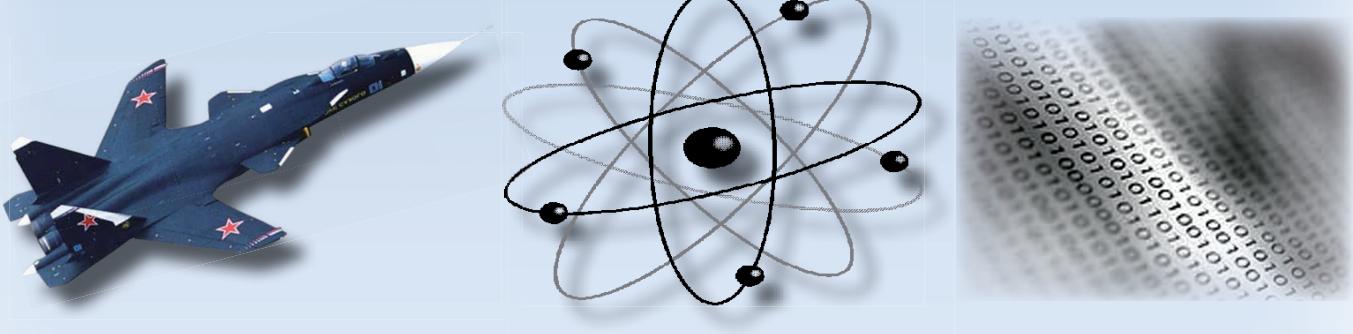


# Учёные записки

ISSN 2076-4359  
№ III (51)  
2021

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



Науки о природе и технике

16+



Рукописи проходят обязательное рецензирование.  
Редакция не возвращает рукописи авторам.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых периодических изданий ВАК РФ

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций России. Свидетельство ПИ № ФС7738212 от 30.11.2009.

ISSN 2076-4359 = Ученые записки Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta

Уважаемые авторы, пожалуйста, прсылайте свои материалы на адрес электронной почты:  
[journal@knastu.ru](mailto:journal@knastu.ru)

Правила оформления материалов размещены на странице журнала «Учёные записки КнАГТУ», находящейся на сайте  
<http://www.knastu.ru>

Материалы, оформленные с нарушением данных правил, к рассмотрению не принимаются.

Адрес учредителя и издателя:  
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,  
пр. Ленина, д. 27

Телефон для справок:  
+7 (4217) 24-13-48

Адрес редакции: 681013,  
г. Комсомольск-на-Амуре,  
ул. Комсомольская, д. 50, ауд.508  
Телефон для справок:  
+7 (4217) 24-13-48

Индекс журнала  
в каталоге Роспечать: 66090.  
Цена свободная.  
© Все права на опубликованные материалы принадлежат учредителю журнала – ФГБОУ ВО  
«КнАГУ», при их цитировании ссылка на журнал обязательна.

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

Журнал основан в 2010 году

#### Редакционная коллегия:

Главный редактор журнала:

**Алексей Иванович Евстигнеев,**  
д-р техн. наук, проф.

Заместитель главного редактора,  
ответственный секретарь серии «Науки  
о природе и технике»:

**Сергей Николаевич Иванов,**  
д-р техн. наук, доц.

Заместитель главного редактора,  
ответственный секретарь серии «Науки  
о человеке, обществе и культуре»:

**Галина Алексеевна Шушарина,**  
канд. филол. наук, доц.

Технический редактор:

**Татьяна Николаевна Карпова**

Дизайн и верстка:

**Оксана Вадимовна Приходченко,**  
канд. техн. наук

Менеджер информационных ресурсов:

**Иван Константинович Андрианов,**  
канд. техн. наук

#### Серия: «Науки о природе и технике»

Отделы:

1. Авиационная и ракетно-космическая техника (**Сергей Иванович Феоктистов**,  
д-р техн. наук, проф.);
2. Энергетика (**Вячеслав Алексеевич Соловьев**, д-р техн. наук, проф.);
3. Управление, вычислительная техника и информатика (**Вячеслав Алексеевич Соловьев**, д-р техн. наук, проф., **Сергей Иванович Феоктистов**, д-р техн. наук, проф., **Сергей Николаевич Иванов**, д-р техн. наук, доц., **Николай Алексеевич Тарануха**, д-р техн. наук, проф., **Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
4. Математика и механика (**Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
5. Машиностроение (**Михаил Юрьевич Сарилов**, д-р техн. наук, доц., **Борис Николаевич Марьин**, д-р техн. наук, проф., **Борис Яковлевич Мокрицкий**, д-р техн. наук, доц., **Сергей Иванович Феоктистов**, д-р техн. наук, проф., **Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
6. Металлургия и металловедение (**Владимир Алексеевич Ким**, д-р техн. наук, проф., **Олег Викторович Башков**, д-р техн. наук, доц.);
7. Флот и кораблестроение (**Николай Алексеевич Тарануха**, д-р техн. наук, проф., **Виктор Михалович Козин**, д-р техн. наук, проф.);
8. Науки о земле и безопасности жизнедеятельности человека (**Ирина Павловна Степanova**, д-р техн. наук, проф.);
9. Строительство и архитектура (**Николай Петрович Крадин**, д-р архитектуры, проф., член-корреспондент РААСН, **Олег Евгеньевич Сысоев**, д-р техн. наук, доц.).

#### Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»

Отделы:

1. Философия, социология и культурология (**Татьяна Алексеевна Чабанюк**, д-р культурологии, проф., **Виктория Юрьевна Прокофьева**, д-р филол. наук, проф., **Вера Ивановна Юдина**, д-р культурологии, доц., **Надежда Юрьевна Костюрина**, д-р культурологии, доц., **Илья Игоревич Докучаев**, д-р филос. наук, проф., **Александр Георгиевич Никитин**, д-р филос. наук, проф.);
2. Филология и искусствознание (**Олег Александрович Бузуев**, д-р филос. наук, проф.);
3. Психология и педагогика (**Татьяна Евгеньевна Наливайко**, д-р пед. наук, проф.);
4. Политология и право (**Владимир Александрович Смоляков**, д-р полит. наук);
5. История (**Жанна Валерьяновна Петрунина**, д-р ист. наук, проф.);
6. Экономика (**Геннадий Иванович Усанов**, д-р экон. наук, проф., **Елена Витальевна Кизиль**, д-р экон. наук, доц.).

Периодичность: два раза в квартал (один номер каждой серии в квартал)

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА  
«УЧЁНЫЕ ЗАПИСКИ КОМСОМОЛЬСКОГО-НА-АМУРЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»**

**СЕРИЯ: «НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ»**

**АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА**

ВЯЧЕСЛАВ ИВАНОВИЧ ШПОРТ, доктор технических наук

ЦҮЙ СЮЙ, профессор Шенъянского аэрокосмического университета (КНР)

**ЭНЕРГЕТИКА**

АЛЕКСАНДР ЛООС, доктор философии, профессор Академии Грюндига в Нюрнберге (Германия)

ИШТВАН ВАЙДА, доктор технических наук, профессор, директор Института автоматики Будапештского университета технологии и экономики (Венгрия)

ШАНДОР ХАЛАС, доктор технических наук, профессор Будапештского университета технологии и экономики (Венгрия)

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА**

ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ КУЛЫИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, директор Института автоматики и процессов управления ДВО РАН

ТАКАО ИТО, доктор технических наук, профессор факультета бизнес-управления Университета Мицуми (Япония)

**МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА**

НИКИТА ФЁДОРОВИЧ МОРОЗОВ, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теории упругости Санкт-Петербургского государственного университета

ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ ЛЕВИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом математического моделирования, механики и мониторинга природных процессов Института автоматики и процессов управления ДВО РАН

БОРИС ДМИТРИЕВИЧ АННИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом механики деформируемого твёрдого тела Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

ЭДУАРД СТЕПАНОВИЧ ГОРКУНОВ, академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Института машиноведения УрО РАН

АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ ХОЛЬКИН, академик РАН, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник Института общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова

СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ГРИГОРЬЕВ, доктор технических наук, профессор, ректор Московского государственного технологического университета «Станкин»

**МЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ**

ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ КАБЛОВ, академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Всероссийского института авиационных материалов

КОНСТАНТИН ВСЕВОЛОДОВИЧ ГРИГОРОВИЧ, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией диагностики материалов Института металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН

**ФЛОТ И КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ**

ЛЕОНИД АНАТОЛЬЕВИЧ НАУМОВ, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, директор Института проблем морских технологий ДВО РАН

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНEDЕЯТЕЛЬНОСТИ**

ЕВГЕНИЙ ПЕТРОВИЧ КИСЕЛЕВ, академик РАСХН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ведущий научный сотрудник Дальневосточного ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института сельского хозяйства РАСХН

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

ШИ ТИЕМАО, доктор философии, профессор, проректор Шенъянского архитектурно-строительного университета (КНР)

**СЕРИЯ: «НАУКИ О ЧЕЛОВЕКЕ, ОБЩЕСТВЕ И КУЛЬТУРЕ»**

**ФИЛОСОФИЯ, СОЦИОЛОГИЯ И КУЛЬТУРОЛОГИЯ**

ДАВИД ИЗРАИЛЕВИЧ ДУБРОВСКИЙ, доктор философских наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института философии РАН

КИРИЛЛ ЭМИЛЬЕВИЧ РАЗЛОГОВ, доктор искусствоведения, профессор, президент АНО «Новый институт культурологии»

**ФИЛОЛОГИЯ И ИСКУССТВОЗНАНИЕ**

СВЕТЛАНА ГРИГОРЬЕВНА ТЕР-МИНАСОВА, доктор филологических наук, профессор, президент факультета иностранных языков и регионоведения Московского государственного университета

ВАН ЦЗИНЬЛИН, доктор философии, профессор, директор Института международного образования Чанчуньского университета (КНР)

**ПСИХОЛОГИЯ И ПЕДАГОГИКА**

ЕКАТЕРИНА ИОСИФОВНА АРТАМОНОВА, доктор педагогических наук, профессор кафедры педагогики высшей школы Московского педагогического государственного университета им. В. И. Ленина

**ПОЛИТОЛОГИЯ И ПРАВО**

НИКОЛАЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ МЕРЕЦКИЙ, доктор юридических наук, профессор, заведующий кафедрой уголовно-правовых дисциплин Дальневосточного государственного университета путей сообщения

**ИСТОРИЯ**

АЛЕКСАНДР МАНУЭЛЬЕВИЧ РОДРИГЕС-ФЕРНАНДЕС, доктор исторических наук, профессор, заведующий кафедрой новой и новейшей истории Московского педагогического государственного университета им. В. И. Ленина

**ЭКОНОМИКА**

АЛЕКСАНДР ЕВСТРАТЬЕВИЧ ЗУБАРЕВ, доктор экономических наук, профессор, первый проректор по стратегическому развитию и международному сотрудничеству Тихоокеанского государственного университета

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА  
MANAGEMENT, COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

**Александров С. Ю.**  
**S. Yu. Aleksandrov**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ  
КРИСТАЛЛИЗаторА УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ  
ПРИ СВОБОДНО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ПОГРУЖНОМ СТАКАНЕ**

**MODELING OF THE PROCESS OF FILLING WITH LIQUID METAL OF A CONTINUOUS  
STEEL CASTING INSTALLATION CRYSTALLIZER WITH A FREE-BOUNDARY  
ROTATING SUBMERSIBLE TANK**

**Александров Сергей Юрьевич** – старший преподаватель кафедры «Проектирование, управление и разработка информационных систем» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sandrov@mail.ru.

