «Проблемы гидродинамики и теории корабля». Опытный бассейн позволяет провести исследования поведения моделей объектов океанотехники в воде и на ее поверхности, оценить некоторые качества и измерить основные характеристики в рамках дисциплины «Экспериментальные исследования». Но не для всех задач можно провести физический эксперимент. Численный эксперимент в некоторых случаях дает более простой и менее затратный подход к анализу процессов взаимодействия объектов со средами.

В Комсомольском-на-Амуре государственном университете по соглашению о сотрудничестве с АО АСКОН проводится внедрение в учебный процесс системы моделирования КОМПАС-3D. Программа успешно была применена при выполнении исследований в магистерских диссертациях, в задачах проектирования конструкций и исследования ее прочности [1, 2]. Для выполнения численного моделирования процессов гидродинамики студентами на лабораторном практикуме изучается приложение KompasFlow. Это инструмент для моделирования взаимодействия тел со средой. Эксплуатация судна происходит на границе раздела двух сред – воздуха и воды, а в данной программе реализовано моделирование односредных задач.

Можно отметить преимущества численного моделирования в программе KompasFlow:

- трехмерная модель создается в КОМПАС-3D и не требует дальнейших преобразований при ее использовании для анализа в KompasFlow;
- трехмерная модель при необходимости может быть легко откорректирована инструментами КОМПАС-3D;
- понятная структура исходной информации и порядка проведения расчета гидродинамики;
- доступная для понимания процедура построения расчетной конечно-элементной сетки и довольно удобный инструмент ее изменения;
- хороший инструмент визуализации результатов решения и этапов моделирования.

При изучении трехмерных процессов движения тел в средах современные компьютерные программы используют довольно существенные ресурсы компьютерной техники, которые, к сожалению, не имеются в вузе для учебных целей. В KompasFlow для решения учебных задач необходимы минимальные возможности компьютерной техники. За время аудиторных занятий студенты могут построить исследуемый объект (простой формы) в КОМПАС-3D и провести численный эксперимент в KompasFlow. В результате, за ограниченное число аудиторных занятий по основным темам дисциплины можно провести численный эксперимент. Например, обтекание цилиндра потоком жидкости, течение жидкости через щель в преграде, движение подводного объекта цилиндрической формы, обтекание крыла (см. рисунки 1-3) и др.



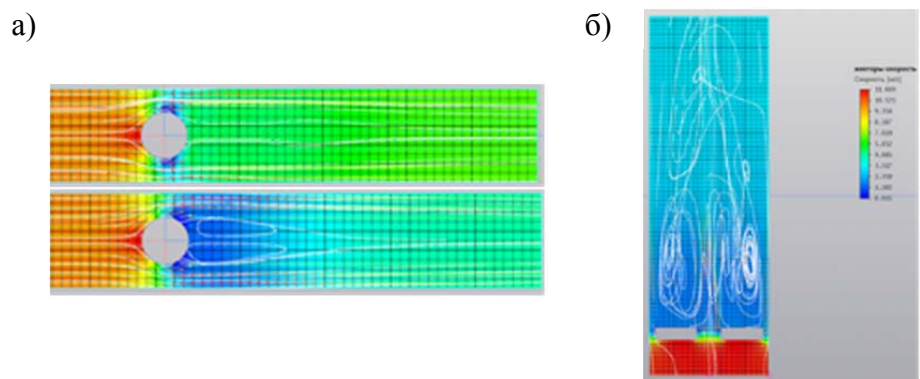


Рисунок 1 – Исследование режимов движения жидкости

а) – обтекание цилиндра; б) – течение жидкости через щель в преграде

Создаваемый в KompasFlow проект, имея доступную логику построения расчетной модели, позволяет студентам проводить отладку данных и выполнять несколько расчетов за время занятия. Ясная структура проекта с лаконичными меню и командами легко запоминаются студентами, что способствует быстрому освоению программы. Инструментарий визуализации предоставляет возможность отследить режимы движения жидкости, поля давлений и скоростей, линии тока, расчетные конечно-элементные сетки. Инструменты отображения результатов расчета выполняют построение графиков не только численных значений изучаемых характеристик, но и процесса их расчета, что позволяет проанализировать сам ход вычислений.

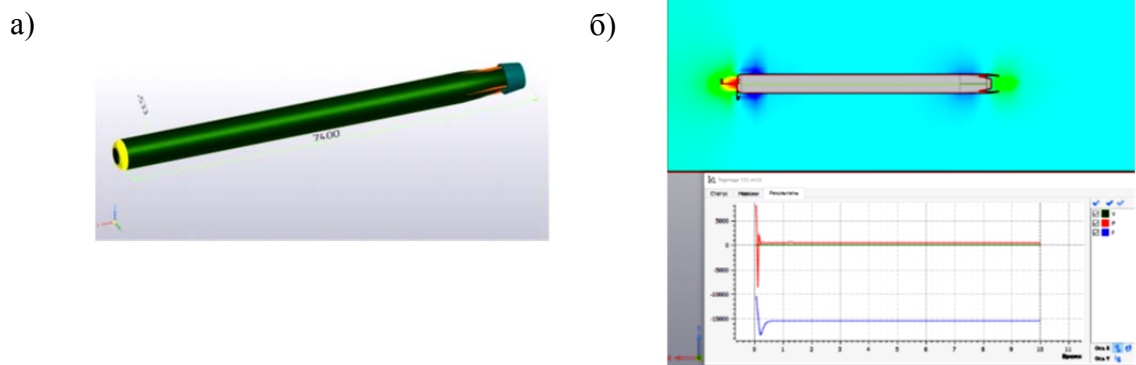


Рисунок 2 – Изучение движения тела в воде

а) – расчетная модель; б) – результаты расчета давлений и силы сопротивления

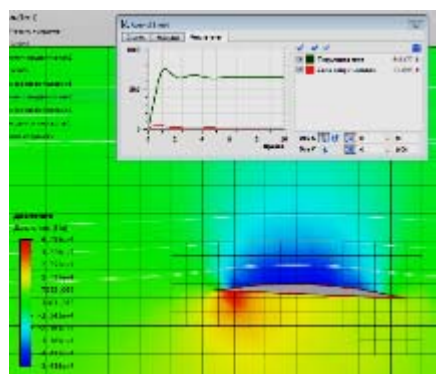


Рисунок 3 – Обтекание крыла

Возможности приложения KompasFlow позволяют исследовать и более сложные задачи, которые могут быть вынесены как на самостоятельное изучение магистрантами в течение семестра, так и быть представлены в разделах магистерских диссертаций и в научно-исследовательских проектах.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Журбина И. Н. Статический расчет конструкции палубы судна с помощью библиотеки АРМ FEM для КОМПАС-3D / Д. В. Даманский, Н. Н. Грязнова, И. Н. Журбина // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 7-11 февраля 2022 г. / редкол. : Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 489-491.

2. Даманский Д. В., Бурменский А. Д. Анализ функциональных возможностей САД-системы КОМПАС-3D в задачах трассировки судовых систем / Д. В. Даманский, А. Д. Бурменский // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 7-11 февраля 2022 г. / редкол. : Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 483-486.

УДК 621.7.043

Кузнецов Александр Константинович, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Kuznetsov Aleksandr Konstantinovich, postgraduate student, Komsomolsk-na-Amure State University

Лозовский Иван Владимирович, старший преподаватель, заведующий лабораторией, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Lozovskii Ivan Vladimirovich, Senior Lecturer, Head of Laboratory, Komsomolsk-na-Amure State University

Марьин Сергей Борисович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Авиастроение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Marin Sergey Borisovich, Doctor of technical sciences, Docent, Head of the aircraft industry department, Komsomolsk-na-Amure State University

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛАСТОСЫПУЧИХ СРЕД ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПРОФИЛЕЙ ИЗ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК**

### **APPLICATION ELASTO-FLOWING MEDIA IN THE MANUFACTURE OF PROFILES FROM SHEET BLANKS**

Аннотация. В данной статье предложен новый способ изготовления профилей из листовых заготовок гибкой в эластосыпучую среду. Описан принцип действия спроектированной и изготовленной оснастки для данного способа.

Abstract. This article proposes a new method for manufacturing flexible parts into an elastic-loose medium by the folding method. The principle of operation of the designed and manufactured tooling for this method is described.

Ключевые слова: трубчатая заготовка, профиль, летательный аппарат, гибка, свертывание, эластосыпучая среда.

Key words: tubular billet, profile, aircraft, bending, folding, elastic medium.

В гидрогазовых системах и планере летательных аппаратов нашли широкое применение элементы труб и профилей. Изготовление данных элементов возможно из листовых заготовок методом гибки [1]. На рисунке 1 показаны элементы деталей, изготавливаемые из листовых заготовок методом гибки.

Трубные заготовки и профили имеют габариты от 20 до 110 мм, выполнены из алюминиевых сплавов, коррозионностойких сталей, титановых сплавов, толщина заготовок от 1,2 до 2,0 мм.

Традиционно для изготовления профилей используют технологии штамповки в металлических инструментальных дорогостоящих штампах или гибку в эластичную среду.

Использование эластосыпучей среды при формообразовании деталей рассматривалось ранее [2, 3]. В ФГБОУ ВО «КнАГУ» был разработан новый способ, спроектирована и изготовлена технологическая оснастка для деформирования листовых заготовок эластосыпучей средой. Схема штампа для гибки листовых заготовок с применением эластосыпучих сред представлена на рисунке 2.

Отличие нового способа заключается в том, что штамп является закрытым. После формообразования в открытых штампах необходима операция калибровки. Наличие пуансонодержателя ограничивает перемещение эластосыпучей среды, что приводит к повышению точности деталей за счет распределения давления по всей поверхности заготовки.

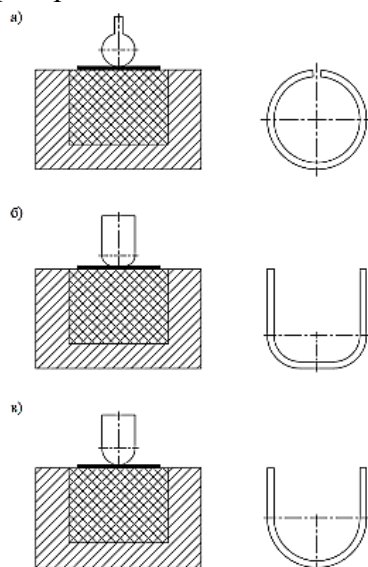
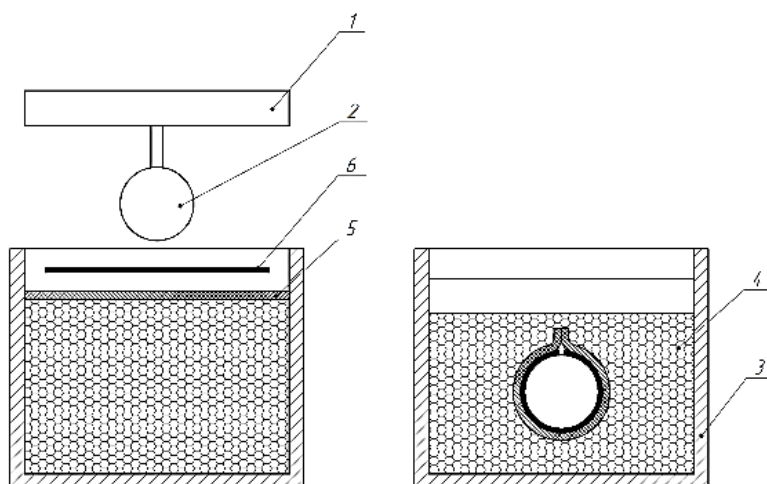


Рисунок 1 – Схемы штамповки и элементы деталей, изготавливаемые из листовых заготовок методом гибки: а – гибка по диаметру; б – двухугловая гибка в одной плоскости; в – U-образная гибка



1 – пуансонодержатель; 2 – пуансон; 3 – контейнер; 4 – полиуретановые гранулы; 5 – резиновая прокладка; 6 – листовая заготовка

Рисунок 2 – Схема штампа для гибки листовых заготовок с применением эластосыпучих сред

Сущность процесса формообразования заключается в следующем. В контейнер 3, наполненный полиуретановыми гранулами 4 диаметром 8 мм, устанавливают листовую заготовку 6 на резиновую прокладку 5. Затем посредством перемещения ползуна пресса производят штамповку в контейнер 3 с эластосыпучей средой 4. В процессе штамповки заготовка 6 прижимается к рабочей части пуансона 2 и прокладки 5, и происходит свертывание заготовки 6 в заданный диаметр. При этом полиуретановые гранулы 4 начинают сжиматься, перемещаться вверх, упираясь в пуансонодержатель 1, пуансон 2 с заготовкой 6 опускаются вниз, что приводит к формообразованию заготовки 6 со всех сторон.

В ходе проведения экспериментов по опробованию нового способа гибки листовых заготовок были получены опытные образцы деталей, показанные на рисунке 3.

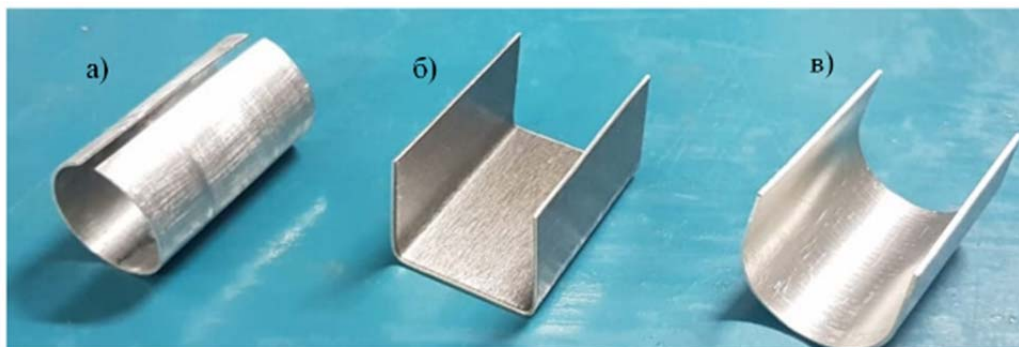


Рисунок 3 – Элементы профилей, изготовленные из листовых заготовок новым способом: а – гибка по диаметру; б – двухугольная гибка в одной плоскости; в – U-образная гибка

Преимущества данного способа формообразования:

1. Снижение усилия деформирования при штамповке, по сравнению с штамповкой в инструментальных штампах и гибкой в эластичную среду.
2. Повышение точности изготавливаемых деталей за счет калибровки листовой заготовки по пуансону.

Необходимо отметить, что в дальнейшем планируется разработка математической модели расчета передачи давления рабочего тела на заготовку и проведение исследований напряженно-деформированного состояния процессов формообразования деталей.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ходырев В.А. Применение полиуретана в листоштамповочном производстве / В.А. Ходырев / Пермь, Пермские книжные издательства, 1973. – 218 с.
2. Горяев, Р. Ф. Исследование процесса деформирования листовых заготовок эластосыпучими средами / Р. Ф. Горяев, С. Б. Марьин // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов : материалы 45-й научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 01–14 апреля 2015 года / Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 2015. – С. 129-130.
3. Пат. 138360 Российская федерация, МПК В21D 22/00. Эластичная матрица для штамповки листовых заготовок / Марьин С. Б., Маценко В. В., Горяев Р. Ф. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет" – № 2013146722/02; заявл. 18.10.2013 ; опубл. 10.03.2014, Бюл. № 7. – 3 с. : ил.

Кузнецов Эдуард Александрович, студент, Дальневосточный федеральный университет  
Kuznetsov Eduard Alexandrovich, student, Far Eastern Federal University

Котов Александр Олегович, студент, Дальневосточный федеральный университет  
Kotov Alexander Olegovich, student, Far Eastern Federal University

Кулеш Виктор Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры  
«Кораблестроение и океанотехника», Дальневосточный федеральный университет  
Kulesh Victor Anatolievich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the  
Department “Shipbuilding and Ocean Engineering”, Far Eastern Federal University

## **АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К БОРТОВОМУ НАБОРУ РЫБОЛОВНЫХ СУДОВ**

### **ANALYSIS OF REQUIREMENTS FOR THE SIDE FRAMING OF FISHING VESSELS**

Аннотация. Бортовые конструкции рыбопромысловых судов в процессе эксплуатации подвержены дополнительным нагрузкам, от сетей, траловых досок и кранцев. В связи с этим классификационные сообщества предъявляют особые требования к бортовым конструкциям, в особенности к бортовому набору. С целью обобщения имеющегося опыта проектирования различных классификационных обществ в данной работе проведен анализ требований к бортовому набору рыболовных судов. В результате работы сформулированы выводы и рекомендации по совершенствованию требований Правил классификации и постройки морских судов.

Abstract. The side structures of fishing vessels during operation are subject to additional loads from nets, trawl boards and fenders. In this regard, classification societies impose special requirements on side structures, especially side frames. In order to generalize the existing experience of designing various classification societies, this paper analyzes the requirements for the side frames of fishing vessels. As a result of the work, conclusions and recommendations were formulated to improve the requirements of the Rules of Classification and construction of marine vessels.

Ключевые слова: рыболовные суда, бортовой набор, правила, классификационные общества.

Key words: fishing vessels, side framing, rules, classification societies.

#### **Введение**

Бортовые конструкции рыбопромысловых судов подвержены воздействию различных внешних нагрузок, связанных с особенностями промысла. К таким нагрузкам можно отнести давление в местах выборки трала (рисунок 1), швартовку судов в море (рисунок 2), что особенно характерно для рыболовных судов при экспедиционном лове.



Рисунок 1 – Бортовое траление



Рисунок 2 – Швартовка в море

С целью обобщения имеющегося опыта в проектировании конструкций промысловых судов, в данной работе осуществлен анализ требований Правил различных клас-

сификационных обществ (PMPC, Lloyd и CCS) к бортовому набору. В качестве объектов анализа выбраны промысловые суда из Регистровой книги Российского Морского Регистра Судоходства.

Для анализа и сравнений использовались данные регистровой книги для более 1000 рыбопромысловых судов. Для наглядности на рисунке 3 представлено распределение длины используемых в базе данных судов от водоизмещения.