**Sergei Yu. Aleksandrov** – Senior Lecturer, Design, Management and Development of Information Systems Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sandrov@mail.ru.

**Аннотация.** В работе предложена модель процесса разливки стали в кристаллизаторе УНРС при его подаче из вращающегося погружного стакана.

**Summary.** The paper proposes a model of the process of casting steel in a UNRS mold when it is fed from a rotating submerged tank.

**Ключевые слова:** численное моделирование, жидкий металл, вращающийся погружной стакан, установка непрерывной разливки стали, заполнение, кристаллизатор.

**Key words:** numerical simulation, liquid metal, rotating submersible tank, continuous casting plant, filling, crystallizer.

УДК 519.677

Работа выполнена под руководством доктора технических наук доцента Э. А. Дмитриева и доктора технических наук профессора В. И. Одинокова.

Известно, что чем интенсивнее и равномернее потоки металла в объёме кристаллизатора, тем мельче получаемое при кристаллизации зерно металла и эффективнее процесс теплоотвода через стенки кристаллизатора. Данная проблема отражена в многочисленных публикациях и патентах, в которых описываются различные способы и устройства подачи жидкого металла в кристаллизатор установки непрерывной разливки стали (УНРС) [1–3]. При этом для ряда способов подачи жидкого металла в кристаллизатор уже построены математические модели, позволяющие по движущемуся жидкому металлу в объёме кристаллизатора оценить эффективность того или иного устройства, с помощью которого осуществляется данный процесс [4–9].

Суть предлагаемого нового способа подачи металла в кристаллизатор состоит в следующем (см. рис. 1). Жидкий металл из ковша 1 через погружной прямоточный стакан 2 поступает в плавающий глуходонный стакан 3 квадратного поперечного сечения, откуда через эксцентриковые окна 4 выходит в кристаллизатор 5. Выходящие из эксцентриковых окон струи жидкого металла создают вращательный момент, приводящий в движение (вращение) плавающий глуходонный стакан.

Вследствие вращения глуходонного стакана струи жидкого металла будут создавать эффект перемешивания, которое дополнительно усиливается от вращения квадратных граней (см. рис. 1, а). Имеем квазистационарный процесс, повторяющийся при повороте квадратного стакана на 180° при кристаллизаторе прямоугольного сечения, и на 90° при кристаллизаторе квадратного поперечного сечения.

речного сечения. Будем рассматривать процесс подачи металла в кристаллизатор прямоугольного поперечного сечения.

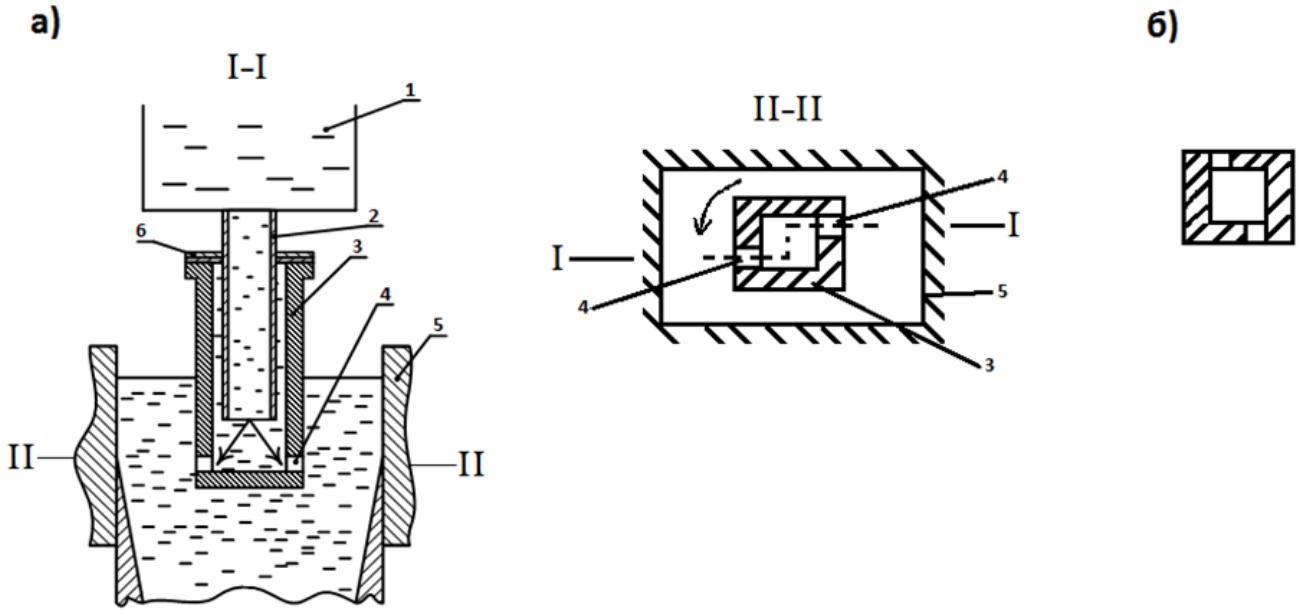


Рис. 1. Схема процесса разливки жидкого металла в кристаллизатор:  
а – общий вид устройства с разрезом; б – при повороте погружного стакана на 90°

На рис. 2 отображена схема вращения стакана квадратного поперечного сечения в плоскости ( $x_2 \times x_3$ ). Очевидно, что  $cd = c'd' = cc' = dd' = d$ . Возьмём произвольную точку  $b$  на стороне квадрата  $cd$ . При заданном направлении вращения квадрата со скоростью  $V$  имеем

$$\begin{aligned} V_t &= -V \cdot \sin \alpha, \\ \sin \alpha &= \frac{o'b}{r}, \\ V &= \frac{\pi \cdot r \cdot n}{30}, \\ V_t &= -\pi n \frac{x_2}{30}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $n$  – число оборотов, об/мин;  $x_2 = o'b$ .

Очевидно, формула (1) верна для поверхностей Г6. Для поверхностей Г5 имеем

$$V_t = \pi n \frac{x_3}{30}. \quad (2)$$

В течение поворота стакана на 180° процесс будет нестационарным. При этом из окон стакана в нижней его части выходит жидкий металл со скоростью  $V_M$ . Будем считать, что поперечные сечения окон равны. Процесс очень сложен даже при использовании численных методов.

Квадрат в горизонтальном сечении вращается вокруг центра  $O$  (см. рис. 2). При заданном направлении вращения одна половина грани квадрата  $o'c$  как бы выталкивает жидкий металл от себя наружу, а вторая половина грани  $o'd$  втягивает металл в противоположном направлении. То же самое происходит и с другими гранями квадрата. В этом смысле можно интерпретировать данный процесс как выход металла из участка грани  $o'c$  со скоростью  $V_t$  по формуле (1) и вход того

же объёма металла в участок грани  $o'd$  также со скоростью по формуле (1). Аналогичную интерпретацию движения металла можно применить и к другим граням квадрата с использованием формул (1), (2).

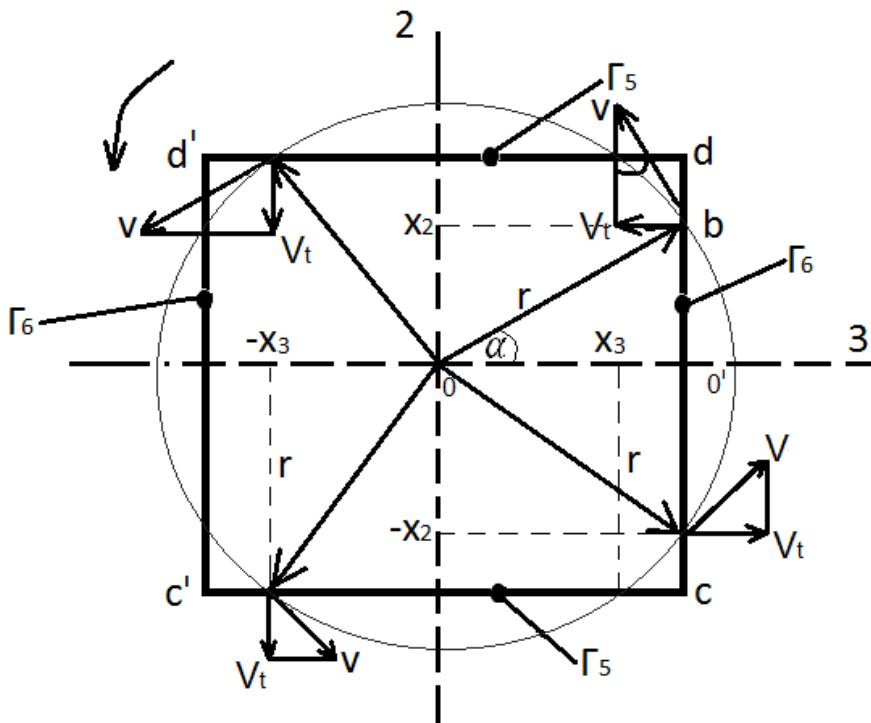


Рис. 2. Схема вращения погружного стакана квадратного поперечного сечения

Таким образом, будем считать погружной стакан квадратного поперечного сечения неподвижным, при этом через его грани втекает и вытекает металл со скоростями  $V_t$ , согласно формулам (1), (2). Это не касается окон стакана, из которых жидкий металл поступает в кристаллизатор со скоростью  $V_M$ . При этом будем рассматривать два положения квадратного стакана, повернутых друг относительно друга на  $90^\circ$  (см. рис. 1, *a*, *б*).

Вычисленные потоки металла в этих двух положениях стакана дадут представление и о течении металла в кристаллизаторе, когда стакан повернётся относительно первого положения (см. рис. 1, *a*) на  $45^\circ$ .

Такая идеализация позволяет рассматривать данный процесс как стационарный, что значительно облегчает его постановку и решение. Кроме того, не будем учитывать появляющуюся на гранях кристаллизатора корочку затвердевшего металла.

При таком технологическом процессе перемешивание жидкого металла в кристаллизаторе происходит интенсивнее, чем при процессе выхода металла в кристаллизатор из погружного стакана [8], но без вращения.

Дополнительное принудительное перемешивание металла позволит значительно повысить однородность металла по всему объёму кристаллизатора, а значит, качество и свойства формируемых заготовок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дюдкин, Д. А. Производство стали. В 4 т. Т. 4. Непрерывная разливка металла / Д. А. Дюдкин, В. В. Кисиленко, А. И. Смирнов. – М.: ТехноТехник, 2008. – 528 с.
2. Ефимов, В. А. Разливка и кристаллизация стали / В. А. Ефимов. – М.: Металлургия, 1976. – 552 с.
3. Intern Symposium on Electromagnetic Processing of Materials. October 25-28, 1994. Nagoya, Japan: ISIJ, 1994, 580 p.

**Александров С. Ю.**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРА УСТАНОВКИ  
НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ ПРИ СВОБОДНО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ПОГРУЖНОМ СТАКАНЕ

4. Разработка нового способа разливки слябовых заготовок на МНЛЗ / В. В. Стулов, В. А. Матысик, Т. В. Новиков, С. В. Щербаков, И. В. Чистяков, А. П. Плотников. – Владивосток: Дальнаука. 2008. – 156 с.
5. Одиноков, В. И. Численное моделирование процесса заполнения металла кристаллизатора с отражателем УНРС / В. И. Одиноков, А. И. Евстигнеев, Э. А. Дмитриев // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2019. – № 10. – С. 747-755.
6. Одиноков, В. И. Математическое моделирование процесса течения металла в кристаллизаторе при его подаче из погружного стакана с эксцентричными отверстиями / В. И. Одиноков, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2018. – № 8. – С. 606-612.
7. Одиноков, В. И. Численное моделирование процесса заполнения металлом кристаллизатора УНРС / В. И. Одиноков, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2017. – № 6. – С. 493-498.
8. Патент № 196254 Российская Федерация, МПК B22D 11/10. Устройство для подачи жидкого металла в вертикальный кристаллизатор установки непрерывной разливки стали через погружной прямоточный стакан: № 2019128247: заявлено 12.03.2018: опубликовано 21.02.2020 / Одиноков В. И., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А.; патентообладатель ФГБОУ ВО «КНАГУ». – 5 с.
9. Горнаков, А. И. Математическое моделирование процесса течения металла при новом способе непрерывной разливки стали / А. И. Горнаков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2012. – № III-1 (11). – С. 47-51.
10. Александров, С. Ю. Совершенствование устройств по подаче и перемешиванию жидкого металла в кристаллизаторе установки непрерывного разлива стали / С. Ю. Александров, А. А. Хусаинов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 113-116.



Амосова Е. В., Кикелин Д. С.  
E. V. Amosova, D. S. Kikelin

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗОН ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВЗВЕСЬЮ И ДРУГИМИ ПРИМЕСЯМИ

### MATHEMATICAL MODELING OF CONTAMINATION ZONES SPREADING WITH SUSPENSION AND OTHER IMPURITIES

**Амосова Елена Владимировна** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры механики и математического моделирования Инженерной школы Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток). E-mail: el\_amosova@mail.ru.

**Elena V. Amosova** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Mechanics and Mathematical Modeling of the Engineering School, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok). E-mail: el\_amosova@mail.ru.

**Кикелин Данил Станиславович** – бакалавр, кафедра механики и математического моделирования Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток). E-mail: danilkilkin@gmail.com.

**Danil S. Kikelin** – Bachelor, Department of Mechanics and Mathematical Modeling, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok). E-mail: danilkilkin@gmail.com.

**Аннотация.** В статье представлены результаты моделирования методом конечных элементов распространения взвесей, основанного на математической модели мелкой воды. С использованием метода характеристик выполнено моделирование конвективного переноса потока. Математическая модель расчёта объёмов и площадей зон загрязнения взвесью и другими примесями предназначена для расчёта гидродинамических полей движения водной среды и расчёта полей распространения взвешенных частиц. Исследовано влияние геометрической модели и наличия внутренних источников на концентрацию взвесей в слоях водной среды.

**Summary.** The article presents results of modeling by the finite element method of the dissemination of suspended matter based on a mathematical model of shallow water. The convective flow transfer was simulated using the method of characteristics. The mathematical model for calculating volumes and areas of pollution zones by suspension and other impurities is designed to calculate hydrodynamic fields of motion of the aquatic environment and to calculate the propagation fields of suspended particles. The influence of the geometric model and the existence of internal sources on the concentration of suspended matter in layers of the aquatic environment.

**Ключевые слова:** конечно-элементное моделирование, гидродинамическое моделирование, уравнения мелкой воды.

**Key words:** finite element simulation, hydrodynamic modeling, shallow water equations.

УДК 517.958:531.32,532.5

Целями настоящей работы являются моделирование и анализ математической модели распространения шлейфов мутности на геометрии прибрежной зоны, а также анализ полученных данных о размере негативного влияния, оказанного на водные биоресурсы и их среду обитания. Данные исследования помогут при разработке комплекса восстановительных мер для нейтрализации негативных последствий от проведённых работ [1; 9].

Основные выполняемые задачи: выявить источники воздействия на водную среду, определить их характеристики, время воздействия, рассчитать мощности источников поступления загрязняющих веществ и выполнить моделирование распространения шлейфов загрязнения водной среды. Математическое моделирование распространения шлейфов мутности на акватории позволяет производить расчёты двухмерной и трёхмерной гидравлики водных объектов и деформаций их ложа, дисперсии консервативных и неконсервативных примесей.

Теоретической основой настоящей работы послужили труды отечественных и зарубежных исследователей [2; 3; 5; 6; 7; 8; 12; 13]. Стоит отметить, что в России для моделирования распространения взвесей повсеместно используется теория мелкой воды, в то время как за рубежом применяются и другие методы, например, метод решёточных уравнений Больцмана.

В настоящей работе математическая модель строится в предположении гидродинамического приближения [10] на основе уравнений течений неоднородной жидкости при наличии пространственно-распределённых источников и учитывает турбулентный характер движения водного потока, нелинейный закон гидравлического сопротивления естественных потоков, описывает процесс русловых деформаций, физических и гранулометрических свойств донного материала с учётом влияния сложного рельефа морской долины. В отличие от имеющихся на сегодняшний день моделей [2; 3; 5; 6; 7; 8], предложенная модель учитывает влияние источников на динамику водной среды, а также изменение воздействия источника по всей длине в уравнении свободной поверхности.

Систему уравнений для моделирования распространения зон загрязнения можно записать в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + u \frac{q}{\rho_0} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\xi} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz' + v \Delta u + v(2\omega \sin \varphi) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + v \frac{q}{\rho_0} = -g \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\xi} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz' + v \Delta v - u(2\omega \sin \varphi) \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{q}{\rho_0} \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla(\rho H) \vec{u} + \rho H \operatorname{div} \vec{u} = \frac{q}{\rho_0} H, \quad H = \xi + h \\ \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (cu) + \frac{\partial}{\partial y} (cv) + \frac{\partial}{\partial z} (c(w - w_0)) = \frac{q}{\rho_0} c_s - \lambda c + v \Delta c \end{array} \right. , \quad (1)$$

где  $\vec{v} = \{u(x, y, z, t), v(x, y, z, t), z(x, y, z, t)\}$  – компоненты вектора скорости течения;  $\xi(x, y, t)$  – функция свободной поверхности;  $h(x, y)$  – функция поверхности дна;  $H(x, y, t)$  – расстояние от свободной поверхности до поверхности дна;  $\vec{u} = \{u(x, y, z, t), v(x, y, z, t)\}$  – двумерный вектор скорости;  $\rho_0$  – среднее значение плотности воды;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $q$  – плотность источников;  $v$  – коэффициент кинематической вязкости;  $\omega$  – угловая скорость вращения Земли;  $\varphi$  – географическая широта;  $c$  – концентрация растворённых или взвешенных примесей;  $w_0$  – скорость осаждения взвешенных примесей (гидравлическая крупность);  $\lambda$  – коэффициент не-консервативности;  $c_s$  – концентрация примеси.

К системе (1) добавляются краевые условия, которые учитывают трение о поверхность дна, ветровые касательные напряжения трения, трение на боковых границах, смежных с океаном. Так же задаётся начальное условие для вектора скорости на входящей границе.

Поставленная задача решается методом конечных элементов с дискретизацией всех уравнений по времени. Будем исследовать линеаризованную модель, которая характеризуется тем, что на новом временном слое решение находится из линейной разностной задачи.

Для моделирования конвективной производной, входящей в уравнения системы (1), используется метод характеристик [11], с помощью которого строится функция, описывающая конвективный перенос частиц с границы области. Для линеаризации нелинейных слагаемых в граничных условиях применяется метод простой итерации без уточнения. Следуя методу характеристик, полную производную по времени аппроксимируем в следующем виде:

$$\frac{d\xi^i}{dt} = \frac{\partial \xi^i}{\partial t} + \bar{v}^i \nabla \xi^i = \frac{\xi^{i+1}(x_1, x_2) - conv^i(x_1, x_2)}{\tau},$$

где  $\xi^i = \xi(x_1, x_2, i)$ ,  $i = 0, \dots, N$ ;

$$conv^i(x_1, x_2) = \begin{cases} \xi^i(x_1 - \tau v_1^i, x_2 - \tau v_2^i), & \text{если } s^* = 0, \\ g^i(x_1 - \tau v_1^i, x_2 - \tau v_2^i), & \text{если } s^* \neq 0, s^* \in [\tau i, \tau(i+1)], \end{cases}$$

здесь  $s^*$  – время попадания частицы в область;  $g^i$  – уровень поверхности воды на входящей границе.

В уравнении неразрывности была выполнена эллиптическая регуляризация.

Расчёт системы (1) проводился в программном комплексе FreeFem++ методом конечных элементов на двух моделях прибрежной зоны [4; 14]. Результатами вычислений являются графики скоростей и концентрации взвесей в слоях водной среды.

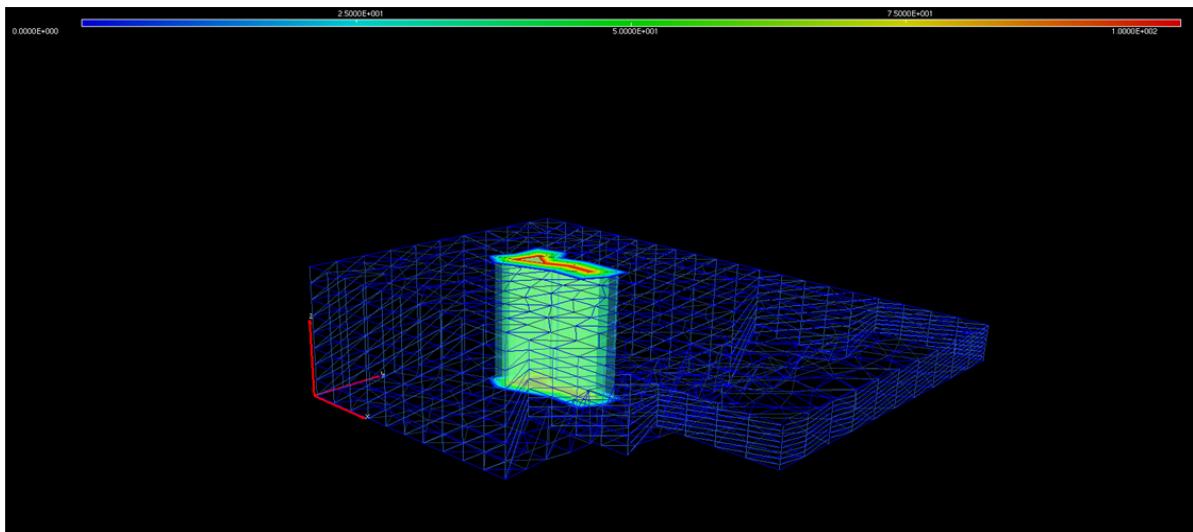


Рис. 1. Концентрация взвеси в начальный момент времени

На рис. 1 и 2 представлены графики распространения взвеси на прямоугольной геометрии при прямолинейном движении жидкости. Заметим, что концентрация взвеси немного сместилась к правой границе. Это обусловлено ветровым трением о поверхность воды.