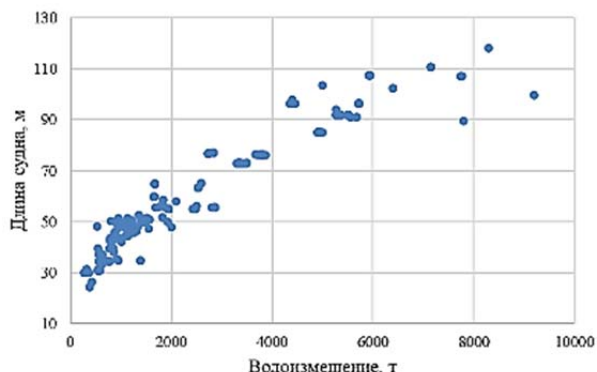


Рисунок 3 – База данных рыбопромысловых судов

### Требования к бортовому набору

Требования классификационных обществ к бортовому набору промысловых судов различаются и имеют ряд отличительных особенностей. В работе представлены требования Правил Российского Морского Регистра Судоходства (PMPC), Lloyd's Register (LR) и China Classification Society (CCS) со ссылками на соответствующий пункт Правил. Для сравнения выбраны формулы, определяющие требуемый момент сопротивления основных и рамных шпангоутов. При этом рассматривается наиболее опасный случай эксплуатации (швартовка в море, бортовое траление и т.д.).

Для расчетов принята поперечная система набора со шпацией 0,6 м и пролетом шпангоутов – 2,5 м. Рамные шпангоуты устанавливаются через 3 шпации (рисунок 4). Для упрощения сравнений установка промежуточных шпангоутов и стрингеров не рассматривается.

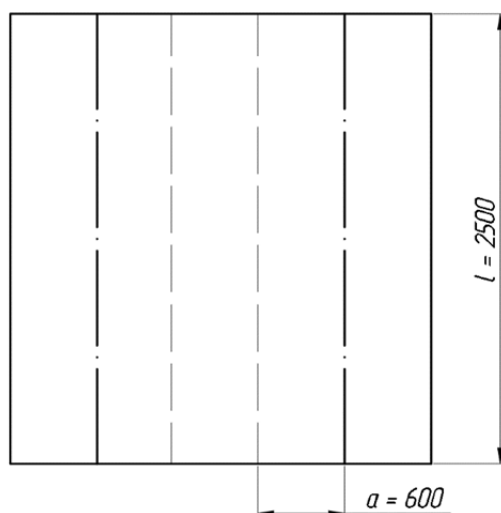


Рисунок 4 – Схема бортового перекрытия

Ниже представлены результаты расчетов по каждому из рассматриваемых классификационных обществ для момента сопротивления основных шпангоутов (ОШ). Картина распределения требуемого момента рамных шпангоутов (РШ) в зависимости от водоизмещения выглядит схожим образом и представлена на сводной диаграмме.



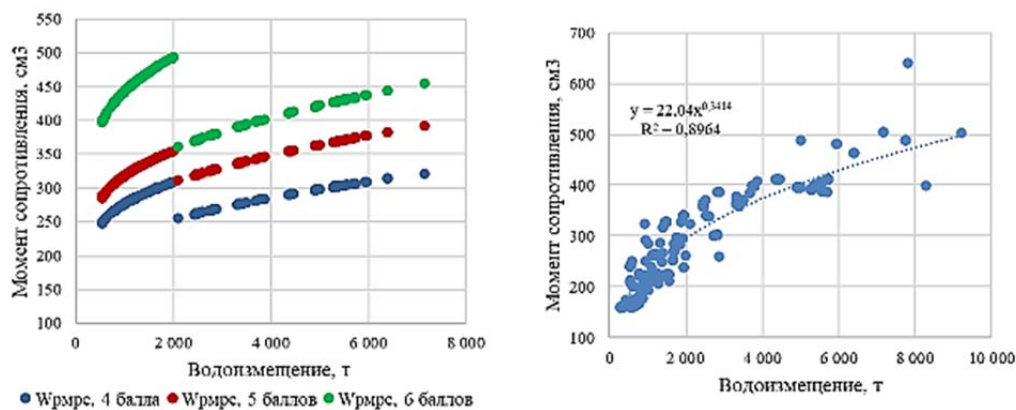


Рисунок 5 – Требуемый момент сопротивления ОШ (слева РМРС, справа LR)

Требуемые моменты сопротивлений по Правилам CCS для судов с высотой борта более 13 м могут принимать отрицательные значения. Это связано с редакционными недостатками (пункта 2.7.2.4 Правил CCS) при большой высоте борта. По этой же причине суда водоизмещением более 5000 т дают завышенные значения (рисунок 6). В сводной диаграмме дополнительно исключены крупные суда с высотой борта более 13 м.

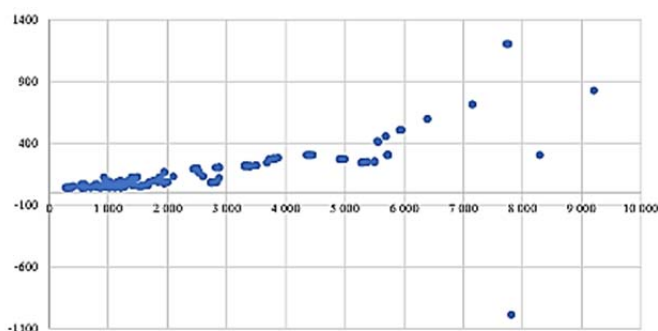


Рисунок 6 – Требуемый момент сопротивления ОШ (CCS)

### Результаты расчета

Результирующие кривые требуемого момента сопротивления для основных и рамных шпангоутов от водоизмещения объединены в сводных диаграммах (рисунок 7 – 8). При создании сводной диаграммы для момента сопротивления по Правилам РС отброшено верхнее ограничение в 7500 т, а также устранен скачек на диаграмме, за счет принятия коэффициента, зависящего от водоизмещения постоянным, как для судов водоизмещением более 2000 т.

По результатам можно сделать следующие выводы:

- 1) Правила CCS имеют существенно заниженные требования относительно РМРС и LR. В большей мере это заметно для рамных шпангоутов, где отличия в 2 и более раза.
- 2) Правила РМРС и LR имеют сопоставимый уровень требований.
- 3) Для судов малых водоизмещений требования LR близки к условиям РМРС на волнении 4 балла. Для судов водоизмещением 3000 тонн они достигают условий РМРС на волнении 5 баллов. Для судов водоизмещением более 6000 т требования LR достигают условий РМРС на волнении 6 баллов и даже более.
- 4) Правила LR вероятно учитывают волнение моря, но косвенно и отличаются от РМРС. Отметим, что в экспедициях швартовка на волнении для передачи продукции нужна малым (добывающим) судам не меньше, чем крупным (принимающим) судам. С этих позиций эффективность небольших судов, построенных по Правилам LR, в экспедициях будет ниже судов РМРС.



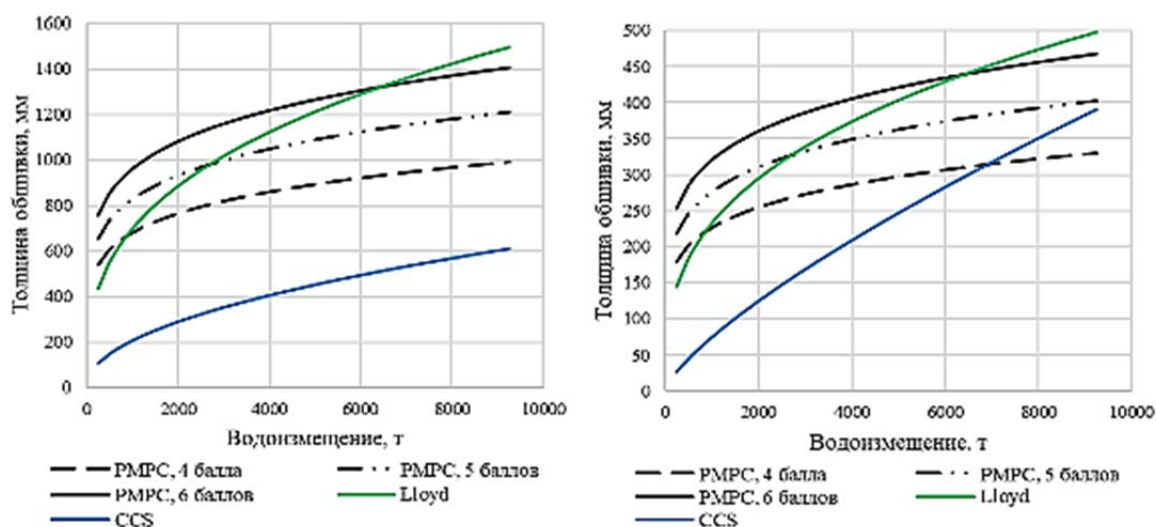


Рисунок 7 – Сводная диаграмма момента сопротивления ОШ (слева) и РШ (справа)

### Заключение

В работе проведено сравнение требований Правил РМРС и иностранных классификационных обществ к бортовому набору промысловых судов. Полученные результаты позволили оценить уровень запасов/надбавок требований правил относительно друг друга. Так суда, построенные по требованиям РМРС и LR имеют близкие значения требуемого момента сопротивления основных и рамных шпангоутов и могут эксплуатироваться приблизительно в равных условиях, в то время как суда, построенные по правилам CCS, значительно проигрывают своим аналогам по прочности. В связи с этим, суда, переходящие из-под надзора CCS в РМРС скорее всего потребуют модернизацию или будут иметь ограничения по эксплуатации.

Помимо этого, результаты работы помогли выявить имеющиеся недостатки в требованиях российских и зарубежных Правил. В Правилах РМРС следовало бы откорректировать расчетную формулу для определения давления, из-за которой на диаграмме возникает скачок (рисунок 5, слева). Зарубежным классификационным обществам стоило бы задуматься об учете влияния швартовок в море в зависимости от возможной балльности волнения.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Российский Морской Регистр Судоходства. Часть II – Корпус. – Санкт-Петербург: Российский Морской Регистр Судоходства, 2022 – 337 с.
2. Rules and Regulations for the Classification of Ships. Lloyd's Register. – London: Lloyd's Register, 2021 – 1811 p.
3. Rules for construction of ocean-going steel fishing vessels. China Classification Society. – Beijing: China Classification Society, 2018 – 483 p.
4. Барабанов Н.В., Турмов Г.П. Конструкция корпуса морских судов: Учеб. в 2 т. Санкт-Петербург: Судостроение, 2002.
5. Бронников А.В. Проектирование судов: Учебник – Ленинград; Судостроение, 1991. – 320 с.

Курманов Улан Эсембекович, кандидат технических наук, доцент, директор института, Кыргызский авиационный институт имени И. Абдраимова

Kurmanov Ulan Esenbekovich, Candidate of Engineering Sciences, docent, Director of the Institute, Ishembay Abdraimov Kyrgyzstan Aviation Institute

Сапарбекова Асель Жайлообековна, студент, Кыргызский авиационный институт имени И. Абдраимова

Saparbekova Asel Zhailoobekova, student, Ishembay Abdraimov Kyrgyzstan Aviation Institute

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНАЖЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ И ТРЕНИРОВКИ АВИАЦИОННОГО ПЕРСОНАЛА**

### **MODERN TRAINING DEVICES FOR PREPARING AND TRAINING OF AVIATION PERSONNEL**

Аннотация. Комплексные тренажеры самолетов (КТС), поступающие в эти подразделения, позволяют отрабатывать взлет и посадку ВС, полет по маршруту, выполнение операций в нормальных и аномальных условиях и режимах полета, которые в реальном полете воспроизводить небезопасно или невозможно.

Abstract. Comprehensive aircraft simulators (CAS) supplied to these divisions make it possible to practice aircraft takeoff and landing, en-route flight, operations under normal and abnormal conditions and flight modes which are unsafe or impossible to reproduce in real flight.

Ключевые слова: комплексные тренажеры самолетов (КТС), контрольно-проверочная аппаратура (КПА), элемент бортового оборудования, авиационная техника.

Key words: comprehensive aircraft simulators (CAS), control and testing equipment, an element of on-board equipment, aviation technique.

Одним из наиболее действенных средств формирования и развития знаний и профессиональных навыков, необходимых авиационному персоналу в реальных условиях деятельности, являются [1] современные тренажерные комплексы и устройства.

В настоящее время существует огромное количество современных тренажерных устройств в подразделениях авиакомпаний, эксплуатирующих современную авиационную технику. Комплексные тренажеры самолетов (КТС), поступающие в эти подразделения, позволяют отрабатывать взлет и посадку ВС, полет по маршруту, выполнение операций в нормальных и аномальных условиях и режимах полета, которые в реальном полете воспроизводить небезопасно или невозможно [1]. Одновременно увеличивается сеть авиационных учебных центров по всему миру по подготовке лётного состава, которые оснащены современными КТС самых различных типов самолетов. Кроме КТС, обладающих наибольшей полнотой моделируемых систем управляемых объектов (в данном случае ВС) и предназначенных для отработки программ в целом, при подготовке лётного состава используются также и более простые тренировочные средства, как процедурные тренажеры, которые по объему моделирования и этапности формирования профессиональных навыков можно подразделить на специализированные, функциональные, а по способу их выполнения или сопряжения с аппаратурой - на встроенные, тренажеры-приставки, автономные [1].

Из основных характеристик, влияющих на эффективность применения указанных тренажеров, нужно выделить следующие:

- степень приближения условий тренировок к реальным;
- глубина проработок методик обучения операторов с учетом закономерностей формирования навыков у обучаемых [1];
- формирование упражнений дозированно-прогрессирующей сложности;

- организация учебно-тренировочного процесса индивидуализировано, с учетом функциональных обязанностей и возможностей оператора;
- использование таких методических приемов, как повторное воспроизведение особо сложных элементов [1] упражнений;
- объективность и контроль процесса и результатов обучения.

Вышеизложенное служит иллюстрацией тому, какое внимание уделяется качеству подготовки лётного состава, для авиакомпаний, эксплуатирующих современную авиационную технику.

Оснащение современного воздушного судна (ВС) сложнейшей бортовой аппаратурой требует комплексного подхода к проблемам повышения уровня безопасности полетов, а также вероятности успешного выполнения возложенных на него задач.

В современных условиях процесс подготовки авиационного персонала, обслуживающего авиационную технику, требует использования таких же передовых средств и методов, как и процесс подготовки лётного состава.

Необходимость изменения отношения к подготовке авиационного наземного технического персонала, к тренировке по поддержанию у него высокого уровня профессиональных навыков уже достаточно ясно ощущается в авиакомпаниях и их подразделениях, эксплуатирующих сложную и современную авиационную технику.

Так, в лабораториях и мастерских авиационно-технических центров эксплуатационных подразделений появились цифровые компьютерные стенды, которые помогают инженерно-техническому персоналу прогнозировать, моделировать и отрабатывать единую и комплексную методику поддержания лётной годности ВС и выполнения всех технологических операций. Такие стенды, как правило, содержат общую схему агрегата, характерные неисправности, методы их устранения, основные технические характеристики, перечень необходимой контрольно-проверочной аппаратуры (КПА) и наиболее распространенные ошибки специалистов. Такие наглядные пособия позволяют авиационно-техническому персоналу одновременно определять объем и характер предстоящих регламентных работ и дают возможность избегать просчетов.

Поставляемая сегодня в авиакомпании современная авиационная техника обеспечивается методическими и наглядными пособиями, которые должны способствовать полноценному и комплексному освоению этой техники на местах. В основном, все эти средства подготовки личного состава объединены в единый методический центр.

Задачи, выдвигаемые перед учебно-методическими центрами, как правило, отражают современные тенденции по этим проблемам. Здесь присутствует и системный подход к изучению всего авиационного комплекса, и стремление использовать тренажерную аппаратуру в процессе подготовки инженерно-технического состава.

Современные авиационные учебные заведения и центры призваны:

- обеспечивать при организации и проведении учебных занятий и тренировок созданием для слушателей обстановки и условий максимально приближенным к реальным;
- соответствовать по содержанию требованиям к авиационной технике и средствам обеспечения, находящимся в эксплуатации;
- отражать физический смысл существующих ограничений и меры безопасности при обслуживании и эксплуатации авиационной техники на земле и в воздухе [2];
- раскрывать физическую сущность особых случаев в полете и действия авиационного персонала при этом;
- выражать лаконично, точно и наглядно главное, и существенное в изучаемом объекте;
- обеспечивать объективный контроль [3] за качеством выполнения обучаемыми упражнений на тренажерной технике.

Однако в настоящее время в них тлеются, в основном, стенды, макеты и витрины с установленными образцами оборудования и деталями, с детализировкой и разрезами сложных узлов, а также схемы и плакаты, отражающие назначение и решаемые задачи,

тактико-технические данные и состав, размещение и монтаж элементов систем на самолете и др.

Для первоначального, обучения наземного авиационного технического персонала должны использоваться КТС и положительный опыт обучения пилотов. Это позволит под наблюдением опытных инструкторов усвоить учебный материал и выработать требуемые навыки, а также даст возможность использования средств объективной оценки обученности и адаптивных систем обучения.

Проведя некоторую параллель между деятельностью летного состава и технического персонала, обслуживающего современную авиационную технику, можно с достаточной достоверностью предположить, что направления подготовки летного состава и технического состава также схожи. Подготовка технического и летного состава обязательно должна охватывать три аспекта:

- процесс (программы) первоначального обучения;
- процесс (программы) переучивания;
- программы тренировки и поддержания профессиональных навыков в процессе эксплуатации ВС.

На рисунке 1 представлены современные средства, которые используются при подготовке авиационного персонала. Если первые четыре наиболее используются и доступны, то обучающие машины и специальные тренажерные устройства начали получать распространение только в последнее время. Дальнейшее развитие и внедрение цифровых платформ позволит повысить качество подготовки авиационного персонала и соответственно безопасность полетов.