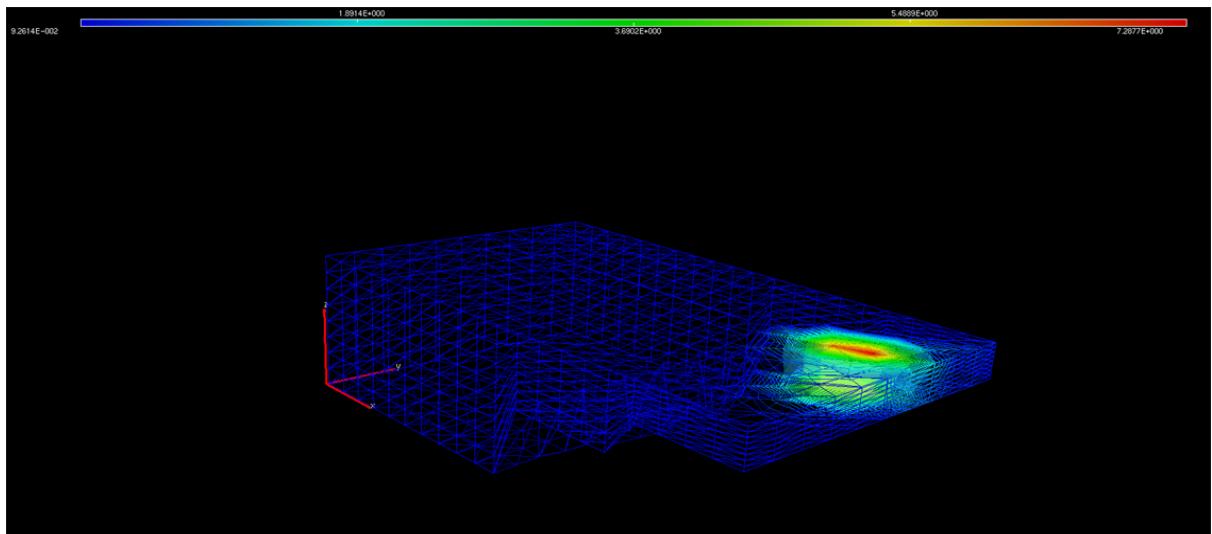


Рис. 2. Концентрация взвеси в момент времени

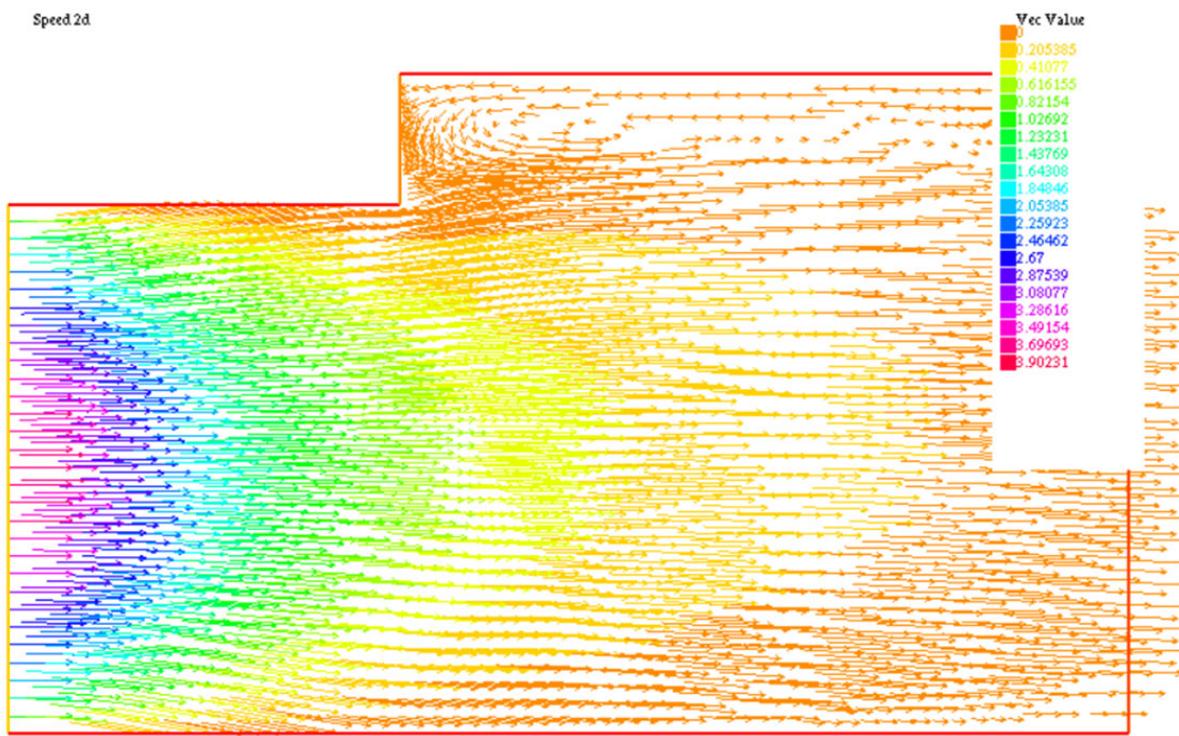


Рис. 3. Вектор скорости на расширяющейся геометрии в начальный момент времени

Рассмотрим расширяющуюся геометрию. По рис. 3 и 4 можно заметить, что при столкновении противоположных потоков образуется вихрь у правой границы области.

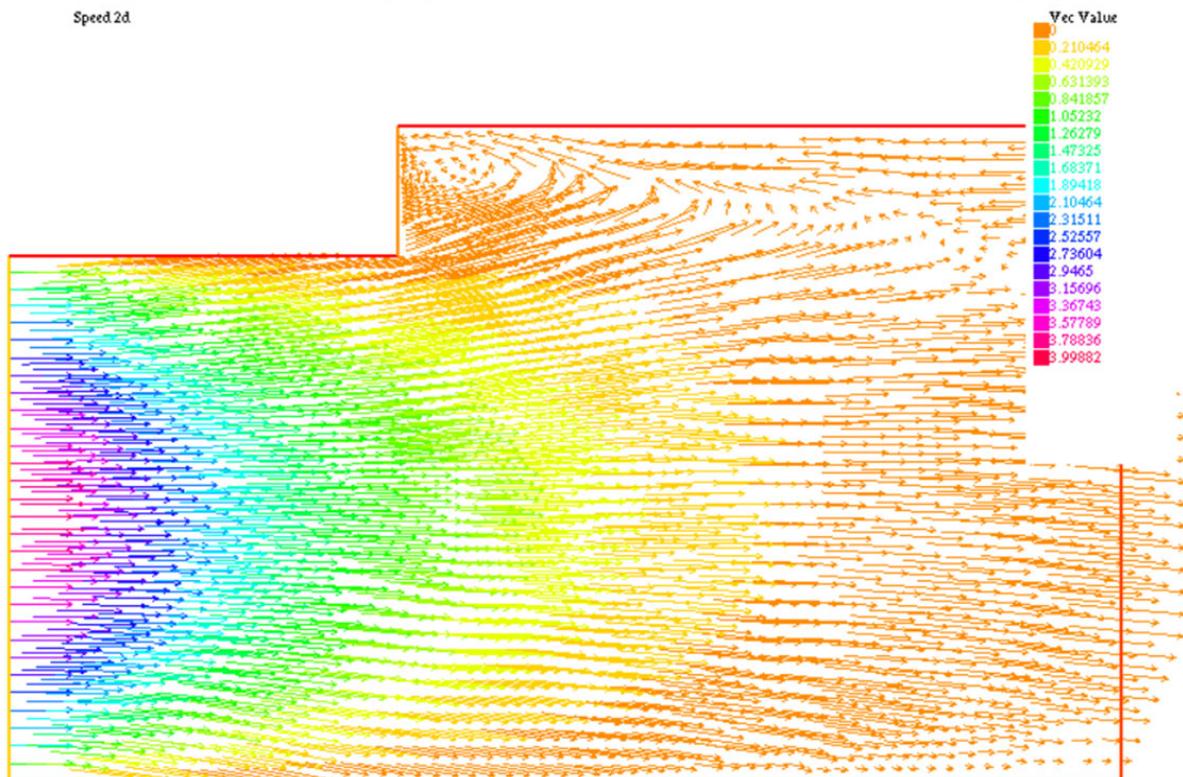


Рис. 4. Вектор скорости на расширяющейся геометрии в конечный момент времени

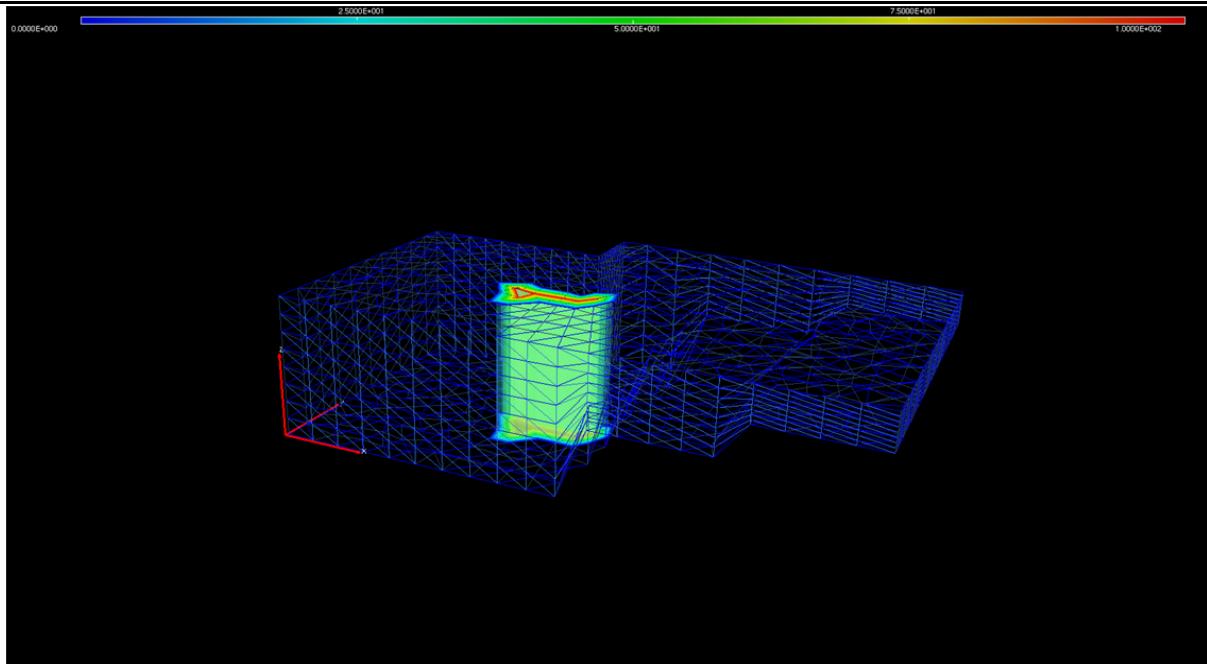


Рис. 5. Концентрация взвеси на расширяющейся геометрии в начальный момент времени

Получив соответствующие графики концентрации взвеси (см. рис. 5 и 6), видим, что распространению взвеси вдоль геометрии препятствуют встречные потоки жидкости. Поэтому взвеси сконцентрировались в центре геометрии, но продолжают распространяться небольшими концентрациями.

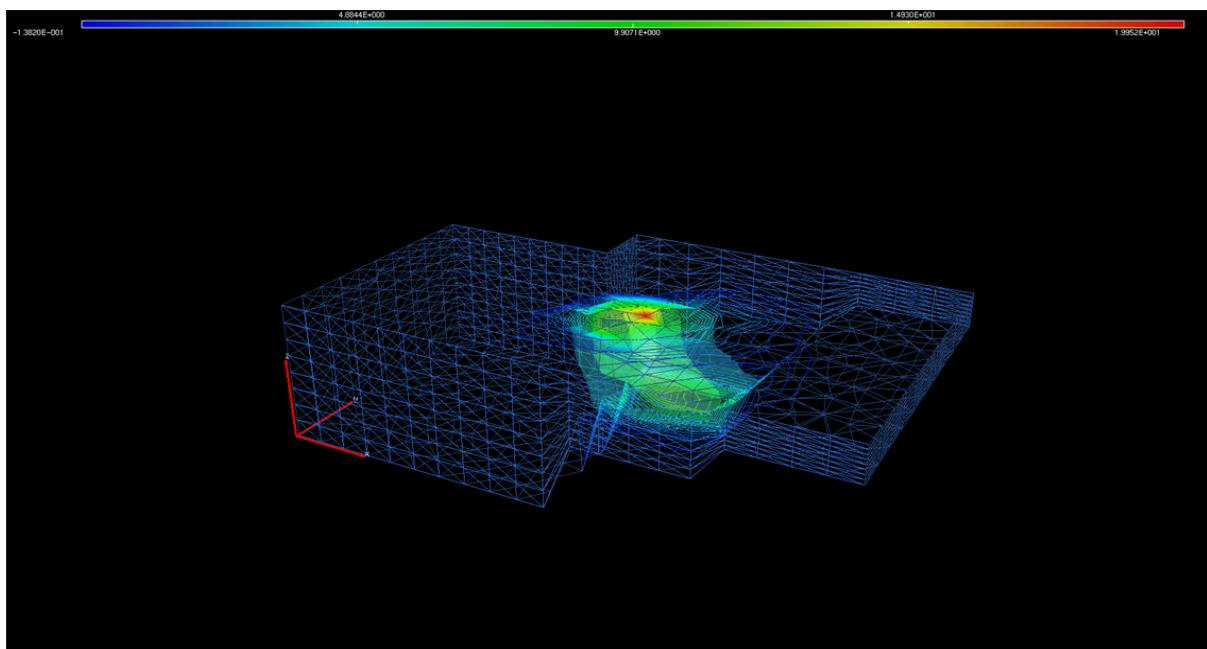


Рис. 6. Концентрация взвеси на расширяющейся геометрии в конечный момент времени

В ходе работы была предложена математическая модель описания движения водной среды, учитывающая пространственно-распределённые источники, методом характеристик смоделирован конвективный оператор переноса потока, произведена линеаризация нелинейных слагаемых итерационным методом, разработан алгоритм решения основной системы уравнений методом конеч-

ных элементов и написано две программы, реализующих этот алгоритм на построенных геометриях прибрежной зоны.

Данные, полученные в результате численного решения, в дальнейшем могут быть использованы для оценки негативного влияния проводимых работ в акватории и разработки комплекса мер по сохранению водных биоресурсов и среды их обитания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горбачев, С. А. Вопросы оценки ущерба водным биоресурсам / С. А. Горбачев // Труды Кольского научного центра РАН. – 2012. – № 4. – С. 46-62.
2. Дегтярева, Е. Е. Программная реализация трёхмерной математической модели транспорта взвеси в мелководных акваториях [Электронный ресурс] / Е. Е. Дегтярева, Е. А. Проценко, А. Е. Чистяков // Инженерный вестник Дона. Сетевое издание. – 2012. – № 4. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1283> (дата обращения: 12.11.2020).
3. Динамика океана / В. Г. Бухтеев, Ю. П. Доронин, М. М. Зубова и др.; под ред. Ю. П. Доронина. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 304 с.
4. Жуков, М. Ю. Использование пакета конечных элементов FreeFem++ для задач гидродинамики, электрофореза и биологии / М. Ю. Жуков, Е. В. Ширяева. – Ростов н/Д: ЮФУ, 2008. – 256 с.
5. Клеванный, К. А. Использование программного комплекса CARDINAL / К. А. Клеванный, Е. В. Смирнов // Журнал университета водных коммуникаций. – 2009. – Вып. 1. – С. 152-160.
6. Котеров, В. Н. Моделирование переноса взвешенных веществ на океаническом шельфе. Эффективная гидравлическая крупность полидисперсной взвеси / В. Н. Котеров, Ю. С. Юрзанская // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2009. – Т. 49, № 7. – С. 1306-1319.
7. Мухаметзянова, А. Г. Моделирование объёмов и площадей зон загрязнения взвесью в водной среде / А. Г. Мухаметзянова, К. А. Алексеев, Н. Н. Закиров // Вестник Казанского технического университета. – 2014. – Т. 21. – С. 361-364.
8. Наумов, В. А. Математическое моделирование распространения взвешенных примесей от точечного источника и их осаждения в водостоке / В. А. Наумов // Известия КГТУ. – 2017. – № 44. – С. 46-58.
9. Сорокина, Ю. В. К вопросу об эколого-правовой эффективности охраны водных биологических ресурсов / Ю. В. Сорокина // Право. Законодательство. Личность. – 2016. – № 1. – С. 195-200.
10. Сухинов, А. И. Математическое моделирование транспорта насосов в прибрежных водных системах на многопроцессорной вычислительной системе / А. И. Сухинов, А. Е. Чистяков, Е. А. Проценко // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. – 2014. – Т. 15, № 4. – С. 610-620.
11. Численные методы: учебник и практикум для СПО / под ред. У. Г. Пирумова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт. 2019. – 421 с.
12. Budinski L. Solute transport in shallow water flows using the coupled curvilinear Lattice Boltzmann method / L. Budinski // Journal of Hydrology. 2019. № 573. 557-567 p.
13. Cea L. Unstructured finite volume discretization of bed friction and convective flux in solute transport models linked to the shallow water equations / L. Cea, M. E. Vazquez-Cendon // Journal of Computational Physics. 2012. № 231. 3317-3339 p.
14. Hecht F., Pironneau O., Le Hyaric A., Ohtsuka K. FreeFem++. Version 2.17-1. <http://www.freefem.org>.



Андианов И. К.  
I. K. Andrianov

## ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОВОГО И СИЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

### NUMERICAL MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION MODEL OF THE SHELL THERMAL PROTECTION UNDER CONDITIONS OF THERMAL AND FORCE LOADING

**Андианов Иван Константинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Общая физика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); Россия, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.

**Ivan K. Andrianov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); Russia, 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave., 27. E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.

**Аннотация.** Представлена численная формулировка задачи многокритериальной оптимизации тепловой защиты оболочечных элементов в условиях теплового и силового нагружения с нелинейными ограничениями. Система ограничений учитывает теплопроводность оболочки с теплозащитным слоем, газодинамику процесса охлаждения. На основании метода множителей Лагранжа построена численная модель расчёта конкурирующих параметров тепловой защиты: теплового состояния оболочки, толщины покрытия, теплоотдачи, расхода и скорости охладителя. Оптимизация параметров оболочки проводилась с учётом ограничений на тепловое и напряжённое состояние. Для установления значимости каждого из критерии определены весовые коэффициенты и численно получены множества эффективных решений, доставляющих минимум целевой функции оптимизации.

**Summary.** A numerical formulation of the multi-criteria optimization problem with nonlinear constraints is presented. The system of restrictions takes into account the thermal conductivity of the shell with heat-shielding layers, the gas dynamics of the cooling process. Based on the method of Lagrange multipliers, a numerical model is constructed for calculating competing parameters of thermal protection: the thermal state of the shell, coating thickness, heat transfer, flow rate and speed of the cooler. Optimization of the shell parameters was carried out taking into account the restrictions on the thermal and stress state. To determine the significance of each of the criteria, weight coefficients are determined and sets of effective solutions are numerically obtained that provide a minimum of the optimization objective function.

**Ключевые слова:** метод множителей Лагранжа, численная модель, оптимальность по Парето, турбинная лопатка, весовые коэффициенты, теплоотвод.

**Key words:** Lagrange multiplier method, numerical model, Pareto optimality, turbine vane, weight coefficients, heat sink.

УДК 51-74

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Хабаровского края, грант № 72с/2020 от 24 августа 2020 года «Разработка модели многокритериальной оптимизации конкурирующих параметров тепловой защиты оболочечных элементов в условиях теплового и силового нагружения».

На сегодняшний день развитие турбомашиностроения направлено на повышение производительности работы и снижение расходов на тепловую защиту основных рабочих элементов. Соответственно, актуальным представляется исследование вопросов теплового состояния нагружаемых элементов и их охлаждения с учётом вопросов оценки прочностного ресурса. Стоит отметить, что данное исследование в большей степени направлено на оптимизацию охлаждения турбинных

лопаток, испытывающих силовое и тепловое воздействие. Методы оптимизации охлаждения турбинных лопаток за счёт применения фильтрационного, ячеистого охлаждения, уменьшения расхода хладагента, а также модели газодинамики исследованы в работах [1; 3; 5; 6; 13; 17; 22]. Современные вопросы теплопереноса рассмотрены в работе [12]. Поскольку оптимизация производства сопровождается использованием в качестве рабочих элементов оболочек и пластин, широкое исследование получили задачи термомеханического анализа, связанные с оценкой напряжённо-деформированного состояния при нагреве и охлаждении, моделировании термонапряжённого состояния в условиях многослойности, что отражено в работах [2; 3; 8; 9; 10].

Поскольку описание тепловой защиты оболочечных элементов затрагивает вопросы теплопереноса, газодинамики, напряжённого состояния, то весьма важным представляется применение методов многокритериальной оптимизации. Современный вопрос численного решения задач многомерной оптимизации является актуальным ввиду громоздкости и нелинейности систем уравнений, описывающих математическую задачу. При описании реальных процессов оптимизация целевой функции должна удовлетворять системе ограничений, в связи с чем достаточно эффективным инструментом при решении является метод множителей Лагранжа, используемый в задачах условной оптимизации с нелинейными ограничениями. Методы вариации множителей Лагранжа, оптимизация нагрузок с помощью данного метода рассмотрены в работах [4; 16; 21]. Алгоритмы учёта нелинейностей систем уравнений рассмотрены в работе [7]. Применение метода множителей Лагранжа также активно используется в расчёте турбин [18].

Проблемы многокритериальной оптимизации нашли рассмотрение при решении обратных задач, задач тепловой изоляции выбора состава материала, что исследовано в работах [11; 15; 20]. Вопросы турбомашиностроения, совершенствования конструкций турбин исследованы в работах [6; 7; 14]. Применение методов многокритериальной оптимизации в расчёте многорежимности работы турбин рассмотрено в исследовании [19].

Цель данного исследования заключалась в проведении численного расчёта оптимальных по Парето значений параметров тепловой защиты оболочечных элементов в условиях теплового и силового нагружения на основании обобщённого критерия оптимизации. Частными критериями оптимизации являются температурное поле оболочки  $T_{s0}$  с ограничениями по длительной прочности, массовый расход хладагента  $G$ , теплоотдача  $\alpha_r$  и скорость  $v$  охладителя, а также толщина теплоизоляционного покрытия  $\delta_c$ . Поскольку математическая постановка задачи исследования описывается нелинейной целевой функцией минимизации с нелинейными ограничениями, численное решение предлагается рассмотреть с помощью метода множителей Лагранжа. Также требуется рассмотреть несколько эффективных решений задачи при различных весовых коэффициентах  $\beta_i, i = \overline{1, 5}$  частных критериев.