Рисунок 1 – Средства, используемые для подготовки и тренажа инженерно-технического состава

Применение тех или иных средств в общем процессе подготовки технического персонала должно иметь обоснование как, с точки зрения учебно-методической эффективности, так и с позиции экономической целесообразности. На рис.2 представлен ряд проблем, решение которых, по нашему мнению, может повлиять на расширение использования и повышение эффективности применения обучающих машин и тренажерных средств в подготовке инженерного и технического персонала. Из перечисленных проблем особо хотелось наделить задачу обоснования возможности использования существующих КТС для подготовки наземного обслуживающего персонала.

Современный комплексный тренажер – это суперсложное цифровое и техническое устройство, предназначенное для обучения и тренировки летного состава. КТС моделируют с точностью до 95% поведение и характеристики реального изделия, во всем диапазоне его эксплуатационных режимов, а также функционирование практически всех бортовых систем при штатных и отказных (нештатных) режимах работы. С рабочего места пилота-инструктора современного КТС легкого класса предусматривается введение большого количества отказов. Тренажеры самолетов тяжелого класса, как Боинг-747, Боинг-767, предусматривают возможность имитации тысячи отказов.

Специалисты, работающие в области авиационного тренажеростроения, считают, что у современного самолета существует не менее 500 случаев отказов и нештатных ситуаций, которые необходимо имитировать на тренажере. Совершенствование тренажеров, введение новых цифровых решений, вопреки ожиданиям, повлияло на количество имитируемых отказов.



Рисунок 2 – Проблемы влияющие на повышение эффективности использования тренажерных средств в подготовке инженерно-технического персонала

На основе результатов рассмотрения характера имитации этих отказов, вводимых инструктором со своего пульта, можно сказать, что в большинстве они связаны с тем или иным видом отказов бортового оборудования. В задачу же технического персонала как раз и входят поиск отказавшего элемента (блока) бортового оборудования, анализ причин и отработка технологических приемов устранения выявленного отказа, а также отработка навыков прогнозирования отказов при выполнении регламентных работ.

Таким образом, можно предположить, что анализ существующих технических возможностей комплексных тренажеров выявит их способность обеспечивать тренировку ИТС в выполнении основного объема работ, предусмотренных регламентом по обслуживанию реального самолета. Как было сказано, совершенствование конструкции КТС привело к некоторому повышению общего количества имитируемых отказов. Вместе с тем, увеличение мощности дало возможность углубить моделирование процессов, происходящих в бортовом оборудовании, в том числе и во время имитации отказов техники, вводимых с пульта инструктором.

Проводимые периодически обследования по оценке загрузки тренажеров, находящихся в эксплуатации, показывают, что в большинстве случаев, имеющаяся техника, предназначенная для обучения и тренировки летного состава, не загружена, даже при работе в одну смену. По результатам таких же обследований можно сделать вывод, что приблизительно 30 % (в отдельных случаях и до 50 обусловленного суточного ресурса КТС при надлежащей организации процесса тренировки можно эффективно использовать для подготовки ИТС. Кроме того, это позволит более равномерно использовать ресурсы составляющих систем тренажера.

Сегодня КТС – это мощный компьютерный центр, адаптивная система объективного контроля обучения, новейшие цифровые решения для моделирования отдельных систем, самая высокая точность моделирования критических режимов. Все это позволяет значительно повысить роль КТС в подготовке ИТС.

В заключение, хотелось бы еще раз подчеркнуть, что решение проблемы подготовки ИТС даст возможность решить задачу качественного обслуживания современной авиационной техники, что в конечном итоге положительно скажется на повышении уровня безопасности полетов. В современных условиях качественно повлиять на степень подготовленности ИТС к обслуживанию авиационной техники можно только за счет научно обоснованного использования всех возможных средств обучения начиная от текстового материала и сложнейшими тренажерными устройствами, охваченными единой адаптивной системой обучения и объективного контроля обученности. Постынный рост парка КТС дает возможность модернизировать процесс подготовки технических кадров для обслуживания авиационной техники.

Развитие технических средств подготовки персонала, обслуживающего авиационную технику, показывает, что разрабатываются и внедрены специальное программное обеспечение, объединяющиеся в обучающие системы, снабженные дополнительной системой объективного контроля качества и обученности слушателей.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тявкин, И. В. Аналитические и процедурные модели для информационной системы симуляции полета группы воздушных судов : специальность 05.25.05 «Информационные системы и процессы» : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Тявкин Игорь Владимирович ; Тамбовский Государственный технический университет. – Тамбов, 2012. - 16 с.

2. Об утверждении Федеральных авиационных правил организации учебной базы в частях государственной авиации : Приказ Министра обороны РФ от 9 октября 2001 г. № 412 // Собрание законодательства РФ. – 2001.

3. Кругликов С.В. Тренажерные системы боевых расчетов командных пунктов // Наука и военная безопасность. 2004. № 1. С. 51-54.

4. Подготовка на тренажерах / С. П. Хлынин // epizodyspace.ru : информационный портал. – Раздел сайта «Эпизоды космонавтики». – URL: <https://epizodyspace.ru/bibl/beregov/kosm-akad/04.html> (дата обращения: 05.11.2022).

5. Тявкин, И. В. Аналитические и процедурные модели информационного пространства музея нобелистики : специальность 05.25.05 «Информационные системы и процессы» : дис. ... канд. техн. наук / Тявкин Игорь Владимирович ; Тамбовский Государственный технический университет. – Тамбов, 2008. - 207 с.

УДК 621.98

Лозовский Иван Владимирович, старший преподаватель, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Lozovsky Ivan Vladimirovich, Senior Lecturer, Komsomolsk-na-Amure State University

Седунов Ярослав Алексеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Sedunov Yaroslav Alekseevich, student of Komsomolsk-na-Amure State University

#### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОЛУПАТРУБКА ГИДРОГАЗОВОЙ СИСТЕМЫ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

#### **MODELING OF THE PROCESS OF FORMING A HALF-PIPE OF A HYDRO-GAS SYSTEM OF AN AIRCRAFT**

Аннотация. В данной работе рассматривается моделирование процесса формообразования полупатрубка топливной системы летательного аппарата из листовой заготовки в программе PAM Stamp. В результате моделирования выявлены дефекты при формооб-

разовании детали и внесены изменения в штамповую оснастку. В последнем варианте технологии дефекты не обнаружены.

Abstract. In this paper, modeling of the process of forming a half-tube of an aircraft fuel system from a sheet billet in the PAM Stamp program is considered. As a result of modeling, defects in the shaping of the part were identified and changes were made to the die tooling. No defects were found in the latest version of the technology.

Ключевые слова: штамповка эластичными средами, технологическая оснастка, авиационные конструкции, гидрогазовые системы летательных аппаратов, моделирование технологических процессов.

Key words: stamping with elastic media, technological equipment, aircraft structures, hydro-gas systems of aircraft, modeling of technological processes.

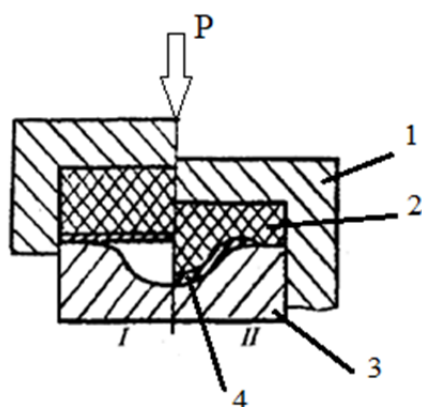
Штамповка деталей с применением эластичной среды нашла широкое применение в производстве летательных аппаратов (ЛА), что объясняется большой номенклатурой штампованных деталей в конструкции ЛА, простотой и универсальностью штамповой оснастки. В качестве эластичной среды обычно используют резину или полиуретан. Для того чтобы сменить одну операцию другой, достаточно поменять всего одну деталь оснастки – формблок. Это обстоятельство позволяет значительно сократить время на подготовку производства, отладку штампового инструмента, что в условиях единичного или мелкосерийного производства, к которому и относится производство ЛА, дает значительный экономический эффект [1].

Вытяжка эластичными средами подразумевает два способа штамповки:

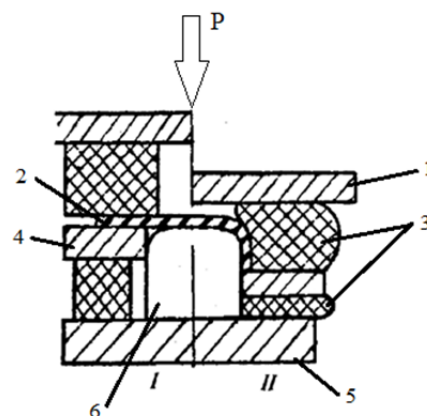
- 1) штамповка эластичным пуансоном (рисунок 1);
- 2) штамповка эластичной матрицей (рисунок 2).

Заготовку укладывают на матрицу 3 (рисунок 1) или на пуансон 6 (рисунок 2). Эластичная среда, опускаясь, прижимает заготовку к матрице 3 или прижиму 4 и вдавливает её в матрицу или обтягивает по пуансону, формообразуя деталь [1].

В последнее время резину заменяют полиуретаном, который обладает весьма высокой твёрдостью, эластичностью и износостойкостью (выдерживает до 50000 штамповок), что позволяет существенно увеличить срок службы таких штампов [1].



1 – контейнер; 2 - эластичный пуансон;  
3 – жёсткая матрица; 4 – листовой материал  
Рисунок 4 – Вытяжка резиновым пуансоном



1, 4- прижим; 2 – листовой материал;  
3 – эластичная матрица;  
5 – подштамповая плита; 6 – жёсткий  
пуансон

В ходе изучения штамповки эластичными средами в программе PAM Stamp был смоделирован процесс формообразования детали типа «полупатрубок» топливной системы самолёта из листового материала 12X18H10T-M (коррозионностойкая сталь) эластичной средой [2].



По электронной модели детали рассчитана развертка. С целью обеспечения фиксации заготовки на формблоке были выполнены приливы материала на заготовке с отверстиями (рисунок 3).

Была предпринята попытка формообразования детали по жесткому формблоку за один переход. Однако этот способ был отклонен из-за появления складок (рисунок 4).

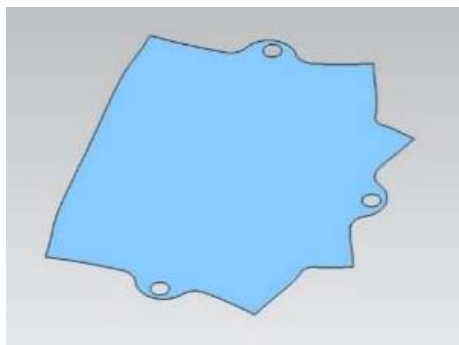


Рисунок 3 – Модель развёртки детали

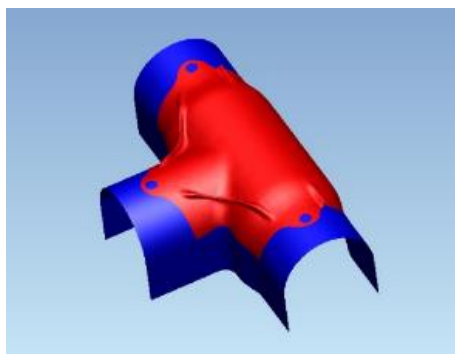
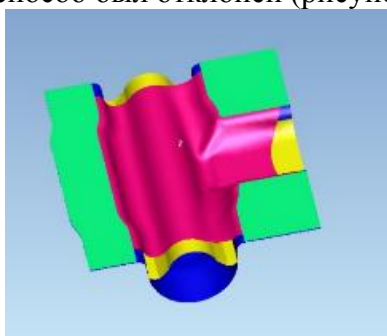


Рисунок 4 – Дефекты при формообразовании детали по жесткому формблоку за один переход

Было принято решение о получении детали реверсивной вытяжкой с жестким пуансоном. Процесс вытяжки состоял из 2 шагов. На первом шаге, с помощью эластичной среды, заготовку давили до реверсивного вкладыша (рисунок 5, а). На втором шаге жесткий пуансон продавливал заготовку, в итоге получались множественные гофры, из-за чего способ был отклонён (рисунок 5, б).

а)



б)

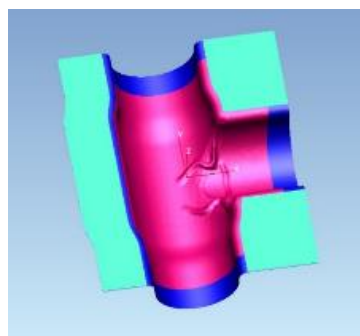


Рисунок 5 – Реверсивная вытяжка с жёстким пуансоном

В итоге деталь была получена способом вытяжки в три перехода с помощью жестких вкладышей (рисунок 6).

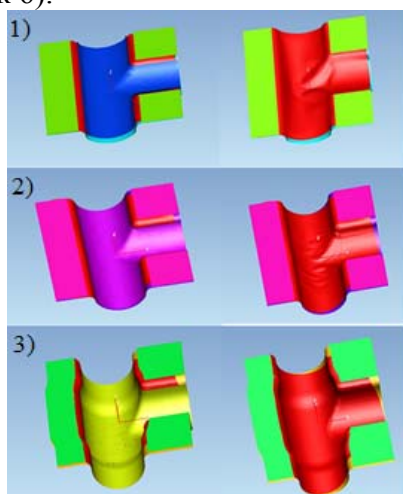


Рисунок 6 – Штамповка полупатрубка эластичной средой способом вытяжки в три перехода с помощью жёстких вкладышей

В процессе работы для детали «полупатрубок» произведено моделирование процесса вытяжки с использованием жесткого вкладыша. Расчеты показали возможность формообразования детали эластичной средой с помощью жесткого вкладыша. В последнем варианте дефектов формообразования (гофрообразование и разрыв материала) не наблюдалось.

В результате моделирования процесса формообразования были выявлены основные дефекты, возникающие при данной технологической операции: гофрообразование и складкообразование. Моделирование процесса формообразования позволяет рассмотреть различные варианты штамповой оснастки, определить оптимальные параметры и оптимизировать технологию на стадии моделирования, что в значительной степени уменьшает затраты времени и ресурсов в производстве, а также повышает качество изделия [3].

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Материаловедение и технология металлов: учебник для вузов / Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман, В. М. Матюнин [и др.] - Москва : Высшая школа, 2001. - 638 с.
2. Лепестов, А. PAM-STAMP 2G: виртуальное моделирование процесса штамповки / А. Лепестов // САПР и графика. – 2014. – № 10(216). – С. 87-90.
3. Моделирование процессов гибки листовых заготовок эластичными и эластосыпучими средами / С. Б. Марьин, Д. Г. Колыхалов, В. В. Мироненко, В. В. Маценко // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2014. – № 4. – С. 42-45.

УДК 629.5.015:532.5:004.9

Мерзликина Владислава Сергеевна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Merzlikina Vladislava Sergeevna, student, Komsomolsk-na-Amure State University  
Каменских Ираида Витальевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Кораблестроение и компьютерный инжиниринг», Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
Kamenskikh Iraida Vitalievna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department «Shipbuilding and Computer Engineering», Komsomolsk-na-Amure State University

#### **РАСЧЕТ ОБТЕКАНИЯ ПОГРУЖЕННОГО КРЫЛА В ПРОГРАММЕ КОМПАСFLOW**

#### **CALCULATION OF THE FLOW AROUND THE SUBMERGED WING IN THE KOMPASFLOW PROGRAM**

Аннотация. Приведены результаты расчета обтекания крыла жидкостью в программе KompasFlow. Проводится сравнение с ранее полученными результатами во Flow-3D. Отмечены особенности расчета и преимущества использования KompasFlow в учебном процессе при подготовке магистров кораблестроителей.

Abstract. The results of calculating the flow around the wing with liquid in the KompasFlow program are presented. A comparison is made with the previously obtained results in Flow-3D. The features of calculation and advantages of using KompasFlow in the educational process in the preparation of masters of shipbuilders are noted.

Ключевые слова: обтекание крыла жидкостью, гидродинамика, KompasFlow.

Keywords: fluid flow around the wing, hydrodynamics, KompasFlow.

В настоящее время происходит переход на отечественное программное обеспечение, как в отраслях экономики, так и в научно-образовательной сфере. В Комсомольском-на-Амуре государственном университете по соглашению о сотрудничестве с ОА АСКОН в учебный процесс внедряется система компьютерного моделирования КОМПАС–3D. КОМПАС–3D используется для моделирования сложных полнонаборных пространственных конструкций судов и их подсистем, а приложения к нему KompasFlow и APM FEM, разработанные компаниями ТЕСИС и ООО Научно-технический центр «АПМ» (партнеры компании АСКОН в составе консорциума «Раз-ВИТие»), используются в расчетах гидро-газодинамики и инженерного анализа. Выполненные расчеты используются в рамках подготовки магистерских диссертаций и студенческих конкурсных работ.

В дисциплине «Проблемы гидродинамики и теории корабля» программа KompasFlow используется впервые. Изучение поступательного движения тел в жидкости в разделе дисциплины «Проблемы гидродинамики теории корабля» (программа подготовки магистров по направлению 26.04.02) выполняется на примере изучения обтекания потоком жидкости погруженного крыла. Рассматривается крыло сегментного профиля. Крыло ориентировано относительно потока воды на малый угол атаки. Ранее на лабораторных занятиях по данной дисциплине численное моделирование и решение такой задачи выполнялось в программе FLOW-3D. В [1] описаны этапы решения: создание модели исследуемого объекта, задание свойств жидкости и условий обтекания, создание расчетной конечно-элементной сетки, граничных условий, выполнение расчета, анализ результатов и уточнение модели, анализ сходимости. В процессе моделирования и расчета возникали некоторые особенности. Трехмерная модель крыла создавалась в программе AutoCAD и затем использовалась в формате STL в программе FLOW-3D.

Для вычисления значений давлений, силы сопротивления и подъемной силы с приемлемой точностью исходная конечно-элементная сетка имела довольно большую размерность. Допущение об однородности поля давлений позволяло сделать переход от трехмерной задачи к плоской (рисунок 1, 2), но в ограниченное время аудиторного занятия расчет процесса обтекания проводился при довольно грубой конечно-элементной сетке. Уточнение результатов расчета в программе FLOW-3D достигается за счет увеличения общего количества ячеек, сгущения сетки в области изменения потока и геометрии объекта, наложения дополнительной сетки. В результате было проведено сгущение сетки (рисунок 2, а). Выполненный расчет позволил уточнить распределение поля давлений вокруг крыла (рисунок 2, б).