В задаче требуется найти точку  $\{T_{s0}^{(k)}, G^{(k)}, \delta_c^{(k)}, v^{(k)}, \alpha_r^{(k)}\}$ , которая доставляет эффективное решение целевой функции  $\Delta$ , где  $k$  – одно из множества эффективных решений, оптимальных по Парето:

$$\begin{aligned} \Delta = & \beta_1 \theta(T_{s0} - T_{s0}^{(0)}) \left( \frac{T_{s0} - T_{s0}^{(0)}}{T_{s0}^{(0)}} \right)^{2[1+p\theta(T_{s0}-T_{s0}^*)]} + \beta_2 \theta(G - G^{(0)}) \left( \frac{G - G^{(0)}}{G^{(0)}} \right)^{2[1+\theta(G-G^*)p]} + \\ & + \beta_3 \theta(\delta_c - \delta_c^{(0)}) \left( \frac{\delta_c - \delta_c^{(0)}}{\delta_c^{(0)}} \right)^{2[1+\theta(\delta_c-\delta_c^*)p]} + \\ & + \beta_4 \theta(v - v^{(0)}) \left( \frac{v - v^{(0)}}{v^{(0)}} \right)^{2[1+\theta(v-v^*)p]} + \beta_5 \left( \frac{\alpha_r^{(0)}}{\alpha_r - \alpha_r^{(0)}} \right)^2 \rightarrow \min, \end{aligned}$$

где  $p$  – штрафной коэффициент;  $\theta$  – функция Хевисайда;  $x^*$  – верхняя граница частного критерия  $x = \{T_{s0}, G, \delta_c, v, \alpha_r\}$ .



Примем в качестве начального приближения некоторое допустимое решение  $\{T_{s0}^{(0)}, G^{(0)}, \delta_c^{(0)}, v^{(0)}, \alpha_r^{(0)}\}$ , подлежащее улучшению многокритериальной задачи. Постановка задачи теплообменного процесса описывается следующей системой:

- дифференциальные уравнения теплопроводности для оболочки и теплозащитного слоя

$$\frac{\partial^2 T_c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_c}{\partial r} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} = 0; \quad (2)$$

- граничные условия на поверхности нагрева и охлаждения:

$$\alpha_h(T_h - T_{c+}) = \lambda_c \left( \frac{\partial T_c}{\partial r} \right)_{r=r_0+\delta_c}, \quad (3)$$

$$\alpha_r(T_{s-} - T_r) = \lambda_s \left( \frac{\partial T_s}{\partial r} \right)_{r=r_0-\delta_s}; \quad (4)$$

- граничные условия на поверхности контакта слоёв:

$$\lambda_c \left( \frac{\partial T_c}{\partial r} \right)_{r_0} = \lambda_s \left( \frac{\partial T_s}{\partial r} \right)_{r_0}, \quad (5)$$

$$T_c|_{r_0} = T_s|_{r_0}; \quad (6)$$

- уравнение теплоотдачи в канале:

$$\frac{\alpha_r \delta_r}{\lambda_r} = k_1 \left( \frac{2v \delta_r \rho}{\mu} \right)^{k_2} \left( \frac{\mu c_p}{\lambda_r} \right)^{k_3} \left( \frac{T_{s-}}{T_r} \right)^{k_4};$$

- уравнение расхода охладителя в канале:

$$G = \rho v S; \quad (7)$$

- уравнение состояния в канале:

$$p = \rho R T_r; \quad (8)$$

- ограничение на тепловое состояние оболочки в условиях силового нагружения:

$$T_s \leq f_{dl}(\sigma_i) = n \sigma_i^{-m},$$

где  $r$  – радиальная координата;  $r_0$  – радиус кривизны оболочки на поверхности контакта;  $T_s$  – температура оболочки;  $T_c$  – температура теплоизоляционного покрытия;  $T_{c+}$  – температура покрытия на поверхности теплоподвода;  $T_{s-}$  – температура оболочки на поверхности охлаждения;  $T_{s0}$  – температура оболочки на поверхности контакта с покрытием;  $\rho$  – плотность охладителя;  $T_h$  – температура нагревателя;  $T_r$  – температура охладителя;  $\delta_r$  – ширина канала охлаждения;  $S$  – площадь сечения канала охладителя;  $R$  – газовая постоянная;  $\mu$  – динамическая вязкость охладителя;  $c_p$  – изобарная теплоёмкость;  $\lambda_r$  – коэффициент теплопроводности охладителя;  $\lambda_s$  – коэффициент теплопроводности оболочки,  $\lambda_c$  – коэффициент теплопроводности покрытия;  $k_1, k_2, k_3, k_4$  – эмпирические коэффициенты уравнения теплообмена;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжённого состояния оболочки;  $n, m$  – константы кривой длительной прочности.

При решении задачи принято допущение, что температурное поле преимущественно меняется в радиальном направлении; при течении охладителя в канале падение давления не рассматривается. Алгебраизацию системы дифференциальных уравнений будем проводить с помощью па-

раболической аппроксимации температуры оболочки и защитного покрытия по толщине в радиальном направлении:

$$T_s(r) = a_s r^2 + b_s r + c_s, \quad (9)$$

$$T_c(r) = a_c r^2 + b_c r + c_c, \quad (10)$$

где  $a_s, b_s, c_s, a_c, b_c, c_c$  – аппроксимирующие коэффициенты.

Границные условия на поверхностях нагрева и охлаждения (3), (4) с учётом (9),(10):

$$\alpha_h [T_h - a_c(r_0 + \delta_c)^2 - b_c(r_0 + \delta_c) - c_c] - \lambda_c [2a_c(r_0 + \delta_c) + b_c] = 0, \quad (11)$$

$$\alpha_r [T_{s-} - T_r] - \lambda_s [2a_s(r_0 - \delta_s) + b_s] = 0. \quad (12)$$

Тепловые условия контакта слоёв (5), (6) с учётом (9), (10):

$$a_c r_0^2 + b_c r_0 + c_c - a_s r_0^2 - b_s r_0 - c_s = 0, \quad (13)$$

$$\lambda_c (2a_c r_0 + b_c) - \lambda_s (2a_s r_0 + b_s) = 0. \quad (14)$$

Температурные поля на граничных поверхностях оболочки:

$$T_{s0} - a_s r_0^2 - b_s r_0 - c_s = 0, \quad (15)$$

$$T_{s-} - a_s(r_0 - \delta_s)^2 - b_s(r_0 - \delta_s) - c_s = 0. \quad (16)$$

Уравнения теплопроводности Фурье (1), (2) для граничных поверхностей с учётом параболической интерполяции (9), (10):

$$4a_c(r_0 + \delta_c) + b_c = 0, \quad (17)$$

$$4a_s(r_0 - \delta_s) + b_s = 0. \quad (18)$$

Уравнения теплоотдачи и массового расхода охладителя в канале (7), (8):

$$\frac{\alpha_r \delta_r}{\lambda_r} - k_1 \left( \frac{2\nu \delta_r \rho}{\mu} \right)^{k_2} \left( \frac{\mu c_p}{\lambda_r} \right)^{k_3} \left( \frac{T_{s-}}{T_r} \right)^{k_4} = 0, \quad (19)$$

$$G - \rho v S = 0. \quad (20)$$

Представленная задача является нелинейной задачей условной оптимизации. Для нахождения оптимальных по Парето значений локальных критериев предлагается использовать метод множителей Лагранжа. С этой целью введём функцию Лагранжа:

$$L(x_i, \lambda_j) = \sum_{i=1}^5 \beta_i \theta(x_i - x_*) \left( \frac{x_i - x_i^{(0)}}{x_i^{(0)}} \right)^{2[1+p\theta(x_i - x^*)]} + \sum_{j=1}^{10} \lambda_j \varphi_j, \quad (21)$$

где  $\varphi_j$  – левые части уравнений (9)-(20);  $\lambda_j$  – множители Лагранжа.

Используя необходимое условие экстремума, найдём частные производные  $\partial L(x_i, \varphi_j)/\partial x_i$  уравнения (21) по параметрам оптимизации и составим уравнения:

$$2\beta_1 [1 + p\theta(T_{s0} - T_{s0}^*)] \cdot \theta(T_{s0} - T_r) \frac{\left( T_{s0} - T_{s0}^{(0)} \right)^{1+2p\theta(T_{s0}-T_{s0}^*)}}{\left( T_{s0}^{(0)} \right)^{2+2p\theta(T_{s0}-T_{s0}^*)}} + \lambda_5 = 0,$$



$$2\beta_2[1+p\theta(G-G^*)]\frac{(G-G^{(0)})^{1+2p\theta(G-G^*)}}{(G^{(0)})^{2+2p\theta(G-G^*)}}+\lambda_{10}=0,$$

$$2\beta_3[1+p\theta(\delta_c-\delta_c^*)]\frac{(\delta_c-\delta_c^{(0)})^{1+2p\theta(\delta_c-\delta_c^*)}}{(\delta_c^{(0)})^{2+2p\theta(\delta_c-\delta_c^*)}}-$$

$$-\lambda_1[2a_c(\alpha_h(r_0+\delta_c)+\lambda_c)+\alpha_h b_c]+4\lambda_7 a_c=0,$$

$$2\beta_4[1+p\theta(v-v^*)]\frac{(v-v^{(0)})^{1+2p\theta(v-v^*)}}{(v^{(0)})^{2+2p\theta(v-v^*)}}+\lambda_{10}\rho S=0,$$

$$2\beta_5\frac{\alpha_r^{(0)}(\alpha_r-2\alpha_r^{(0)})}{(\alpha_r-\alpha_r^{(0)})^3}+\lambda_2(T_{s-}-T_r)-\lambda_{10}\frac{\delta_r}{\lambda_r}=0.$$

Найдём частные производные уравнений (11) – (20) по неизвестным параметрам системы  $T_{s-}, a_s, b_s, c_s, a_c, b_c, c_c$ :

$$\lambda_1(r_0+\delta_c)[2\lambda_c+\alpha_h(r_0+\delta_c)-4\varphi_7]-\lambda_3r_0^2-2\lambda_4\lambda_cr_0=0,$$

$$\lambda_1[\lambda_c+\alpha_h(r_0+\delta_c)]-\lambda_3r_0-2\lambda_4\lambda_cr_0-\lambda_7=0,$$

$$\lambda_1\alpha_h-\lambda_3=0,$$

$$(\lambda_3r_0+2\lambda_4\lambda_s+\lambda_5r_0)r_0+[\lambda_6(r_0-\delta_s)-4\lambda_8](r_0-\delta_s)=0,$$

$$(\lambda_3+\lambda_5)r_0+\lambda_4\lambda_s+\lambda_6(r_0-\delta_s)-\lambda_8=0,$$

$$\lambda_3+\lambda_5+\lambda_6=0,$$

$$\lambda_2\alpha_r-\lambda_6-k_1\left(\frac{2\nu\delta_r\rho}{\mu}\right)^{k_2}\left(\frac{\mu c_p}{\lambda_r}\right)^{k_3}\frac{(T_{s-})^{k_4-1}}{(T_r)^{k_4}}=0.$$

Решение данной системы будем проводить в последовательных приближениях. В качестве исходных данных примем:  $T_h=1300$  К,  $\alpha_h=1700$  Вт/(м<sup>2</sup>К),  $T_r=700$  К,  $\lambda_c=2$  Вт/(мК),  $\lambda_s=6$  Вт/(мК),  $\rho_r=0,3$  кг/м<sup>3</sup>,  $R=8,31$  Дж/(моль·К),  $\mu=4\cdot10^{-5}$  Н·с/м<sup>2</sup>,  $\lambda_r=5\cdot10^{-2}$  Вт/(мК),  $c_r=1180$  Дж/(кг·К),  $\delta_r=10^{-4}$  м,  $S=3\cdot10^{-8}$  м,  $k_1=0,022$ ,  $k_2=0,8$ ,  $k_3=0,43$ ,  $k_4=0,42$ ,  $r=0,2$  м. Положим, что оболочка находится в напряжённом состоянии в результате силового нагружения, что актуально для рабочих турбинных лопаток оболочечного типа под действием газовых и центробежных сил. Ограничение по температуре для 100-часовой прочности для материала ЖС-ВИ  $T_{s0}\leq 1150$  К. В качестве начальных приближений примем следующие значения для локальных критериев:  $T_{s0}^{(0)}=770$  К,  $G^{(0)}=4,6\cdot10^{-7}$  кг/с,  $\delta_c^{(0)}=0,7\cdot10^{-3}$  м,  $v^{(0)}=51$  м/с,  $\alpha_r^{(0)}=380$  Вт/(м<sup>2</sup>К).