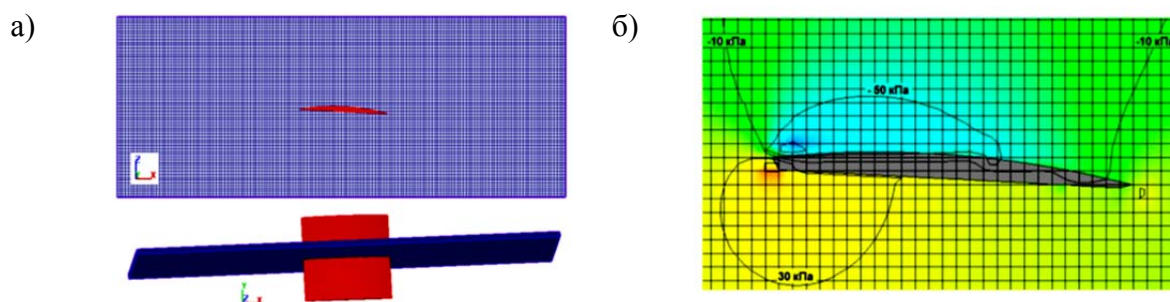


Рисунок 1 – Расчет при начальной расчетной сетке (FLOW-3D)  
а) – модель крыла в расчетной сетке; б) – поле давлений

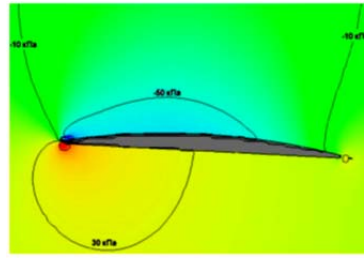
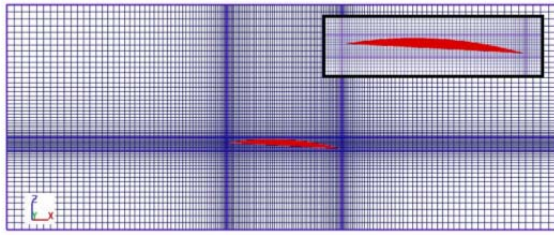


Рисунок 2 – Уточнение значений (FLOW-3D):

- а) – сгущение сетки в районе крыла по высоте и ширине;
- б) – уточненное поле давлений

В рамках применения нового отечественного программного обеспечения в учебном процессе на лабораторных занятиях студентами в системе Компас-3D создана модель крыла: в плоскости XOY построен эскиз поперечного сечения крыла по размерам указанным в [1] (рисунок 3, а), с помощью инструментов твердотельного моделирования построено крыло в пространстве и выполнено построение расчетной области (рисунок 3, б). У студентов, обладающих хорошими навыками трехмерного моделирования, данный процесс занимает не более 10 минут.

Первоначально для расчета значений подъемной силы и силы сопротивления построена по расчетной области «грубая» конечно-элементная сетка количество ячеек по оси OX –80; OY –40; OZ – 10 (рисунок 4, а). В расчетной области на крыло набегают поток пресной воды со скоростью 15 м/с. Расчеты проводились для нескольких вариантов конечно-элементной сетки с использованием адаптации сетки по решению – давлению (рисунок 4). В расчете используется стандартная k-ε модель турбулентности (в приложении реализована пока только эта модель), решается уравнение движения Навье-Стокса. Силы гравитации в этой задаче не учитываются. Значения подъемной силы и силы сопротивления определены с допустимой точностью.

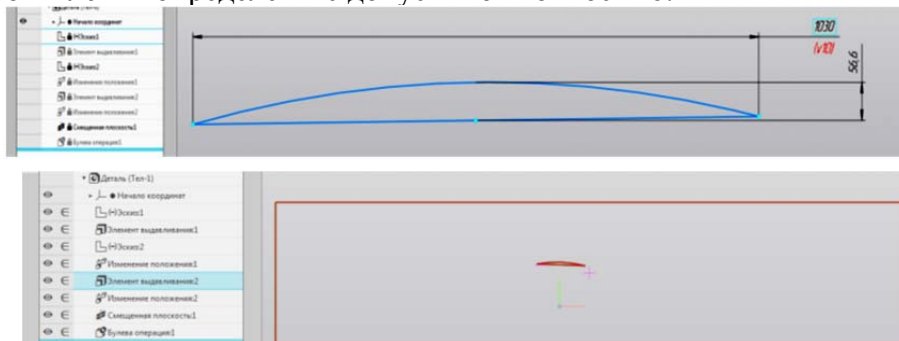


Рисунок 3 – Модель крыла в Компас-3D и расчетная область

Картина распределения давлений по поверхности крыла полностью совпадает с распределением давлений на рисунках 1 и 2. Можно отметить достоверность отображения процесса обтекания крыла водным потоком даже при довольно грубой конечно-элементной сетке. В процессе расчета не происходит «отсечение» острых кромок крыла, как это проявилось в расчете во FLOW-3D (рисунок 1, б), но происходит замена дуги окружности на ломаную (при подключении «адаптации по решению»). В результате в отображаемом поле низких давлений в узлахлома появились локальные минимумы.

При выполнении численного моделирования в приложении KompasFlow все меню и элементы проекта «общаются» с пользователем на русском языке (в отличие от FLOW-3D, где используется английский язык), что очень удобно на учебных занятиях. Результаты численного моделирования гидродинамики подводного крыла в приложении KompasFlow наглядно поясняют студентам физические процессы и позволяют оценить нагрузки при проектировании конструкций судов с динамическими принципами поддержания во время учебных занятий и при самостоятельной подготовке.

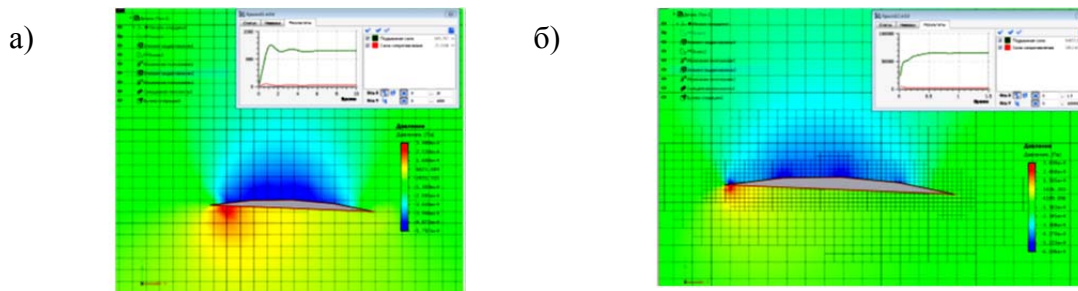


Рисунок 4 – Результаты расчета в программе KompassFlow:  
 а) – расчет в «грубой» сетке; б) – расчет с «адаптацией по решению»

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чижиумов, С. Д. Проблемы гидродинамики корабля (численное моделирование): учеб. пособие / С. Д. Чижиумов, И.В. Каменских, А.Д. Бурменский. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. – 122 с.

УДК 621.735

Мин Ко Хлайнг, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
 Min Ko Hlaing, postgraduate student, Komsomolsk-na-Amure State University  
 Потянихин Дмитрий Андреевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Авиастроение», Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
 Potianikhin Dmitrii Andreevich; Associate Professor of Aircraft Construction Department, Komsomolsk-na-Amure State University  
 Синельщиков Александр Андреевич, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет  
 Sinelshchikov Aleksandr Andreevich, postgraduate student, Komsomolsk-na-Amure State University

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТ ТРЕХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МУНИ-РИВЛИНА ДЛЯ ЭЛАСТИЧНОГО МАТЕРИАЛА

#### EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE OF THE THREE-PARAMETER MUNI-RIVLIN MODEL CONSTANTS FOR THE ELASTIC MATERIAL

Аннотация. Представленная работа посвящена определению механических характеристик эластичного материала по трехпараметрической модели Муни-Ривлина. Исходные данные получены из эксперимента, проведенного для трех цилиндрических образцов эластичного материала. Определение констант Муни-Ривлина в первом приближении осуществлялось методом наименьших квадратов без учета силы трения. Окончательные значения констант Муни-Ривлина получены в результате вычислений в системе инженерного анализа ANSYS с учетом силы трения. Полученные в результате вычислений механические характеристики материала показали удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

Abstract. The presented work is devoted to the determination of the elastic material mechanical characteristics by the three-parameter Mooney-Rivlin model. The initial data were obtained from an experiment conducted for three cylindrical samples of elastic material. The determination of the Mooney-Rivlin constants in the first approximation was carried out by the least squares method without taking into account the friction force. The final values of the



Mooney-Rivlin constants were obtained as a result of calculations in the CAE ANSYS, taking into account the friction force. The mechanical characteristics of the material obtained as a result of calculations showed a satisfactory agreement with the experimental data.

Ключевые слова: раздача эластичной средой, гиперэластичный материал, модель Муни-Ривлина, метод наименьших квадратов, метод конечных элементов, система инженерного анализа ANSYS.

Key words: expansion by elastic filler, hyperelastic material, Mooney-Rivlin model, least squares method, finite element method, CAE ANSYS.

Авиационная отрасль машиностроения отличается повышенными требованиями к размерно-геометрической точности и обеспечению требуемой прочности изготавливаемых деталей при их минимальной массе. Это обуславливает широкое применение титановых сплавы в авиационных конструкциях, поскольку титан обладает сравнительно высокой удельной прочностью в сравнении с другими металлами. Структура и механические свойства титановых сплавов ограничивают возможности его холодного деформирования, что сопровождается большей вероятностью образования дефектов, вызванных потерей устойчивости или трещинообразованием, а нагрев заготовки, часто применяемый в процессе деформирования [1], приводит к увеличению себестоимости изделий. В таких условиях целесообразно провести теоретические расчеты по определению технологических параметров для формообразующих операций в холодном состоянии.

Одними из основных процессов получения деталей при производстве летательных аппаратов являются способы обработки давлением листовых заготовок [2–5]. Такие детали трубопроводов пневмогидравлических систем, как «муфта», «фитинг», «переходник» и ряд других, могут быть изготовлены способом раздачи средней части с использованием давления внутреннего наполнителя [6]. Под раздачей, согласно ГОСТ 18970-84, понимается формообразующая операция листовой штамповки, заключающаяся в увеличении размеров поперечного сечения части полый заготовки путем одновременного воздействия инструмента по всему её периметру.

Целью настоящей работы является определение механических свойств эластичной среды – наполнителя из гиперупругого материала. В расчетах используется модель гиперупругого материала Муни-Ривлина, популярная в широком спектре областей науки и техники.

В модели несжимаемого изотропного упругого тела Муни-Ривлина полиномиальная трехпараметрическая функция энергии деформации имеет вид [7]

$$W(I_1, I_2, I_3) = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3),$$

где  $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$ ,  $I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2$ ,  $I_3 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2$  – инварианты тензора деформаций, записанные через главные удлинения  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ , которые равны (рисунок 1)

$$\lambda_1 = h_0 / h_i, \lambda_2 = \lambda_3 = d_0 / d_i,$$

где  $h_0$  – начальная высота образца,  $h_i$  – высота образца в  $i$ -ый момент времени,  $d_0$  – начальный диаметр образца,  $d_i$  – диаметр образца в  $i$ -ый момент времени. Диаметр  $d_i$  определяется из условия несжимаемости образца:

$$\frac{\pi d_0^2}{4} h_0 = \frac{\pi d_i^2}{4} h_i, \text{ откуда } d_i = \sqrt{\frac{d_0^2 \cdot h_0}{h_i}},$$

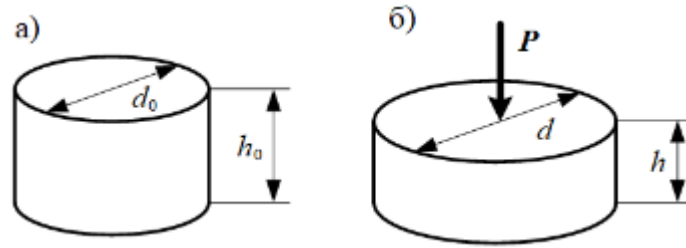


Рисунок 1 – Схема деформирования эластичного материала  
а) исходное состояние; б) состояние в процессе сжатия

Для несжимаемого изотропного материала при деформировании третий инвариант  $I_3 = 1$ , тогда

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \sqrt{1/\lambda_1}, \quad I_1 = \lambda_1^2 + 2/\lambda_1, \quad I_2 = 2\lambda_1 + 1/\lambda_1^2$$

Напряжения в первом главном направлении могут быть записаны в виде

$$\sigma_{11} = 2 \left( \lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1} \right) \left[ \frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \right]. \quad (1)$$

Константы Муни-Ривлина получены путем минимизации среднеквадратичного отклонения теоретических напряжений от экспериментальных:

$$E^2 = \sum_{i=1}^n (\sigma_{11}(\lambda_i) - (\tilde{\sigma}_{11})_i)^2 \rightarrow \min.$$

Здесь и далее  $\lambda_i$  обозначает удлинение  $\lambda_1$  в направлении действия сжимающей силы, соответствующее  $i$ -му моменту времени;  $\sigma_{11}(\lambda_i)$  – теоретическое значение напряжения (1), соответствующее удлинению  $\lambda_i$ ;  $(\tilde{\sigma}_{11})_i$  – напряжение в  $i$ -й момент времени. Учитывая, что частные производные по первому и второму инвариантам тензора деформаций равны

$$\frac{\partial W}{\partial I_1} = \frac{C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3)}{\partial I_1} = C_{10} + C_{11} \left( 2\lambda_1 + \frac{1}{\lambda_1^2} - 3 \right),$$

$$\frac{\partial W}{\partial I_2} = \frac{C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3)}{\partial I_2} = C_{01} + C_{11} \left( \lambda_1^2 + \frac{2}{\lambda_1} - 3 \right),$$

среднеквадратическая ошибка примет вид

$$E^2 = \sum_{i=1}^n \left( \sigma_i - 2 \left( \lambda_i^2 - \frac{1}{\lambda_i} \right) \left[ C_{10} + \frac{1}{\lambda_i} C_{01} + C_{11} \left( \frac{3}{\lambda_i^2} (\lambda_i^2 - 1) (\lambda_i - 1) \right) \right] \right)^2.$$

Коэффициенты модели Муни-Ривлина  $C_{10}, C_{01}, C_{11}$  определяются из системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial E^2}{\partial C_{10}} = \sum_{i=1}^n B^2 \left[ \sigma_i - 2C_{10} - \frac{2}{\lambda_i} C_{01} - 2AC_{11} \right] = 0, \\ \frac{\partial E^2}{\partial C_{01}} = \sum_{i=1}^n B^2 \frac{1}{\lambda_i} \left[ \sigma_i - 2C_{10} - \frac{2}{\lambda_i} C_{01} - 2AC_{11} \right] = 0, \\ \frac{\partial E^2}{\partial C_{11}} = \sum_{i=1}^n B^2 A \left[ \sigma_i - 2C_{10} - \frac{2}{\lambda_i} C_{01} - 2AC_{11} \right] = 0. \end{cases} \quad (2)$$

В соотношениях (2) обозначено:

$$A = 3(\lambda_i^2 - 1)(\lambda_i - 1)/\lambda_i^2, \quad B = \lambda_i^2 - 1/\lambda_i.$$



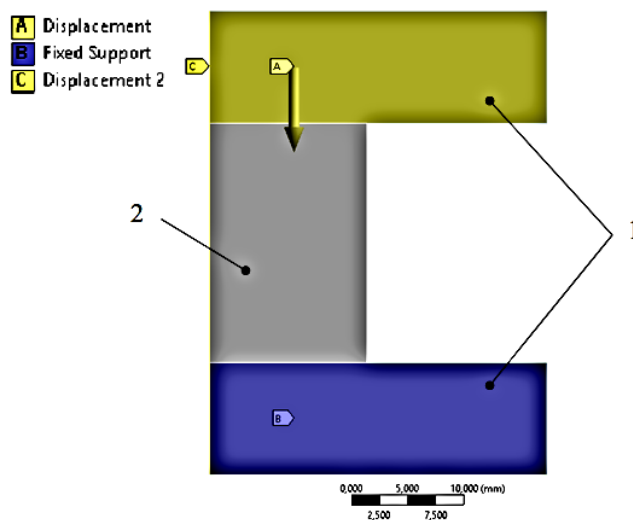
Система (2) решалась по формулам Крамера:  $C_{10} = \Delta_1 / \Delta$ ,  $C_{01} = \Delta_2 / \Delta$ ,  $C_{11} = \Delta_3 / \Delta$ , где

$$\Delta = \begin{vmatrix} 2 \sum_{i=1}^n B^2 & 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} B^2 & 2 \sum_{i=1}^n B^2 A \\ 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} B^2 & 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i^2} B^2 & 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} B^2 A \\ 2 \sum_{i=1}^n B^2 A & 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} B^2 A & 2 \sum_{i=1}^n B^2 A^2 \end{vmatrix}, \Delta_1 = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n \sigma_i B & 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} B^2 & 2 \sum_{i=1}^n B^2 A \\ \sum_{i=1}^n \sigma_i \frac{1}{\lambda_i} B & 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i^2} B^2 & 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} B^2 A \\ \sum_{i=1}^n \sigma_i B A & 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} B^2 A & 2 \sum_{i=1}^n B^2 A^2 \end{vmatrix},$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 2 \sum_{i=1}^n B^2 & \sum_{i=1}^n \sigma_i B & 2 \sum_{i=1}^n B^2 A \\ 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} B^2 & \sum_{i=1}^n \sigma_i \frac{1}{\lambda_i} B & 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} B^2 A \\ 2 \sum_{i=1}^n B^2 A & \sum_{i=1}^n \sigma_i B A & 2 \sum_{i=1}^n B^2 A^2 \end{vmatrix}, \Delta_3 = \begin{vmatrix} 2 \sum_{i=1}^n B^2 & 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} B^2 & \sum_{i=1}^n \sigma_i B \\ 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} B^2 & 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i^2} B^2 & \sum_{i=1}^n \sigma_i \frac{1}{\lambda_i} B \\ 2 \sum_{i=1}^n B^2 A & 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} B^2 A & \sum_{i=1}^n \sigma_i B A \end{vmatrix}.$$

Числовые данные получены из серии экспериментов для образцов из эластичного материала. Начальные размеры образцов (рисунок 1, а):  $d_0 = 28$  мм,  $h_0 = 21,3$  мм. Испытания проведены в стенде Instron 3382 на основе ГОСТ ISO 7743-2013 с применением силиконовой смазки, скорость хода поршня 5 мм/мин, ход поршня 7 мм. Сбор данных с датчиков, по которым строятся диаграммы зависимости усилия прессы от хода поршня, осуществлялся каждые 0,1 с. Вычисленные константы Муни-Ривлина равны  $C_{10} = 1,7664$  МПа,  $C_{01} = -0,8512$  МПа,  $C_{11} = 0,2236$  МПа.

Дальнейший расчет осуществляется в системе инженерного анализа ANSYS, где для определения коэффициентов Муни-Ривлина моделируется одноосное сжатие образца двумя жесткими плитами (рисунок 2). Для описания поведения гиперэластичного материала используется встроенная модель «Mooney-Rivlin 3 Parameter» с показателем несжимаемости, равным нулю. Расчетная область состоит из одного конечного элемента для исключения изменения объема образца за счет взаимного проникновения элементов сетки.

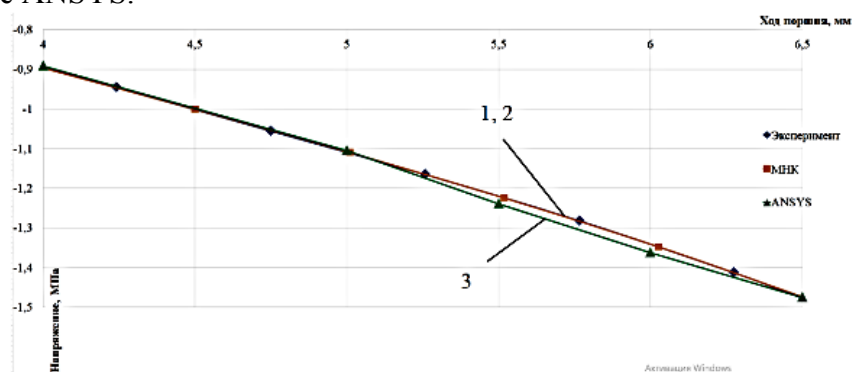


1 – жесткие плиты; 2 – образец из гиперэластичного материала

Рисунок 2 – Модель сжатия гиперэластичного образца (половина осевого сечения)

Задача решается в осесимметричной постановке. Нижняя плита жестко закреплена (граничное условие А «Fixed support»). Для верхней плиты задано перемещение 7 мм вниз (граничное условие В «Displacement»), как в экспериментальном исследовании. Ось образца совпадает с вертикальной геометрической осью, для нее исключаются перемещения в плоскости плит (граничное условие С «Displacement 2»). Контакты между образцом и плитой, образцом и поршнем заданы с учетом сухого трения. Оптимизационная задача решается в модуле «Direct Optimization». Осуществляется подбор таких констант Муни-Ривлина  $C_{10}, C_{01}, C_{11}$  и коэффициента трения, при которых значения силы реакции подвижной плиты будут соответствовать экспериментальным значениям силы при перемещении пуансона 4 мм, 5 мм, 5,5 мм, 6 мм и 6,5 мм соответственно.

В первой приближении приняты значения  $C_{10}, C_{01}, C_{11}$ , полученные методом наименьших квадратов, коэффициент трения задан равным 0. Значения коэффициентов Муни-Ривлина, полученные в системе инженерного анализа ANSYS, равны  $C_{10} = 1,7326$ ,  $C_{01} = -0,8583$ ,  $C_{11} = 0,2256$ , коэффициент трения равен 0,0538. На рисунке 3 приведены графики зависимостей усилия прессования от перемещения подвижной плиты пресса, полученные экспериментально, методом наименьших квадратов и в пакете ANSYS.



1 – экспериментальные данные; 2 – метод наименьших квадратов;  
3 – оптимизация в системе инженерного анализа ANSYS

Рисунок 3 – Сравнение диаграмм усилия прессования от перемещения пресса

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-11-00165).*

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Установка для электротермического воздействия на заготовку / С. Б. Марьин, А. Ю. Гетопанов, В. А. Пхью, В. В. Григорьев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2020. – № 7(724). – С. 69-75. – DOI 10.18698/0536-1044-2020-7-69-75.

2. Логинов, В. Н. Расчет напряженно-деформированного состояния листовой заготовки при штамповке эластичной средой / В. Н. Логинов, З. В. Широкова // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2021. – № 4. – С. 12-17.

3. Андрианов, И. К. Модель оптимизации полимерного штампа с помощью стержневых элементов с учетом саморазогрева при циклическом нагружении / И. К. Андрианов // Вестник машиностроения. – 2021. – № 2. – С. 42-45. – DOI 10.36652/0042-4633-2021-2-42-45.

4. Бормотин, К. С. Численный метод оптимизации процесса формообразования панелей обтяжкой / К. С. Бормотин, А. Вин // Вычислительные методы и программирование. – 2019. – Т. 20. – № 4. – С. 386-395. – DOI 10.26089/NumMet.v20r434.

5. Феоктистов, С. И. Определение предельного коэффициента раздачи по FLD-диаграммам / С. И. Феоктистов, З. С. Чжо // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2019. – № 9. – С. 3-7.

6. Изготовление трубопроводов гидрогазовых систем летательных аппаратов / Марьин Б. Н., Сапожников В. М., Иванов Ю. Л. [и др.]. - Москва : Машиностроение, 1998. - 400 с.

7. Rivlin, R.S. Large Elastic Deformations of Isotropic Materials IV. Further Developments of the General Theory / R.S. Rivlin // Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 1948. – №241. – P. 379-397. – DOI 10.1098/rsta.1948.0024.

УДК 629.5.02

Морозов Егор Дмитриевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Журбина Ирина Николаевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Кораблестроение и компьютерный инжиниринг», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Morozov Egor Dmitrievich, student of Komsomolsk-na-Amure State University

Zhurbina Irina Nikolaevna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Shipbuilding and Computer Engineering, Komsomolsk-na-Amure State University

## **АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВОЙ КОНСТРУКЦИИ В СИСТЕМЕ ПРОЧНОСТНОГО РАСЧЕТА APM FEM**

### **ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE SHIP DESIGN IN THE STRENGTH ANALYSIS SYSTEM APM FEM**

Аннотация. Данная работа посвящена анализу напряженно-деформированного состояния конструкции бортового перекрытия сухогрузного судна с ледовыми усилениями. Рассмотрено несколько вариантов нагрузки на конструкцию при разной толщине льда. Прочностной анализ проведен в приложении APM FEM программного комплекса КОМПАС-3D.

Abstract. This work is devoted to the analysis of the stress-strain state of the structure of the side overlap of a dry cargo vessel with ice reinforcements. Several variants of the load on the structure with different ice thickness are considered. The strength analysis was carried in the APM FEM application of the COMPASS-3D software package.

Ключевые слова: судовая конструкция, численный анализ, напряжения, деформации.

Key words: ship design, numerical analysis, stresses, deformations.

#### **Введение**

Система APM FEM предназначена для проведения прочностного анализа в интерфейсе САД-системы КОМПАС-3D, которая позволяет выполнять несколько видов расчетов. Одним из них является расчет напряженно-деформированного состояния конструкции (статический расчет). Процедура расчетов в системе основана на методе конечных элементов. Основной задачей APM FEM является проведение анализа прочности небольших сборок или отдельных деталей, для которых важно оценить прочность с возможностью их оптимизации. Система позволяет довольно быстро это сделать, так как в ней используются зависимости между смоделированной (геометрической) моделью и расчетной.

### Моделирование конструкции

В системе моделирования КОМПАС-3D была смоделирована конструкция бортового перекрытия сухогрузного судна с ледовыми усилениями категории Arc5 [1]. В его конструкцию входят рамные шпангоуты, промежуточные (холостые) шпангоуты и стрингеры.

Нагрузка от давления льда прикладывалась между стрингерами [2]. В зависимости от толщины ледового поля были рассмотрены три варианта нагрузки на конструкцию (таблица 1). 3D модель расчётной конструкции и приложение нагрузки представлены на рисунках 1 и 2.

Таблица 1 – Нагрузка от толщины льда

толщина льда $h_i$ , м	0,4	0,5	0,6
давление $p$ , кПа	1537	2149	2825

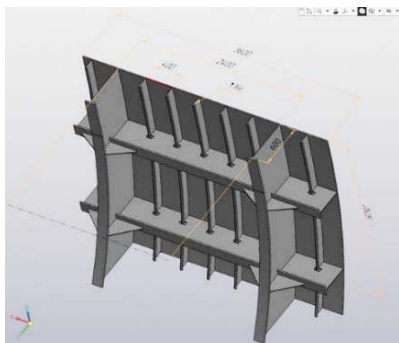


Рисунок 1 – Модель с размерами

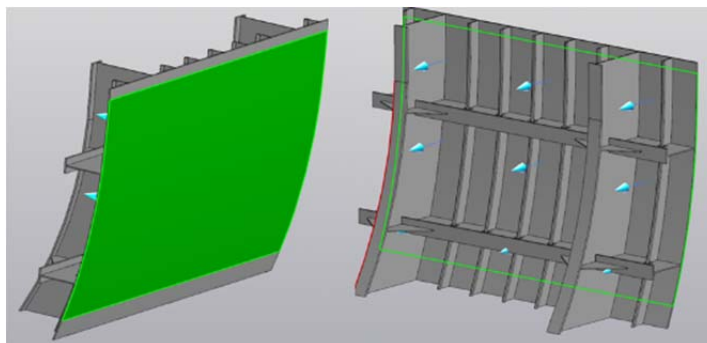


Рисунок 2 – Нагрузка в районе стрингера

### Анализ напряженно-деформированного состояния конструкции

Одним из преимуществ АРМ FEM является автоматическая генерация конечно-элементной сетки, которая позволяет сохранить необходимую точность при инженерном анализе [3]. Её необходимо выбрать, в зависимости от размеров объекта, 4 или 10-ти узловой тетраэдр. Для того, чтобы сетка обработала такие места, как выреза под проход набора, необходимо установить коэффициент сгущения, равный 1. Из-за больших размеров конструкции коэффициент в объеме примем 1,8 для увеличения разреженности конечных элементов. Чем меньше конечно-элементная сетка, тем дольше и сложнее происходит процесс разбиения, но результаты расчета при этом более точные. Визуализация макроэлементной сетки представлена на рисунке 3.

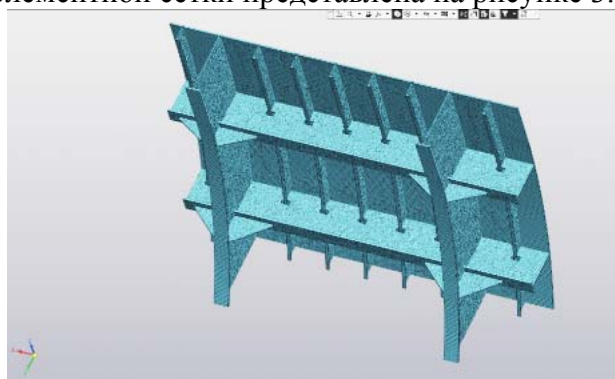


Рисунок 3 – Результат генерации КЭ сетки

В результате расчёта бортовой конструкции судна были определены напряжения и перемещения.

Для наглядности, на рисунках 4-5 для одного из расчетов на деформированной форме конструкции отображена карта (эпюра) напряжений и карта результирующего перемещения от действия нагрузки, соответственно. В таблице 2 представлены полученные максимальные напряжения.

Таблица 2 – Максимальные напряжения при разной толщине льда

ТОЛЩИНА ЛЬДА $H_l$ , М	0,4	0,5	0,6
НАПРЯЖЕНИЯ $\Sigma$ , МПА	12,97	18,13	23,82
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ $W$ , ММ	0,1439	0,2012	0,2645

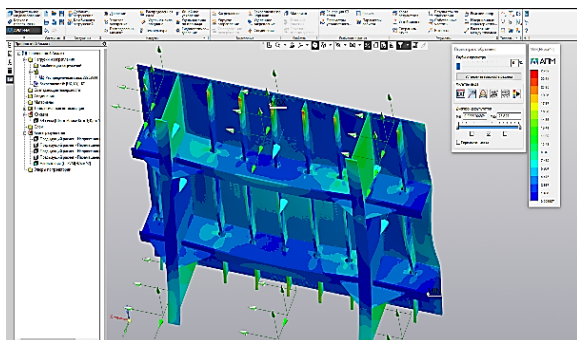


Рисунок 4 – Напряжения ( $\text{Н/мм}^2$ ) при нагрузке в 2825 кПа

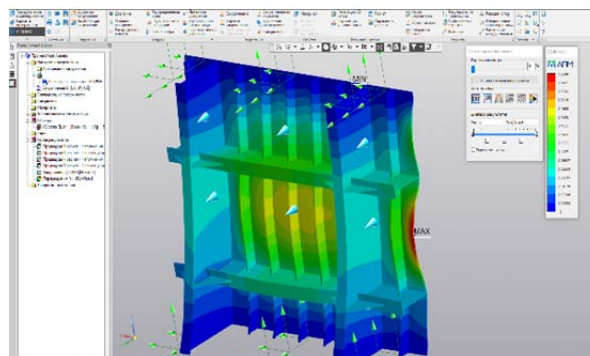


Рисунок 5 – Перемещения (мм) при нагрузке в 2825 кПа

### Заключение

В данной работе выполнен анализ напряженно-деформированного состояния бортовой конструкции сухогрузного судна ледовой категории. Расчетный анализ проведен с использованием системы прочностного анализа APM FEM программного комплекса КОМПАС-3D.

Достоверность полученных результатов подтверждается проведением серии расчетов с вдвое меньшим шагом разбиения конечно-элементной сетки. Данные полученных расчетов отличаются на 2,5 %, что удовлетворяет допустимым погрешностям в инженерных расчетах.

Так как сухогруз спроектирован на категорию ледовых усилений Arc5, полученные напряжения от заданной нагрузки не превышают предела текучести.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Даманский, Д. В. Практический опыт использования новых инструментов моделирования судовых конструкций в КОМПАС-3D / Д. В. Даманский, А. Д. Бурменский // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 4-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 12–16 апреля 2021 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. – С. 232-235. – EDN UMDZCM.
2. Прочность бортового набора судна при действии ледовой нагрузки / Е. С. Караваев, М. В. Китаев, В. В. Новиков, С. В. Антоненко // Полярная механика. – 2016. – № 3. – С. 439-449. – EDN XYGQJV.
3. Журбина, И. Н. Применение системы APM FEM для расчетов прочности судовой корпусной конструкции / И. Н. Журбина // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 февраля 2022 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 494-496. – EDN BDOFGK.

Садовская Оксана Анатольевна, кандидат экономических наук, заместитель директора по учебной работе, Кыргызский авиационный институт имени И. Абдраимова  
Sadovskaya Oksana Anatolyevna, Candidate of Economic Sciences, Deputy Director for Academic Affairs, Ishembay Abdraimov Kyrgyzstan Aviation Institute

Исмаилова Жыргал Кусейиновна, кандидат философских наук, заведующая кафедрой естественно-научных дисциплин, Кыргызский авиационный институт имени И. Абдраимова  
Ismailova Zhyrgal Huseynovna, Candidate of Philosophical Sciences, Head of the Department of Natural Sciences, Ishembay Abdraimov Kyrgyzstan Aviation Institute

Куанышбаева Алия Рустемовна, студент, Кыргызский авиационный институт имени И. Абдраимова

Kuanysbbaeva Aliya Rustemovna, student, Ishembay Abdraimov Kyrgyzstan Aviation Institute

## **ЭКОНОМИКО-УПРАВЛЕНЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ОБЩЕСТВА В СФЕРЕ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

### **ECONOMIC AND MANAGEMENT PROBLEMS OF INNOVATIVE DEVELOPMENT OF THE SOCIETY IN THE FIELD OF CIVIL AVIATION**

Аннотация. В статье рассматриваются экономико-управленческие проблемы инновационного развития общества, на примере сферы гражданской авиации. Подробно изучен процесс информатизации и инновационного воздействия современных информационных технологий на различные сферы жизни нашего общества. По проделанной работе сделан вывод, кто является носителями и разработчиками новых идей.

Abstract. The article deals with the economic and managerial problems of the innovative development of society, using the example of the civil aviation sector. The process of informatization and the innovative impact of modern information technologies on various spheres of life in our society has been studied in detail. Based on the work done, it is concluded who are the carriers and developers of new ideas.

Ключевые слова: гражданская авиация, инновации, экономический рост, развитие, инновационная деятельность, преобразование.

Key words: civil aviation, innovation, economic growth, development, innovation, transformation.

Развитие общества в 21 веке считается многозначительным и справедливым действием, предопределенным закономерностью увеличения и формирования каждой общественно-финансовой концепции, направленной на экономико-управленческие проблемы современности. Сегодня, обоснование понятий «рост», «развитие», «инновации» и «инновационная деятельность» имеют определенную актуальность. Это касается всех сфер деятельности человечества. В данной статье хотелось бы рассмотреть экономико-управленческие проблемы инновационного развития сферы гражданской авиации.

Стратегии разработки и внедрения новой концепции управленческого развития включает поиск новых идей и методов управления. Они активно изучаются и обсуждаются в разных областях и учитывают инновационную ориентацию системных преобразований, связанных с разработкой новых или усовершенствованием разных социально значимых решений. К ним относятся технологические решения, организационно-управленческие и другие.