В табл. 1 представлены результаты расчёта эффективных значений локальных критериев, доставляющих минимум целевой функции (21). Поскольку данная многокритериальная задача не имеет единственного решения, в зависимости от выбора коэффициентов значимости, определяющих степень предпочтительности каждого из параметров, представлены некоторые из множества неулучшаемых решений, где у одного из критериев, обладающего наибольшей значимостью, коэффициент  $\beta_i=0,5$  принимал наибольшее значение, а для остальных параметров – принимался одинаковым и равным  $\beta_j=0,125$ ,  $j=\overline{1,5}$ ,  $j\neq i$ .

При  $i=1$  параметром с наибольшей значимостью являлась температура на поверхности контакта оболочки и покрытия, соответственно, для представленного множества эффективных решений при  $i=1,\dots,4$  наилучшее решение для локального критерия  $T_{s0}$  получено при первом

варианте решения, поскольку для вариантов  $i = 2, \dots, 4$  главным критерием оптимизации являлся один из конкурирующих параметров  $G, \delta_c, v$ . При варианте  $i = 5$  температура  $T_{s0}$  оказалась ниже, чем в варианте  $i = 1$ , это обусловлено тем, что главным оптимизируемым параметром при варианте  $i = 5$  являлся коэффициент теплоотдачи, максимизация которого не является конкурирующей для минимизации температуры  $T_{s0}$ .

Таблица 1

Результаты расчёта оптимальных по Парето параметров тепловой защиты  
при различных весовых коэффициентах

Локальные критерии оптимизации	Варианты выбора весовых коэффициентов				
	$\beta_i = 0,5, \quad \beta_j = 0,125, \quad j = \overline{1,5}, \quad j \neq i$				
	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
Температура на поверхности оболочки $T_{s0}$ , К	1087	1102	1093	1104	1073
Расход охладителя $G, 10^{-7} \text{ кг/с}$	8,9	7,9	8,9	7,8	11,0
Толщина покрытия $\delta_c, 10^{-3} \text{ м}$	0,77	0,72	0,7	0,72	0,72
Скорость охладителя $v, \text{ м/с}$	99	88	98	85	122
Теплоотдача на поверхности охлаждения $\alpha_r, \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K})$	693	630	689	617	818

Таким образом, построенная численная модель позволяет найти оптимальные по Парето значения параметров тепловой защиты оболочки в зависимости от выбранной значимости каждого критерия. Практическая значимость исследования обусловлена возможностью поиска оптимального сочетания внешней тепловой защиты с помощью покрытия и внутреннего теплоотвода с помощью охлаждающего агента. Представленная модель позволяет ранжировать частные критерии (температуру оболочки, расход охладителя, толщину покрытия, скорость и теплоотдачу охладителя) за счёт введения весовых коэффициентов и найти при заданных ограничениях множество эффективных значений. Применение модели позволит исключить нецелесообразное охлаждение оболочек, учесть в процессе тепловой защиты напряжённое и тепловое состояние.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белова, С. Е. Применение методики оптимизации эффективности охлаждения при 3D-моделировании теплового состояния перфорированной дефлекторной лопатки соплового аппарата турбины / С. Е. Белова, М. Н. Орешкина, А. Н. Поткин // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2007. – № 11. – С. 48-49.
2. Петров, А. С. Термомеханический анализ конструкции при сварке в системе Marc / А. С. Петров, М. С. Нюняйкина, К. С. Бормотин // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. Материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – С. 31-32.
3. Викулин, А. В. Разработка системы охлаждения и верификация результатов моделирования температурного состояния рабочей лопатки газовой турбины / А. В. Викулин, В. А. Земляная, Е. Н. Жильцова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20. – № 6 (86). – С. 114-119.
4. Горелов, С. Н. Алгоритм поиска оптимального варианта конструкции методом локальных вариаций множителей Лагранжа / С. Н. Горелов, М. И. Климов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2013. – № 9 (158). – С. 190-195.



5. Андрианов, И. К. Математическая модель оптимального массового расхода охладителя в каналах теплоотвода оболочковых элементов турбомашин / И. К. Андрианов, М. С. Гринкруг // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 2 (76). – С. 42-46.
6. Гринкруг, М. С. Численный подход к расчёту параметров охлаждающего потока в каналах оболочковых элементов турбомашин для заданных условий на поверхности теплоотвода / М. С. Гринкруг, И. К. Андрианов // Интернет-журнал Науковедение. – 2016. – Т. 8. – № 1 (32). – С. 24.
7. Гудим, А. С. Нечёткие алгоритмы компенсации нелинейностей САУ / А. С. Гудим, И. В. Зайченко, В. А. Соловьев // Информатика и системы управления. – 2005. – № 2 (10). – С. 89-101.
8. Математическое моделирование термонапряжённого состояния многослойных оболочковых форм с фазовым переходом при литье стальных отливок / В. И. Одиноков, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев, А. В. Свиридов, Г. М. Севастьянов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № II-1 (30). – С. 100-104.
9. Евстигнеев, А. И. Расчёт оболочковых форм, полученных электрофорезом / А. И. Евстигнеев, Э. А. Дмитриев // Литейное производство. – 2009. – № 1. – С. 29-33.
10. Евстигнеев, А. И. Напряжённо-деформированное состояние электрофоретических форм при их нагреве и прокаливании / А. И. Евстигнеев, Э. А. Дмитриев, А. В. Свиридов // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве. Материалы I Международной научно-практической конференции. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, 2015. – С. 161-165.
11. Емельянов, Г. М. Обратная оптимизация в многокритериальных задачах / Г. М. Емельянов, С. А. Попов // Математические методы распознавания образов. – 2005. – Т. 12. – № 1. – С. 101-104.
12. Ким, К. К. Алгоритм CFD-моделирования процесса тепломассопереноса в совмещённом электротехническом устройстве / К. К. Ким, А. А. Просолович, С. Н. Иванов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 65-72.
13. Комаров, О. А. Сравнение газодинамических моделей ячеистого охлаждения и прямого моделирования охлаждающих отверстий лопаток турбин / О. А. Комаров, А. А. Бобрик // Наука и инновации в современном мире: сборник научных статей. Ч. 1. – М.: Изд-во «Перо», 2018. – С. 162-163.
14. Совершенствование конструкций газомагнитных опор высокоскоростных роторных машин / С. М. Коштыков, А. В. Космынин, А. В. Ульянов, В. С. Щетинин, А. С. Хвостиков // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10-1. – С. 25-29.
15. Многокритериальная оптимизация состава теплоизоляционного автоклавного газобетона, модифицированного дисперсией углеродных нанотрубок / С. В. Леонтьев, В. А. Шаманов, А. Д. Курзанов, Г. И. Яковлев // Строительные материалы. – 2017. – № 1-2. – С. 31-40.
16. Медведева, Н. В. Оптимизация распределения активной нагрузки энергосистемы методом неопределённых множителей Лагранжа / Н. В. Медведева, Я. Ю. Ялунин // Математические методы и модели в теоретических и прикладных исследованиях: сборник научных трудов / под науч. ред. Г. А. Тимофеевой, О. В. Куликовой. – Екатеринбург: УрГУПС, 2012. – С. 269-279.
17. Папушкин, М. А. Моделирование фильтрационного охлаждения тел на примере лопаток турбины ГТД / М. А. Папушкин, С. П. Серебряков // NovaInfo.Ru. – 2016. – Т. 2. – № 46. – С. 34-36.
18. Пассар, А. В. Проектирование проточной части радиально-осевой турбины с использованием метода множителей Лагранжа / А. В. Пассар, Д. В. Тимошенко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. – 2015. – № 1 (309). – С. 54-61.
19. Попов, Г. М. Многокритериальная оптимизация рабочего процесса осевого компрессора газотурбинного двигателя с учётом многорежимности его работы / Г. М. Попов, Е. С. Горячкин, Ю. Д. Новикова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19. – № 1. – С. 98-106.
20. Романова, И. К. Основные подходы к выбору состава материала путём многокритериальной оптимизации / И. К. Романова // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2017. – № 7. – С. 14-18.
21. Сераяхова, О. Ю. Метод множителей Лагранжа для нахождения точек условного экстремума функций нескольких переменных / О. Ю. Сераяхова // Некоторые вопросы анализа, алгебры, геометрии и математического образования. – 2016. – № 4. – С. 174-175.
22. Ярославцев, Н. Л. Разработка системы охлаждения базового варианта лопатки с компланарными каналами / Н. Л. Ярославцев, С. С. Ремчуков // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2018. – Т. 1. – С. 367-370.

**Боровик К. Г., Леонтьев Д. В., Харитонов Д. И.**

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ЧИСЛЕННОГО АЛГОРИТМА  
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ПОРИСТЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

**Боровик К. Г., Леонтьев Д. В., Харитонов Д. И.**

**K. G. Borovik, D. V. Leontev, D. I. Kharitonov**

## **ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ЧИСЛЕННОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ПОРИСТЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ**

## **ON EFFICIENCY OF NUMERICAL ALGORITHM PARALLELIZATION FOR SIMULATING FILTRATION COMBUSTION OF POROUS AXISYMMETRIC OBJECTS**

**Боровик Ксения Григорьевна** – инженер лаборатории № 53 ИАПУ ДВО РАН, ассистент Отделения машиностроения, морской техники и транспорта Дальневосточного Федерального университета (Россия, Владивосток); тел. 8(984)1430948. E-mail: ksushareno@mail.ru.

**Ksenia G. Borovik** – Engineer of Laboratory No. 53 of the IACP FEB RAS, Assistant, Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport Department, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); tel. 8(984)1430948. E-mail: ksushareno@mail.ru.

**Леонтьев Денис Васильевич** – ведущий инженер-программист, научный сотрудник ИАПУ ДВО РАН (Россия, Владивосток). E-mail: devozh@dvo.ru.