Если объект рассматривается как система, тогда *рост* системы можно рассматривать и представлять, как увеличение количества элементов в системе, что в свою очередь приводит к усложнению структуры системы и ее управления. Система стано-

вится сложной. В итоге это может привести к ее саморазрушению. При уменьшении роста происходит удаление сложных связей, которые существуют между тремя и больше типами элементов, при этом рвутся связи между элементами. В обоих случаях действует закон перехода количества в качество, происходят количественные преобразования в системе. Такой процесс нельзя назвать развитием, так как развитие связано, прежде всего, с качественными преобразованиями [1].

**Развитие** – это преобразование всех процессов системы во времени, выраженное в количественных, качественных и структурных преобразованиях. Система превращается в развитую в процессе одного из этапов – становления.

Принципиально новые функциональные свойства системы формируются в процессе качественных изменений ее составляющих. Это происходит за счет изменения вида и типа связей на основе свободного выбора связей между собой [2].

Системные специалисты-аналитики принимают сложные организационно-технические решения. Они считают, что вид и тип связей между элементами системы играет фундаментальную роль и в значительной степени определяют состояние и поведение как самих элементов, так и системы в целом.

Многие экономисты, изучив сферу гражданской авиации пришли к определенным выводам. Они считают, что большинство кризисных ситуаций и явлений в разных системах можно преодолеть или исключить. Происходит это за счет возникновения и внедрения инноваций. Инновации обеспечивают стимул следующему этапу развития общества в условиях:

- Цифровизации и автоматизации системы здравоохранения;
- Восстановления отрасли воздушного транспорта;
- Гармоничного сосуществования операционной эффективности и устойчивого развития аэропортов;
- Стремления авиационной отрасли к устойчивому развитию;
- Подготовки региональных и внутренних аэропортов к после-пандемийному «буму»;
- Становление блокчейна ключевой технологией в сфере авиаперевозок.

В рамках информатизации и внедрения инноваций авиакомпания планируют бороться за лояльность клиентов, за счет прямого взаимодействия, развития контакт-центров, усовершенствования процесса продажи билетов через интернет. Это будет происходить за счет создания более удобных, модифицированных систем, при помощи которых будет возможно не только произвести операции с билетом, но и забронировать дополнительные услуги. Система обеспечения безопасности полетов и предполетный досмотр также может измениться за счет инновационного развития [3].

Также нам следует понять, что же такое **инновационное развитие** в современном государственном представлении. Инновационное развитие трактуется как эффективное использование, обновление и наращивание совокупного национального ресурсного потенциала. Оно обеспечивает в стратегической перспективе конкурентоспособность нашей страны в авиационной, образовательной, научно-технической, политической, военной и других сферах [4].

У каждой системы есть свой жизненный цикл, который она проходит согласно некоторому описанию (рисунок 1). Обратив внимание на схему, мы можем заметить вышесказанную закономерность: система создается, начинает функционировать, набирает обороты – развивается, начинает стареть – снижается эффективность функционирования и в итоге происходит ликвидация. Данный процесс с уверенностью можно назвать «жизненным циклом» системы.

Используя и внедряя в систему инновации, мы можем добиться возникновения нового потока корректирующих и частично улучшающих условий, приносящих разнообразные положительные и модифицирующие эффекты обновленной системе [5].



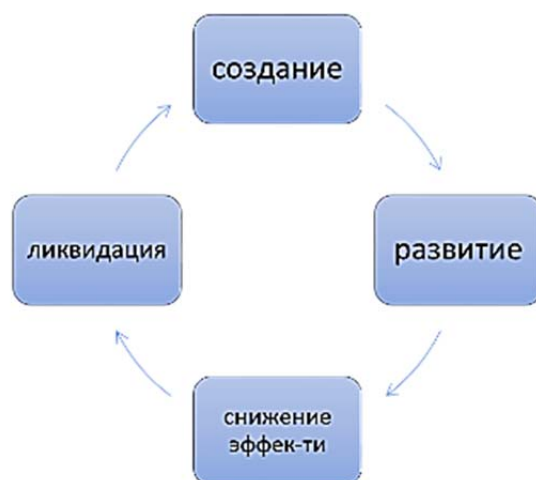


Рисунок 1 – Жизненный цикл системы

Рассмотрев условия и приблизительные результаты внедрения инноваций в экономико-управленческую систему, возникает немало вопросов. На каждом этапе жизненного цикла происходит отбор инноваций. Этот отбор в первую очередь будут осуществлять разработчики новых идей:

- специалисты в разных научных областях;
- изобретатели, конструкторы, инженеры;
- деятели культуры, деятели образования;
- государственные и общественные деятели;
- предприниматели.

В свою очередь, государство, должно разрабатывать стратегический план внедрения инновационной функции во все сферы деятельности, начиная с нами уже упомянутой гражданской авиации.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Актуальная статистика // Gapminder.org. – Раздел сайта «Gapminder - независимый шведский фонд». – URL: [http://static.gapminderdev.org/tools-legacy/tools/#\\$state\\$time\\$value=2018;;&chart-type=linechart](http://static.gapminderdev.org/tools-legacy/tools/#$state$time$value=2018;;&chart-type=linechart) (дата обращения: 02.11.2022).

2. Воробьев, А. Е. Инновационный менеджмент недропользования / А. Е. Воробьев, Т. В. Чекушина. – Москва : Российский университет дружбы народов (РУДН), 2008. – 222 с. – EDN Y1KAJD.

3. Информационные технологии в гражданской авиации // interface.ru. – Раздел сайта «Interface Ltd». – URL: <http://www.interface.ru/home.asp?artId=39655> (дата обращения: 02.11.2022).

4. Алексеева, М. Б. Инновационный анализ : учебное пособие / М. Б. Алексеева, Н. Н. Масино ; М. Б. Алексеева, Н. Н. Масино ; М-во образования и науки Российской Федерации, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Санкт-Петербургский гос. инженерно-экономический ун-т". – Санкт-Петербург : СПбГИЭУ, 2011. – EDN QVAVTR.

5. Роль современных информационных технологий в авиации // scienceforum.ru. – Раздел сайта «Студенческий научный форум». – URL: <https://scienceforum.ru/2014/article/2014001089> (дата обращения: 02.11.2022).

Свиридов Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Кораблестроение и компьютерный инжиниринг», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Sviridov Andrey Vladimirovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, department "Shipbuilding and computer engineering", Komsomolsk-na-Amure State University

Скалёва Анна Викторовна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Skaleva Anna Viktorovna, student of Komsomolsk-na-Amure State University

## **ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОТЛИВОК АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

### **MANUFACTURE OF CASTINGS FOR AIRCRAFT PURPOSE USING ADDITIVE TECHNOLOGIES**

Аннотация. Проведен анализ патентных и литературных источников, касающихся совершенствования и развития технологических процессов литья в самотвердеющие наливные формы, исследованы физико-механические свойства литейных форм при изгибе и сжатии, содержащих различные огнеупорные наполнители, исследованы дилатометрические свойства литейных форм при их нагреве.

Abstract. The analysis of patent and literary sources concerning the improvement and development of technological processes of casting into self-hardening pouring molds was carried out, the physical and mechanical properties of casting molds in bending and compression, containing various refractory fillers, were studied, the dilatometric properties of casting molds were studied when they were heated.

Ключевые слова: точное литье отливок, аддитивные технологии, трехмерное моделирование.

Key words: precision casting castings, additive technologies, three-dimensional modeling.

Применение различных способов цифровой подготовки технологических процессов приводит к повышению мобильности производства, ускорению обмена данными и росту эффективности производства. Использование аддитивных технологий при литье металлов позволяет существенно снизить затраты на подготовку производства и повысить качество изделий [1].

В частности, для изготовления отливок в разовых и постоянных формах необходима длинная технологическая цепочка подготовки мастер-модели, приготовления смеси, формовки частей формы, их сушка, и так далее. Использование традиционных технологий иногда ограничивает потенциал разработки конкурентно-способной продукции или увеличивает ее стоимость. Возможность трехмерного моделирования прототипов будущих отливок в точном литье с получением мастер-моделей (см. рисунок 1) и снижение себестоимости формовочных смесей способствует повышению эффективности точного литья в авиастроительной и других отраслях. Одним из прогрессивных способов изготовления точных литых изделий, практически из всех сплавов является метод литья в жидкие самотвердеющие смеси [1]. Метод применим для литья практически всех сплавов авиационной промышленности и позволяет изготавливать широкий спектр отливок (фланцы, штуцера, тройники и т.д.).

Способ отличается изготовлением отливок повышенной чистоты поверхности и размерно-геометрической точности. Повышенная жидкотекучесть смесей, с возможностью регулирования физико-механических свойств литейных форм в широких преде-

лах, привело к появлению многих работ, посвященных наливным самотвердеющим смесям, направленных на улучшение качества литья, технологических свойств смесей и разработки специального оборудования [2-4].



Рисунок 1 – Мастер модели, полученные на FDM принтере

Снижение стоимости формовочных смесей возможно за счет использования технологически пригодных отходов различных производств. Например, в качестве огнеупорной добавки в гипсовой литейной смеси использовали продукты сжигания древесного угля ТЭЦ в виде золы-уноса. Принципиальная возможность использования такого вида отходов изложена в работах [3-5]. В частности, исследовали физико-механические свойства гипсовых литейных форм, содержащих различные огнеупорные наполнители, дилатометрические свойства литейных форм при их нагреве.

Использование золы-уноса ТЭЦ позволяет снизить объемные изменения, происходящие при нагреве формы, что очень важно в момент заливки жидкого металла и растрескивания формы, приводящие к браку литья. Количество золы в формовочной смеси регулировали в пределах от 5 до 35 % от ее массы. При концентрации золы более 35 % наблюдалась неудовлетворительная прочность литейной формы в сыром и прокаленном состоянии. Результаты исследований физико-механических свойств гипсовой смеси с золой сравнивали с аналогичными результатами смеси, содержащей песок (рисунки 2, 3).

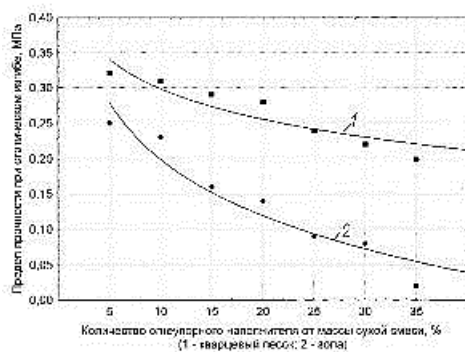


Рисунок 2 – Предел прочности образцов при статическом изгибе с добавлением различных наполнителей

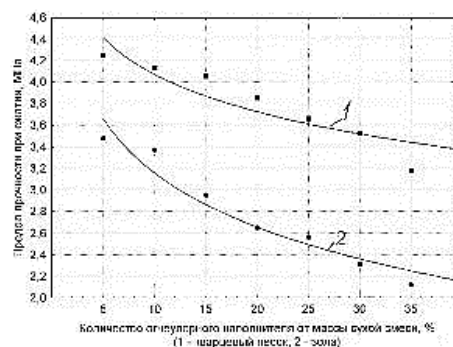


Рисунок 3 – Предел прочности образцов при сжатии с добавлением различных наполнителей

Так как зола уноса ТЭЦ имеет меньшую плотность по сравнению с кварцевым песком, то ее массовое содержание в смеси значительно меньше, чем песка, при одинаковых их содержаниях по объему. Средняя величина пределов прочности образцов при изгибе составляет 0,1 – 0,2 МПа и соответствует концентрациям золы от 5 – 20 %, в то время как для той же прочности образцов с песком этот интервал составляет от 30 до 50 %.

На данном графике видно, что средняя величина пределов прочности образцов при сжатии составляет 2 – 3 МПа и соответствует концентрациям золы от 10 – 35 %, причем для таких же образцов с добавлением песка этот интервал составляет от 30 до 70 %.

На рисунке 4 показан график температурного расширения/сжатия гипсопесчаного образца.

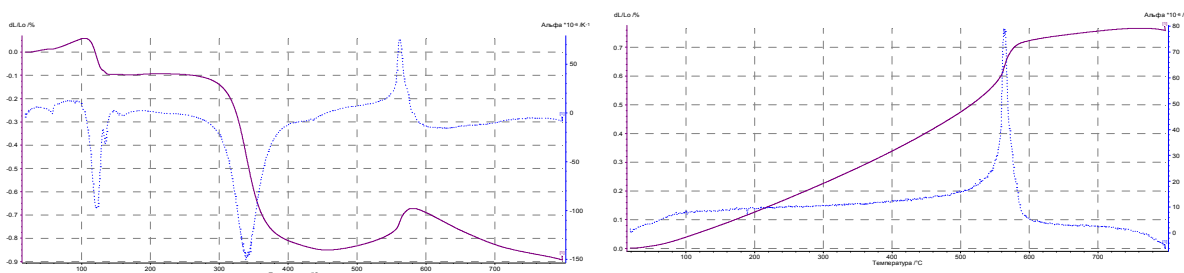


Рисунок 4 – Расширение/сжатие гипсопесчаной смеси при нагреве

На данном графике видно, что усадка смеси с кварцевым песком идет аналогично усадке смеси без песка, а расширение дает большее и составляет около 0,75 % при температуре 700 – 800 °С.

На рисунке 5 показан график температурного расширения гипсового образца с добавлением золы.

Характер кривых для образцов, содержащих песок и золу-уноса, во многом одинаков (см. рисунки 4, 5) и отличаются немного большей величиной усадки (около 1% для образцов с золой и примерно 0,9 % для смеси с песком)

Нагрев образцов после прокаливания почти во всех случаях показывает их равномерное расширение, которое не превышает 0,6-0,7 % для смесей, содержащих песок, и без него. Для образцов гипсовых форм, содержащих золу-уноса, это расширение значительно меньше и не превышает 0,3 %.

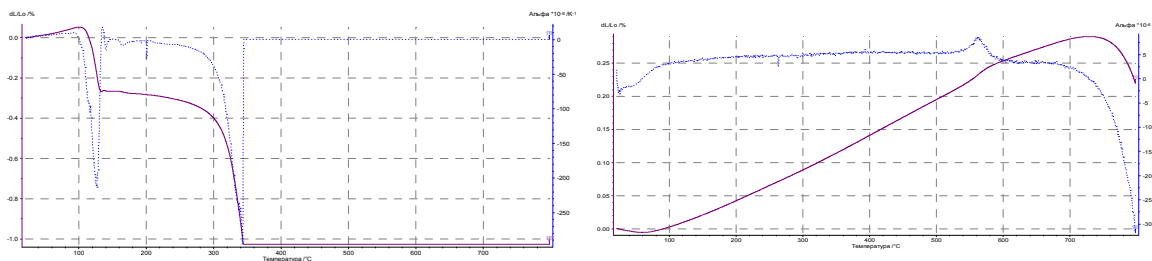


Рисунок 5 – Расширение гипсовой смеси с добавлением золы

Таким образом, dilatометрические свойства гипсовой формовочной смеси, содержащей золу-уноса ТЭЦ, немногим отличаются от аналогичных свойств известной смеси, а более низкое расширение при нагреве после прокаливания способствует увеличению трещиностойкости гипсовых форм при литье металлов.

Изучено влияние золы-уноса ТЭЦ на физико-механические свойства образцов гипсовых формовочных смесей.

Dilatометрические свойства гипсовой формовочной смеси содержащей золу-уноса ТЭЦ, немногим отличаются от аналогичных свойств известных смесей, а более низкое расширение (около 0,3 %, для образцов, содержащих золу и 0,8 % для известных смесей) при нагреве после прокаливания способствует увеличению трещиностойкости гипсовых форм при литье металлов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Килов, А. С. Производство заготовок. Литье: Серия учебных пособий. Книга 3. Проектирование и производство отливок (литых заготовок) / А. С. Килов, А. В. Попов, В. А. Недыхалов – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 171 с.
2. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение) : Справочник / под общ. ред. А. Ф. Ферронской. – Москва : Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2004. – 485 с.
3. Пат. 2502691 Российская Федерация МПК С04В 18/06. Смесь для изготовления огнеупорных бетонов/ Свиридов А.В.; Заявитель и патентообладатель Государственное общеобразовательное учреждение высшего профессионального образования ФГБОУ ВО «КНАГУ»; заявл. 15.08.11; опубл. 20.02.13, бюл. № 5. – 5 с. : ил.
4. Патент № 2383410 С1 Российская Федерация, МПК В22С 1/18. Смесь наливная формовочная с повышенной газопроницаемостью для получения отливок из цветных сплавов : № 2008142654/02 : заявл. 27.10.2008 : опубл. 10.03.2010 / В. К. Дубровин ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет».
5. Куриный, В. В. Особенности технологии изготовления корпусов двухсредных беспилотных аппаратов методом послойного наплавления FDM (Fused deposition modeling) / В. В. Куриный, В. В. Солецкий, Лю Бинь // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2-2(52). – С. 34-41.

УДК 629.5.018.75

Стадник Андрей Сергеевич, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Stadnik Andrey Sergeevich, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Самойлова Анастасия Валентиновна, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Samoilova Anastasia Valentinovna, student, Komsomolsk-na-Amure State University

Журбина Ирина Николаевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Кораблестроение и компьютерный инжиниринг», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Zhurbina Irina Nikolaevna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department «Shipbuilding and Computer Engineering», Komsomolsk-na-Amure State University

## МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ СУДОВ

## METHODS OF PROCESSING THE RESULTS OF FULL-SCALE TESTS OF SHIPS

Аннотация. В данной статье представлена методика обработки результатов натурных испытаний судов. Показано определение скорости приливно-отливного течения, влияние ветра на сопротивление. Рассмотрена методика учета влияния глубины при ограниченной глубине на мерной миле. Представлена шкала Бофорта, классифицирующая силу ветра и волнение на море.

Abstract. This article presents a methodology for taking into account the results of full-scale tests of ships. The determination of the tidal flow velocity is shown, the effect of wind on resistance. The methods of taking into account the influence of depth at a limited depth on the measured mile are considered. The Beaufort scale is presented, classifying wind strength and sea waves.

Ключевые слова: испытания судов, оценка волнения, метод Петцваля, фактическая шероховатость.

Key words: testing of vessels, evaluation of excitement, Petzval method, actual roughness.

Натурные испытания проводятся для двух состояний нагрузки судна: в полном грузу и в балласте (для таких судов производится перерасчет на состояние в грузу). Учёт результатов испытаний сводится к введению поправок на течение, ветер, глубину [1].

В водоемах существуют приливно-отливные течения, которые могут достигать довольно значительных скоростей. Для исключения влияния течения испытания проводятся два раза на двух противоположных галсах. Скорость приливно-отливного течения  $V_{st}$  может быть добавлена или вычтена из скорости судна. Она определяется по следующей формуле:

$$V_{st} = \frac{n_1+n_2}{2} \left( \frac{V_{s1}}{n_1} - \frac{V_{s2}}{n_2} \right), \quad (1)$$

где  $n_1, n_2$  – галсы;  $V_{s1}, V_{s2}$  – скорость первого и второго галсов.

#### **Учет влияния ветра на сопротивление.**

Влияние ветра на сопротивление определяется по следующей формуле:

$$R_B = C \cdot \frac{\rho_B \cdot V_B^2}{2} \cdot F_{\otimes}. \quad (2)$$

где  $C$  – коэффициент аэродинамического сопротивления, который зависит от истинного направления ветра (из треугольника скоростей);  $\rho_B$  – плотность воздуха;  $V_B$  – скорость воздуха относительно судна;  $F_{\otimes}$  – площадь проекции надводной части судна.

Коэффициент аэродинамического сопротивления определяется более точно по результатам продува. Если их нет, то по продувкам сходного надводного силуэта.

Скорость воздуха относительно судна зависит от уровня над водой. Её замеряют на определенной эквивалентной высоте.

Вторая часть испытаний сводится к приложению дополнительной нагрузки на винт. Фактически это означает, что увеличивается поступь и число оборотов гребного винта.

Изменение скорости за счет условной работы винта можно приблизительно оценивать по следующей формуле:

$$\Delta V_s \approx \frac{D_n}{\beta(1-\psi)} \Delta K_2, \quad (3)$$

где  $D_n$  – диаметр винта;  $\beta$  – угол ветрового дрейфа;  $\psi$  – расчётное значение коэффициента попутного потока;  $K_2$  – коэффициент момента, определяемый по диаграммам Э.Э. Папмеля для винтов.

#### **Учет влияния глубины.**

При ограниченной глубине на мерной миле происходит увеличение сопротивления по следующим причинам: из-за увеличения вязкостной составляющей, при увеличении скорости обтекания в суженном канале, при увеличении волнового сопротивления.

Первая причина увеличения сопротивления существеннее, чем вторая. Вторую учитывают только у быстроходных судов.

Поскольку на испытаниях судно сдается по скорости  $V$ , то увеличение сопротивления  $R$  сводят к потере скорости  $\Delta V < 0$ .

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V_{\text{вяз}}}{V} + \frac{\Delta V_{\text{волн}}}{V}. \quad (4)$$

Вязкостная потеря считается как функция от величины

$$\frac{\Delta V}{V} = f \left( \frac{\sqrt{\omega_{\otimes}}}{H} \right). \quad (5)$$

Расчет неполный, так как при этом не учитывается изменение нагрузки винта при изменении сопротивления.

Основные проблемы во время испытаний возникают у сухогрузных судов, так как они испытываются при осадке меньше, чем в грузу. При небольших разницах в осадках (до 5 %), скорость пересчитывают по формуле адмиралтейского коэффициента:

$$\frac{D_i^{2/3} \cdot V_i^3}{Ne_i} = \frac{D^{2/3} \cdot V^3}{Ne} \rightarrow V = V_i \cdot \left(\frac{D_i}{D}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{Ne}{Ne_i}\right)^{1/3} \quad (6)$$

При разнице больше, чем в 5-10 %, часто используют формулу адмиралтейского коэффициента, но погрешность измерений существенно возрастает. Более точно можно пересчитать по методу постоянной:

$$\chi = \sqrt{\frac{Ne_i}{D_i^3 \sqrt{L \cdot g}}} \quad (7)$$

где  $Ne = \chi D^{2/3}$  – мощность, которую судно развивает при нормальной осадке.

Самым достоверным способ определения мощности считается метод Петцваля. В основе этого метода лежит предположение о том, что кривые сопротивления при разных осадках (и массах) эквидистантны. Это приводит к тому, что зависимость мощности от  $lgV$  линейна  $Ne(lgV)$ .

Существуют и другие способы, основанные на более углубленном анализе. Также необходимо учитывать влияние обрастания обшивки. Наиболее достоверный способ – это замерить фактическую шероховатость, соответственно изменить надбавку на шероховатость, увеличить сопротивление, учесть изменения работы винта и вычислить новую скорость.

В реальности же считается, что изменение трения пропорционально

$$\frac{\Delta R_{тр}}{R_{тр0}} = \frac{n}{c} \quad (8)$$

где  $n$  – число дней выхода из дока;  $c$  – коэффициент, зависящий от качества лакокрасочной подготовки изделия.  $c \sim (80 \div 100)$ .

#### **Учет влияния волнения.**

В процессе испытаний допускается волнение и ветер [2]. Для оценки волнения (оно считается нерегулярным) на море, озере и крупных водохранилищах используется условная двенадцатибалльная шкала Бофорта, которая оценивает степень волнения по силе ветра (таблица 1). Весь расчет сводится к приближенной потере скорости из-за волнения.

Таблица 1 – Шкала Бофорта

Сила ветра (баллы)	Скорость ветра, м/с	Высота волн, м
Волнение отсутствует, штиль (0)	0-0,2	0
Тихий (1)	0,3-1,5	до 0,25
Лёгкий бриз (2)	1,6-3,3	
Слабый бриз (3)	3,4-5,4	0,25-0,75
Умеренный бриз (4)	5,5-7,9	0,75-1,25
Свежий ветер (5)	8,0-10,7	1,25-2,0
Сильный ветер (6)	10,8-13,8	2,0-3,5
Крепкий ветер (7)	13,9-17,1	3,5-6,0
Очень крепкий ветер (8)	17,2-20,7	
Шторм (9)	20,8-24,4	6,0-8,5
Сильный шторм (10)	24,5-28,4	8,5-11,0
Жестокий шторм (11)	28,5-32,6	11,0 и более
Ураган (12)	32,7 и более	

Изменение скорости  $\Delta V$  определяется усредненным графиком для конкретных типов судов или эмпирическими формулами. При волнении, вызванном до 5 баллов по Бофорту, потеря скорости мала и не превышает 1 %.

Одной из эмпирических формул является формула Аэртсена, имеющая следующий вид:



$$100 \frac{\Delta V}{V} = \frac{m}{L_{pp}} + n, \quad (9)$$

где  $m$  и  $n$  – коэффициенты, зависящие от высоты и направления волны (таблица 2);  $L_{pp}$  – длина судна между перпендикулярами.

Таблица 2 – Коэффициенты  $m$  и  $n$  для встречных волн по Бофорту

Ветер, балл	Коэффициент $m$	Коэффициент $n$
5	900	2
6	1300	6
7	2100	11

Если данные превышают допустимые для ходовых испытаний значения, для практического использования коэффициенты  $m$  и  $n$  можно проэкстраполировать в меньшую область. Во время испытаний замеряются скорость, число оборотов гребного вала, и только на некоторых судах упор, если есть штатный динамометр.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Эксплуатационные испытания морских судов / Ф. М. Кацман, Г. М. Музыкантов, А. В. Шмелев. - Москва : Транспорт, 1970. - 272 с.
2. Пашенцев, С. В. Идентификация некоторых маневренных характеристик судна по результатам натуральных испытаний / С. В. Пашенцев // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2006. – Т. 9. – № 2. – С. 246-252. – EDN ICJVKT.

УДК 778.64:629.7

Третьяков Валерий Артемович, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Tretyakov Valery Artemovich, student, Komsomolsk-on-Amur State University

Куриный Владислав Викторович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Кораблестроения и компьютерного моделирования», Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Kuriny Vladislav Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Shipbuilding and Computer Modeling, Komsomolsk-on-Amur State University

#### АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В САМОЛЕТО- И КОРАБЛЕСТРОЕНИИ

#### ADDITIVE TECHNOLOGIES IN AIRCRAFT AND SHIP BUILDING

Аннотация. В статье рассмотрены особенности высокотемпературной печати. Приведены примеры применения высококомпературных 3D-принтеров в авиа и кораблестроении. Обоснована необходимость разработки новой конструкции высококомпературного 3D-принтера. Представлен проект высококомпературного 3D-принтера работающего в декартовой система координат, собранного по кинематике близкой к Core XY.

Abstract. The article discusses the features of high-temperature printing. Examples of the use of high-temperature printers in aircraft and ship building are given. The necessity of developing a new design of a high-temperature 3D-printer is substantiated. A project of a high-temperature 3D-printer operating in a Cartesian coordinate system, assembled according to kinematics close to Core XY, is presented.

Ключевые слова: аддитивные технологии, филамент, 3D-печать, технология FDM.

Key words: additive technologies, filament, 3D-printing. FDM technology.

Необоснованное введение странами так называемого "свободного запада" ограничительных и запрещающих санкций в отношении Российской Федерации, привело к ограничению поставок как разнообразных машин и механизмов, так и запасных частей к уже поставленным и работающим агрегатам различного назначения. В числе отраслей, подвергшихся ограничениям авиа и кораблестроение. Как правило, количество необходимых запчастей и комплектующих исчисляется единицами или десятками и в этом случае нерентабельно разворачивать даже мелкосерийное производство. В связи, с чем большое значение приобретают способы производства, обладающие большой универсальностью, в том числе аддитивное производство.

Среди методов 3D-печати, наиболее распространенной и доступной технологией аддитивного производства является технология FDM/FFF. Ввиду высокой доступности, открытого исходного кода проекта самовоспроизводящегося быстрого прототипа (RepRap) [1–5].

Изготовление изделий работающих в условиях высоких температур не подходит для обычных методов 3D-печати, которые используют изготовление методами экструзионно -плавленных нитей (FFF) или моделирование при помощи наплавления (FDM) из-за относительно низких температур плавления и соответственно низкой температуры деформации широко используемых в 3D-печати пластиков.

Обычно принтеры на основе FFF печатают термополимеры, такие как полимолочная кислота (PLA), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), нейлон и модифицированная гликолем версия полиэтилентерефталата (PETG), последний из которых находит все более широкое применение. Хотя есть и множество других пластиков. Температура плавления большинства таких пластиков 200-240 °С, что явно недостаточно для работы в условиях повышенных температур. Для таких пластиков затруднительно даже провести медицинскую стерилизацию изделий.

Высокотемпературные пластики применяются в ракетостроении, например, Stratasys и «климат-контроль» ракет Atlas V. 16 печатных деталей вместо 140 металлических — быстрее, легче, дешевле. Применяются такие пластики и в авиастроении и прямая печать металлами, когда речь идет уже о компонентах двигателей или деталях каркаса фюзеляжа, но менее нагруженные конструктивные элементы, такие как вентиляция салона и элементы интерьера, лучше делать из пластика. Это направление развивается, например, компания Airbus. Так, при создании Airbus A350 XWB компания Concept Laser изготовила несколько тысяч кронштейнов небольшими партиями для тестирования. Кроме того, 3D-печать открывает возможность производства необходимых запасных частей в практически любой точке мира по требованию, что делает ненужным производство и хранение больших объемов запчастей «на всякий случай».

Находят применение аддитивные технологии и в судостроении. Так фирма Hyundai развивает серийную 3D-печать деталей. Фирма CJR Propulsion (Великобритания) специализируется в изготовлении рулевого оснащения и гребных винтов, печатает прототипы готовых изделий и тестовые модели с помощью 3D-принтеров.

Новинка 3D-печати – впервые изготовленный на 3D-принтере WAAMPeller корабельный гребной винт, успешно прошедший испытания, представленный в штаб-квартире Damen Shipyards Group в Нидерландах.

Немецкой компанией HanseYachts AG, крупным производителем морских парусных яхт, был разработан 20-метровый 3D-принтер для печати корпуса яхты с применением композита с древесным наполнителем. По расчетам компании, корпус будет отличаться повышенной прочностью, при этом удастся сократить цикл производства и удовлетворить индивидуальные потребности заказчиков.

Применяются аддитивные технологии и в Российской Федерации. Объединение «Пульсар» применяет 3D-технологии в проектировании, разработке и производстве

винтовых установок. Уже сейчас проходят испытания установки, в которых мастер-модели и отливки для них изготовлены с применением аддитивных технологий.

В качестве примера высокотемпературных пластиков можно привести пластик, РЕЕК который с недавнего времени используется в 3D печати. РЕЕК – это органический термопластичный полимер, который обладает хорошим сочетанием механических свойств, включая высокотемпературные характеристики, механическую прочность и отличную химическую стойкость. Также известен пластик РЕЕК армированный углеволокном – CFРЕЕК, обладающий улучшенными прочностными характеристиками, меньшей усадкой и рабочей температурой до 400 °С. Также широко известны пластики PSU и PEI.

Применение высокотемпературных пластиков в обычных (низкотемпературных) 3D-принтерах встречается с большим количеством проблем, делающим такую печать практически невозможной. В качестве таких проблем можно указать дефект деламинация изделия, перегрев электроники и шаговых двигателей, недостаточную мощность экструдера, применение в экструдере напечатанных шестерен, в связи с чем для печати высокотемпературным пластиком необходим специальный 3D принтер, способный печатать высокотемпературными полимерами, что позволит производить детали, работающие в условиях высоких температур.

В настоящее время такие принтеры отличаются высокой стоимостью и низкой доступностью. Также введенные санкции сильно ограничивают доступ к рынку высокотехнологического оборудования и, в частности, рынку промышленных 3D-принтеров. Анализ рынка показывает, что коммерчески доступные 3D-принтеры, продаются по цене от полутора до семи миллионов рублей. Высокая стоимость таких высокотемпературных принтеров обусловлена сложностью печати при температуре выше 250 °С. [6].

Известны попытки снизить стоимость высокотемпературного 3D-принтера используя модернизацию существующих систем. Так, НАСА дополнило коммерческий принтер Lulzbot Taz 4 с открытым исходным кодом (который сам является RepRap), а Zawaski и Williams продемонстрировали результаты реконструкции для высокотемпературного 3D-принтера с дельта кинематикой [7].

С целью выполнения задачи импортозамещения был разработан проект высокотемпературного 3D-принтера, работающего в декартовой системе координат. С целью предотвращения коробления и расслоения изготавливаемого изделия камера печати должна быть закрытой. Принтер имеет полностью закрытый корпус. Корпус выполнен из листовой, нержавеющей стали толщиной 0,3 мм. Имеется две дверцы для загрузки филамента и контроля печати. Корпус смонтирован на каркасе. Для каркаса используются алюминиевые профили длиной 470 мм и 600 мм. Они собраны с помощью уголков под углом 90 градусов винтами М5 на 8 мм.

В камере печати установлен конвекционный нагреватель воздуха типа РТС 73х63х7. Температурой нагрева от 60 до 270 градусов мощностью до 1000W.

Стол печати имеет размеры 300×300 мм. Перемещение стола происходит при помощи шарико-винтовой передачи (ШВП) 4R25-25-0.05 производства Hiwin. ШВП расположена снаружи горячей камеры печати. Внутри камеры печати заведена консоль, на которой расположен подогреваемый стол. Перемещение стола по оси Z 400 мм.

Принтер оснащен экструдером типа Bowden QIDI X-MAX смонтированным на поверхности корпуса. Перемещение экструдера происходит по направляющим типа Hiwin CGW20HCZAN. Перемещение осуществляется при помощи ШВП. Катушка с филаментом для предотвращения перегрева расположена снаружи корпуса.

Все устройства, которым требуется относительно низкая рабочая температура (ниже 70 °С), такие как шаговые двигатели и электроника, монтируются вне нагреваемой камеры печати, на наружной поверхности корпуса, чтобы предотвратить их пере-

грев. Расчетная рабочая температура экструдера 500 °С. Блок питания электроники принтера 300W. Плата управления принтером 32 бита LERDGE-X. Драйверы шаговых двигателей TMC 2100.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Солецкий В. В., Нюняйкина М. С., Перевалов А. А., Куриный В. В. Двухсредный беспилотный летательный аппарат // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2019. – Т. 1. – № 2(38). – С. 4-15.
2. Куриный В.В., Солецкий В.В., Лю Бинь Особенности технологии изготовления корпусов двухсредных беспилотных аппаратов методом послойного наплавления FDM. // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2-2(52). – С. 34-41.
3. RepRap – the replicating rapid prototype/ R. Jones, P. Haufe, E. Sells, P. Iravani, V. Olliver, C. Palmer, A. Bowyer // Robotica. – 2011. – Vol(29). – Pp. 177-191.
4. RepRap: The replicating rapid prototyper: Maximizing customizability by breeding the means of production / E. Sells, S. Bailard, Z. Smith, A. Bowyer, V. Olliver // Handbook of Research in Mass Customization and Personalization, 2010. – Pp. 568-580.
5. Bowyer A. 3D printing and humanity's first imperfect replicator, //3D Printing Additive Manufacturing. – 2014. – Vol 1. – N 1. – Pp. 4–5.
6. Current understanding and challenges in high temperature additive manufacturing of engineering thermoplastic polymers / A. Das, C. A. Chatham, J. J. Fallon [et al.] // Additive Manufacturing. – 2020. – Vol. 34. – P. 101218.
7. Zawaski C., Williams C. Design of a low-cost, high-temperature inverted build environment to enable desktop-scale additive manufacturing of performance polymers // Additive Manufacturing. – 2020. – Vol. 33. – P. 101111.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>СЕКЦИЯ СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ</b> .....	3
<b>Баклыкова М.А., Старунская В.И., Шубин И.Н., Попова А.А.</b> РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО ЭФФЕКТА ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ПРИ АКТИВАЦИИ УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА.....	3
<b>Балахонов Д.И.</b> РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ БОРИДОВ ВОЛЬФРАМА В СРЕДЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ.....	6
<b>Бао Фэнюань, Люй Лань, Башков О.В., Башков Г.О.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ АЭ ПРИ ЗАРОЖДЕНИИ И РАСПРОСТРАНЕНИИ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ 1163 С МДО ПОКРЫТИЕМ.....	10
<b>Беген Н.Н., Каракулов Р.А.</b> ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ.....	14
<b>Белова И.В., Таирова А.А.</b> ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЧИН НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОВЕДЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ УГЛОВОГО ПРОКАТА.....	18
<b>Божоев И.Ч., Сапожник К.Р., Башкова Т.И., Башков О.В.</b> КИНЕТИКА СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СТАЛИ 45 ПРИ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ.....	21
<b>Бойко С.А., Ковшова Т.С., Осипова Н.С., Гальперина С.Э.</b> НАНОЧАСТИЦЫ НА ОСНОВЕ АЛЬБУМИНА ДЛЯ СО-ДОСТАВКИ ПАКЛИТАКСЕЛА И ПРОИЗВОДНОГО ЭТОПОЗИДА, СОДЕРЖАЩИЕ ФЛУОРЕСЦЕНТНУЮ МЕТКУ: ПОЛУЧЕНИЕ И БИОВИЗУАЛИЗАЦИЯ.....	27
<b>Брянский А.А., Безрук М.Н., Ефимов Т.А., Бобруйко Д.А., Башков И.О.</b> АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ, РЕГИСТРИРУЕМАЯ С ОПТОВОЛОКОННЫМИ ДАТЧИКАМИ ПРИ ИСПЫТАНИИ РАСТЯЖЕНИЕМ СТЕКЛОПЛАСТИКА.....	32
<b>Брянский А.А., Ефимов Т.А., Башков И.О., Безрук М.Н.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, РАЗМЕЩЕННЫМИ НА ПЛАСТИНЕ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16.....	35
<b>Ваулин В.И., Сингеев С.А., Скачкова Н.А., Янина А.В.</b> ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЗАВОДА МОЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ.....	40
<b>Григорьева А.Л., Башков О.В.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ.....	44
<b>Кондратьев М.В., Жикина Л.А., Минкин А.М.</b> ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК TiO <sub>2</sub> .....	46
<b>Коробчук М.В., Саенко С.С., Веригин А.Н.</b> НИЗКОЧАСТОТНОЕ ВИБРАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КАК СПОСОБ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ.....	48

<b>Лим Л.А., Заболотная А.М., Галкина Д.В.</b> ПОЛУЧЕНИЕ МИКРОВОЛОКОН ИЗ ПОЛИКАРБОНАТА, ДОПИРОВАННЫХ $\text{HODVMVF}_2$ .....	53
<b>Матрохина А.Н., Трифонова И.П., Бурмистров В.А.</b> МИКРОВОЛНОВОЙ СИНТЕЗ N-АЛКИЛИРОВАННОГО ИМИДАЗОЛА.....	57
<b>Морозова Т.Д., Шакирова О.Г.</b> СИНТЕЗ, РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОЕ И СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСА КОБАЛЬТА(II) С 2,4-ДИМЕТИЛПИРАЗОЛО[1,5-А]БЕНЗИМИДАЗОЛЕ.....	59
<b>Орлова Т., Пивень А.О., Матюшова О.А., Зырянова П.И., Носкова У.В.</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИСТИКИ САМОПРОИЗВОЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАТТЕРНОВ В СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ.....	62
<b>Проценко А.Е., Люхо И.А.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕСТРУКЦИИ ЭПОКСИДНОЙ МАТРИЦЫ И СТЕКЛОВОЛОКОННОГО НАПОЛНИТЕЛЯ ПКМ В СРЕДЕ ЭТИЛОВОГО СПИРТА В ПРИСУТСТВИИ $\text{NaOH}$ .....	64
<b>Сапожник К.Р., Божоев И.Ч., Башков О.В.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАТОРА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ.....	67
<b>Скорб Е.В., Носкова У.В., Зырянова П.И., Королев И.С., Пивень А.О.</b> КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ УРИКАЗЫ В ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНЫХ СЛОЯХ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МОЧЕВОЙ КИСЛОТЫ.....	70
<b>Снегирёв А.О., Аслаева О.С.</b> ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АКТУАТОРА С ДВУМЯ ПРОТИВОДЕЙСТВУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА.....	73
<b>Сучков В.С., Москвин И.Г.</b> РАЗРАБОТКА ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ГРУНТОВКИ ДЛЯ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ.....	77
<b>Уласевич С.А., Зырянова П.И., Носкова У.В., Королев И.С., Пивень А.О.</b> ИОНОСЕЛЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ИОННЫХ ТОКОВ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	80
<b>Уласевич С.А., Королев И.С., Зырянова П.И., Носкова У.В.</b> ИЗУЧЕНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИЙ КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АНАЛИЗА ВОДНО-СПИРТОВЫХ РАСТВОРОВ.....	83
<b>Чемакина И.С., Иванцов М.И., Крысанова К.О., Третьяков Н.Ю., Елышев А.В.</b> НОВЫЕ КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНОЙ БИОМАССЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО МЕТАНА.....	86
<b>Чжо Зин Оо, Бурдасова А.А., Афанасьева А.А., Самар Е.В., Кривобоков А.А.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТАЛИ 08X18N10T, ПОЛУЧЕННОЙ ИЗ ПОРОШКА МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ.....	89
<b>Шуляк Д.А., Проценко А.Н.</b> КАТАЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ КОМПЛЕКСА МЕДИ(II) С 1-(4-ХЛОРФЕНИЛ)ПИПЕРАЗИНОМ НА ПРИМЕРЕ РЕАКЦИИ ИЗОМЕРИЗАЦИИ Н-ГЕПТАНА.....	94
<b>Яцко Д.С.</b> ОСОБЕННОСТИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	96

<b>СЕКЦИЯ ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЦЕССЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ.....</b>	<b>101</b>
<b>Арсеньев В.Б., Серебренникова А.Г.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ "КАЧАЛКА" С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САД/САМ/САЕ-СИСТЕМ.....	101
<b>Арчаков Б.М.-Б., Бахматов П.В.</b> ВЛИЯНИЕ УГЛА ЗАТОЧКИ ВОЛЬФРАМОВОГО ЭЛЕКТРОДА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ШВА.....	104
<b>Бахматов П.В., Тошев С.К.</b> РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ТОНКОСТЕННЫХ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ.....	107
<b>Бондаревский Д.М., Бахматов П.В.</b> О ВОЗМОЖНОСТИ СВАРКИ ТРЕНИЕМ ТВЁРДОСПЛАВНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	110
<b>Григорьев В.В., Рубан К.Е.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ НЕРАЗЪЁМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ.....	113
<b>Дудник Д., Долманжи А.А., Каракулов Р.А.</b> ФОРМИРОВАНИЕ ПРОВОДЯЩЕГО СЛОЯ В TSV-СТРУКТУРАХ МЕТОДОМ HIPIMS.....	117
<b>Карпенко В.А., Щелкунов Е.Б., Весельева Е.С.</b> 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ТРОСОВЫМ ПРИВОДОМ В САД-СИСТЕМАХ.....	122
<b>Карпенко В.А., Щелкунов Е.Б.</b> СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ НА ОСНОВЕ МЕХАНИЗМА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ.....	126
<b>Комарова К.К., Кравченко А.С., Бахматов П.В.</b> АВТОМАТИЧЕСКАЯ ИМПУЛЬСНАЯ АРГОНОДУГОВАЯ СВАРКА ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ.....	129
<b>Кравченко Е.Г., Евглевская Е.Е.</b> АНАЛИЗ РИСКОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....	133
<b>Кравченко Е.Г., Холощак К.М.</b> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ АККРЕДИТАЦИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗАВОДСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ.....	136
<b>Лаврик В.А., Пронин А.И.</b> АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТРУДОЁМКОСТИ РАЗРАБОТКИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ.....	139
<b>Морквин Н.А., Отряскина Т.А.</b> УЛУЧШЕНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА.....	141
<b>Отряскина Т.А., Кравченко А.К.</b> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЦИРКУЛЯЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ГАЗООХЛАЖДАЕМОМ РЕАКТОРЕ.....	144
<b>Отряскина Т.А., Тактарова А.Н.</b> ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ГАЗА РЕГЕНЕРАЦИИ НА УСТАНОВКАХ АМИНОВОЙ СЕРООЧИСТКИ.....	147



<b>Полейчук П.А., Плетнев Н.О.</b> ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА НА СООТНОШЕНИЕ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА В ОБЪЕМЕ СВАРНОЙ ТОЧКИ.....	150
<b>Саблин П.А., Юрченко М.С.</b> НОВЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПОСЛЕ МЕХАНООБРАБОТКИ.....	154
<b>Саблин П.А., Юрченко М.С.</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ПО ОЦЕНКЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ.....	156
<b>Старничук Е.П., Кравченко А.С., Бахматов П.В.</b> КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ В WeldCNC.....	159
<b>Старцев Е.А.</b> О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ОТХОДОВ.....	163
<b>Стробыкин Н.А., Бахматов П.В., Григорьев В.В.</b> ПРОБЛЕМЫ СВАРКИ ДЛИННОМЕРНЫХ РЕБРИСТЫХ ТИТАНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ НА АВТОМАТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ УСП-5000.....	166
<b>Сунь Лэйсинь, Григорьев В.В., Бахматов П.В.</b> ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ20 В УСЛОВИЯХ ФАЗОВОГО ПРЕДПРЕВРАЩЕНИЯ.....	169
<b>Фролов А.В., Комарова К.К.</b> ПРОГРАММИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СВАРОЧНОЙ ГОРЕЛКИ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СВАРКЕ.....	173
<b>Фролов А.В., Кравченко А.С.</b> РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СВАРОЧНОЙ ГОРЕЛКИ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СВАРКЕ.....	179
<b>Фролов А.В., Кравченко А.С.</b> РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ДУГОЙ.....	181
<b>Чернышова Д.В.</b> НОВОЕ РЕШЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКОВОЙ ФОРМЫ.....	185
<b>Шиляев А.В., Бахматов П.В.</b> ТАКТИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ШВОВ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ.....	188
<b>Щелкунов Е.Б., Карпов Р.С.</b> ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ ОБРАБОТКИ КОРПУСНОЙ ДЕТАЛИ С ПОМОЩЬЮ CAD/CAM-СИСТЕМ.....	192
<b>СЕКЦИЯ АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ</b> <b>ТРАНСПОРТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА.....</b>	195
<b>Агарков О.В., Хвостиков А.С.</b> АНАЛИЗ ОПЫТНОГО СЖИГАНИЯ НЕПРОЕКТНОГО БУРОГО УГЛЯ ПЕРЕЯСЛОВСКОГО УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА НА КОТЛЕ БКЗ-210-140Ф КОМСОМОЛЬСКОЙ ТЭЦ-2.....	195
<b>Гринкруг М.С., Мохамад Кара Балли, Новгородов Н.А.</b> СИСТЕМА ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВО ВРЕМЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	197
<b>Гуменюк Н.С., Тихова И.В.</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНТЕЙНЕРОВ OPEN TOP КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧНОСТИ ПЕРЕВОЗКИ УГЛЯ.....	200

<b>Гунькова О.В., Тарасова И.В.</b> ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕГРУЗКИ ГЛИНОЗЕМА В ПОРТАХ РОССИИ.....	204
<b>Евлахина Е.А., Шаломов В.И.</b> ГАЗОТУРБИННЫЕ И ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ В СТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ.....	206
<b>Ковалёв А.В., Шаломов В.И.</b> АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ НА ДАВЛЕНИЕ В КОНДЕНСАТОРЕ НА ПРИМЕРЕ ТУРБОУСТАНОВКИ Т-63-13/0.25 СОВЕТСКО-ГАВАНСКОЙ ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ.....	209
<b>Корнеева Л.А., Смирнов А.В.</b> ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ЭНЕРГЕТИКЕ.....	213
<b>Кузнецова Ю.Е., Гунькова О.В.</b> ОБЗОР МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ОТ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ПОРТАХ РОССИИ....	216
<b>Песков Е.К.</b> АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАЛЬКУЛЯТОРА СТОИМОСТИ РАЗВОЗКИ ГРУЗОВ.....	219
<b>Пиголицина Э.А., Хвостиков А.С.</b> АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ УСТАНОВОК ГЕНЕРАЦИИ ХОЛОДА.....	223
<b>Попов А.Ю., Донец В.М.</b> ЭФФЕКТИВНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ РЕАКТИВНОСТИ СТУПЕНЕЙ ОТСЕКА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ.....	227
<b>Попов А.Ю., Тарасов С.Н.</b> ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ГТУ С ИЗМЕНЕННОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ ПРОЦЕССОВ.....	230
<b>Пухов А.А., Гринкруг М.С.</b> ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО НЕДОЖОГА В КОТЛОАГРЕГАТАХ С ТВЕРДОТОПЛИВНЫМ ПИТАНИЕМ.....	233
<b>Смирнов А.В., Исаев М.С.</b> АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ.....	236
<b>Колмыкова В.О., Смирнов А.В.</b> ОСОБЕННОСТИ ЯДЕРНОЙ АВАРИИ НА АТОМНОЙ ПОДВОДНОЙ ЛОДКЕ К-431 В БУХТЕ ЧАЖМА.....	239
<b>Смирнов А.В., Попов Н.А.</b> ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЦИЛИНДРОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН.....	242
<b>Сухотская А.Ю., Гунькова О.В.</b> ТРАНСПОРТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАУЧУКА И ОСОБЕННОСТИ ЕГО ТРАНСПОРТИРОВКИ.....	244
<b>Табаков Е.В., Гунькова О.В.</b> ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЕРЕВОЗКИ ЗЕРНА ИЗ РОССИИ НА ЭКСПОРТ.....	247
<b>Хвостиков А.С., Лынный А.А.</b> УРАВНЕНИЕ РЕЙНОЛЬДСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА В СМАЗОЧНОМ СЛОЕ ЧАСТИЧНО-ПОРИСТОГО КОНИЧЕСКОГО ГАЗОСТАТИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА.....	250
<b>Шаломов В.И., Макаров В.В.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЕЖЕГО ПАРА НА МОЩНОСТЬ И ЭКОНОМИЧНОСТЬ ЭНЕРГООБЛОКА ТЭС НА СВЕРХКРИТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ НА БАЗЕ ТУРБИНЫ К-300-240.....	253

<b>Шевченко Д.В., Каменских И.В.</b> ДОСТАВКА МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ ПРЕДПРИЯТИЯ КОМСОМОЛЬСКА-НА-АМУРЕ В МАГАДАН.....	257
<b>Щекочихина Д.В., Каменских И.В.</b> ИНСТРУМЕНТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРОДСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ.....	260
<b>СЕКЦИЯ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВИАЦИОННОЙ И МОРСКОЙ ТЕХНИКИ.....</b>	263
<b>Бобков А.В., Кривенко М.Ю.</b> ОРГАНИЗАЦИЯ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА.....	263
<b>Боярчук И.М., Пак Т.И., Бурменский А.Д.</b> ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВМЕСТИМОСТИ СУДОВ В САД-СИСТЕМЕ КОМПАС-3D.....	265
<b>Гончаров А.С., Жарихина А.В., Бурменский А.Д.</b> АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ САПР И PLM-СИСТЕМ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СУДОСТРОЕНИИ.....	269
<b>Каменских И.В., Мерзликина В.С.</b> ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММЫ КОМПАСFLOW В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ.....	274
<b>Кузнецов А.К., Лозовский И.В., Марьин С.Б.</b> ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛАСТОСЫПУЧИХ СРЕД ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПРОФИЛЕЙ ИЗ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК.....	277
<b>Кузнецов Э.А., Котов А.О., Кулеш В.А.</b> АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К БОРТОВОМУ НАБОРУ РЫБОЛОВНЫХ СУДОВ.....	280
<b>Курманов У.Э., Сапарбекова А.Ж.</b> СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНАЖЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ И ТРЕНИРОВКИ АВИАЦИОННОГО ПЕРСОНАЛА.....	284
<b>Лозовский И.В., Седунов Я.А.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОЛУПАТРУБКА ГИДРОГАЗОВОЙ СИСТЕМЫ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА.....	288
<b>Мерзликина В.С., Каменских И.В.</b> РАСЧЕТ ОБТЕКАНИЯ ПОГРУЖЕННОГО КРЫЛА В ПРОГРАММЕ КОМПАСFLOW.....	291
<b>Мин Ко Хлайнг, Потянихин Д.А., Синельщиков А.А.</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТ ТРЕХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МУНИ-РИВЛИНА ДЛЯ ЭЛАСТИЧНОГО МАТЕРИАЛА.....	294
<b>Морозов Е.Д., Журбина И.Н.</b> АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВОЙ КОНСТРУКЦИИ В СИСТЕМЕ ПРОЧНОСТНОГО РАСЧЕТА АРМ FEM.....	299
<b>Садовская О.А., Исмаилова Ж.К., Куанышбаева А.Р.</b> ЭКОНОМИКО-УПРАВЛЕНЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ОБЩЕСТВА В СФЕРЕ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ.....	302
<b>Свиридов А.В., Скалёва А.В.</b> ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОТЛИВОК АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	305
<b>Стадник А.С., Самойлова А.В., Журбина И.Н.</b> МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ СУДОВ.....	308
<b>Третьяков В.А., Куриный В.В.</b> АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В САМОЛЕТО- И КОРАБЛЕСТРОЕНИИ.....	311

*Научное издание*

**НАУКА, ИННОВАЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ:  
ОТ ИДЕЙ К ВНЕДРЕНИЮ**

Часть 2

Материалы II Международной научно-практической  
конференции молодых ученых  
Комсомольск-на-Амуре, 14-18 ноября 2022 г.

Ответственный редактор А. В. Космынин

Статьи публикуются в авторской редакции

Подписано в печать 06.12.2022.

Формат 60×84 1/16. Бумага 65 г/м<sup>2</sup>. Ризограф RISO EZ 570E.  
Усл. печ. л. 18,70. Уч.-изд. л. 18,00. Тираж 22 экз. Заказ 30716.

Полиграфическая лаборатория  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»  
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.