**Denis V. Leontev** – Senior Software Engineer, Researcher of the IACP FEB RAS (Russia, Vladivostok). E-mail: devozh@dvo.ru.

**Харитонов Дмитрий Иванович** – кандидат технических наук, руководитель группы ЦКП «ДВВР», старший научный сотрудник ИАПУ ДВО РАН (Россия, Владивосток). E-mail: demiurg@dvo.ru.

**Dmitry I. Kharitonov** – PhD in Engineering, Head of the Shared Resource Center «Far Eastern Computing Resource», Senior Researcher at IACP FEB RAS (Russia, Vladivostok). E-mail: demiurg@dvo.ru.

**Аннотация.** Для ускорения расчётов процесса фильтрационного горения пористых осесимметричных объектов разработана параллельная реализация вычислительного алгоритма. Проанализирована эффективность распараллеливания численного алгоритма, проведена оценка времени вычислений в зависимости от числа параллельных процессов и шага расчётной сетки. Показано, что параллельная версия алгоритма значительно сокращает время счёта в сравнении с последовательной версией, при этом эффективность распараллеливания увеличивается с уменьшением шага расчётной сетки.

**Summary.** To accelerate calculations of the filtration combustion process in porous axisymmetric objects, a parallel implementation of the numerical algorithm has been developed. The efficiency of parallelization of the numerical algorithm is analyzed. The computing time is estimated depending on the number of parallel processes and mesh size. It is shown that parallel algorithm significantly reduces computing time compared to sequential algorithm, and at the same time the efficiency of parallelization increases with decreasing the mesh size.

**Ключевые слова:** параллельные алгоритмы, численное моделирование, горение в пористых средах.

**Key words:** parallel algorithm, numerical modeling, combustion in porous medium.

УДК 532.546

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 18-29-24029-мк). Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Дальневосточный вычислительный ресурс» ИАПУ ДВО РАН.

В настоящей работе развиваются математическая модель и численный метод для исследования нестационарных осесимметричных течений газа через пористые среды с химическими превращениями. Математическая модель строится в предположении взаимодействующих взаимопроникающих континуумов [4] и включает в себя уравнения притока тепла для твёрдой среды и газа,

уравнение неразрывности, уравнение для массовой концентрации окислителя, уравнение движения и уравнение состояния совершенного газа [1–3]. Для исследования этих процессов предложена параллельная реализация разработанного ранее вычислительного алгоритма, основанного на комбинации явных и неявных конечно-разностных уравнений. Предложенное распараллеливание позволяет ускорить время расчёта при моделировании фильтрационного горения различных пористых сред, в том числе металлоконструций.

Последовательный алгоритм работает следующим образом: сначала определяются начальные значения функций, после этого организуется цикл по времени. На каждом временном слое организуется цикл по горизонтальной координате, внутри которого меняются значения вертикальной координаты и с помощью явной схемы находятся температуры твёрдой среды и газа, скорость газа, массовая концентрация окислителя; затем с помощью метода прогонки решается неявное уравнение, из которого находятся давление и плотность газа из уравнения состояния совершенного газа. После этого вычисляются краевые условия, цикл по времени заканчивается и программа переходит к следующему временному слою, при необходимости выгружая данные в файл.

Распараллеливание алгоритма выполнялось при помощи технологии OpenMP. OpenMP является открытым стандартом для распараллеливания программ на многопроцессорных системах с общей памятью. В результате анализа последовательного алгоритма были выделены участки кода, выполнение которых потенциально может быть ускорено. Распараллеливание алгоритма возможно только по горизонтальной координате. Для этого использовалась директива *parallel for*, предназначенная для распараллеливания циклов. Доступ к данным разграничивается дополнительными операторами директивы: *private* и *shared*; *private* определяет локальные данные каждого потока управления, *shared* – общие данные между всеми потоками.

Тестирование параллельной реализации алгоритма производилось на вычислительном сервере следующей конфигурации: 2 x CPU Intel Xeon E5-2698 v4 (20 ядер, 2,2 ГГц), RAM 256 ГБ. Тесты производительности совершались для размеров сетки: 0.025, 0.01, 0.005. На рис. 1–3 представлены графики времени выполнения (см. рис. 1), ускорения (см. рис. 2) и эффективности (см. рис. 3) одного модельного часа в зависимости от количества потоков для различного шага сетки для случая горения в пористой среде в условиях естественной конвекции.

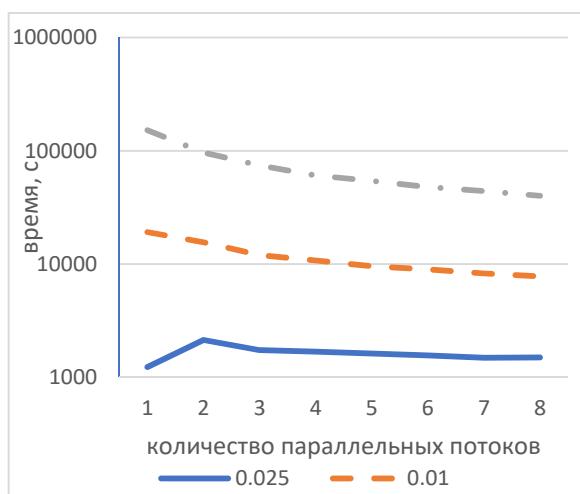


Рис. 1. Время выполнения параллельной реализации

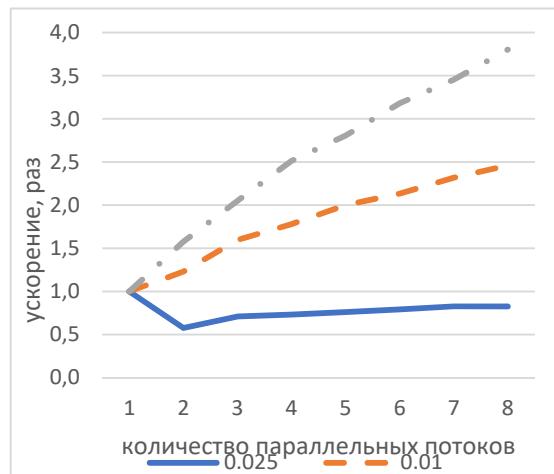


Рис. 2. Ускорение параллельной реализации относительно последовательной

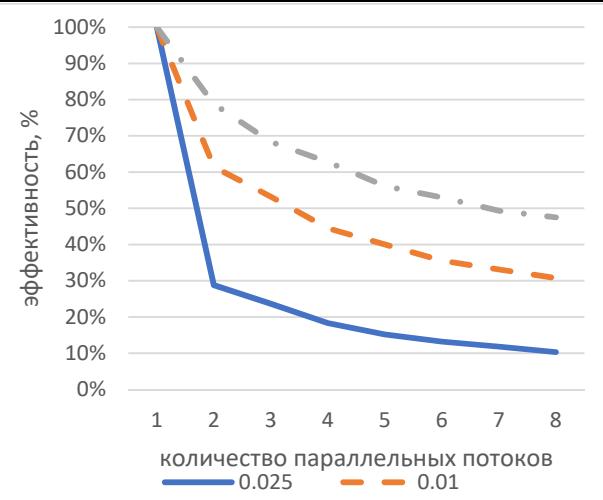


Рис. 3. Эффективность параллельной реализации

Анализ графиков показал, что для сетки 0.025 применение параллельного алгоритма не имеет смысла – это обусловлено большим количеством накладных расходов при создании OpenMP потоков и малым количеством данных. С уменьшением шага сетки до 0.01 ускорение программы составляет 2,5 раза при использовании 8 параллельных потоков. Однако анализ графика эффективности для данной сетки показывает, что использование более 5 потоков является нецелесообразным. При уменьшении шага сетки до 0.005 ускорение составляет 3,8 раза на 8 параллельных потоках. Из графиков видно, что существует тенденция: чем меньше шаг сетки, тем выше и ускорение, и эффективность.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Левин, В. А. Двумерные течения газа при гетерогенном горении твёрдых пористых сред / В. А. Левин, Н. А. Луценко // Доклады академии наук. – 2017. – Т. 476, № 1. – С. 30-34.
2. Lutsenko, N. A. Numerical model of two-dimensional heterogeneous combustion in porous media under natural convection or forced filtration / N. A. Lutsenko // Combustion Theory and Modelling. 2018. V. 22, Issue 2. P. 359-377.
3. Луценко, Н. А. Моделирование процесса извлечения ценных металлов из металлоксодержащих сред методом фильтрационного горения / Н. А. Луценко // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2020. – Т. 491, № 4. – С. 85-89.
4. Нигматулин, Р. И. Основы механики гетерогенных сред / Р. И. Нигматулин. – М.: Наука, 1978. – 336 с.



Вейна В. С., Морковин А. В.  
V. S. Veyna, A. V. Morkovin

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ТИПА МНОГОСЛОЙНЫЙ ПЕРСЕПТРОН ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ФУНКЦИИ ПРОГИБА БАЛКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ НАГРУЗКИ

### APPLICATION OF NEURAL NETWORKS OF MULTI-LAYER PERCEPTRON TYPE FOR SOLVING THE PROBLEM OF FORECASTING THE BEHAVIOR OF THE BEAM BENDING FUNCTION UNDER THE VARIABLE LOAD ACTION

Вейна Виталий Сергеевич – студент отделения машиностроения, морской техники и транспорта инженерного департамента Политехнического института (школы) Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); тел. 8(950)280-72-18. E-mail: [www.work.veyna@mail.ru](mailto:www.work.veyna@mail.ru).

Vitaly S. Veyna – Student, Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport Department, Polytechnic Institute (School), Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); tel. 8(950)280-72-18. E-mail: [www.work.veyna@mail.ru](mailto:www.work.veyna@mail.ru).

Морковин Андрей Витальевич – кандидат технических наук, старший преподаватель отделения машиностроения, морской техники и транспорта инженерного департамента Политехнического института (школы) Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); тел. 8(924)528-42-57. E-mail: [morkovin\\_av@dvgfu.ru](mailto:morkovin_av@dvgfu.ru).

Andrey V. Morkovin – PhD in Engineering, Senior Lecturer, of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport Department, Polytechnic Institute (School), Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); tel. 8(924)528-42-57. E-mail: [morkovin\\_av@dvgfu.ru](mailto:morkovin_av@dvgfu.ru).

**Аннотация.** Разработан метод решения задачи прогнозирования. Рассматривается балка квадратного сечения, закреплённая на двух опорах, под действием изменяющейся нагрузки, а также обучение нейронной сети (многослойный персептрон). Представлены результаты прогнозирования поведения функции прогиба балки под действием изменяющейся нагрузки, полученные нейронной сетью, обученной при помощи встроенного инструмента для работы с нейросетями в пакете прикладных программ MATLAB.

**Summary.** A method for solving the forecasting problem has been developed. We consider a square beam, fixed on two supports, under the influence of a changing load, as well as training a neural network (multilayer perceptron). We present results of predicting the behavior of the deflection function of a beam under the action of a changing load, obtained by a neural network trained using a built-in tool for working with neural networks in the MATLAB software package.

**Ключевые слова:** нейронная сеть, метод решения задачи прогнозирования, многослойный персептрон, обучение нейронной сети.

**Key words:** neural networks, a method for solving the forecasting problem, multilayer perceptron, training a neural network.

УДК 624.047.2

Целью представленной работы является разработка метода решения задачи прогнозирования при помощи нейронных сетей, обученных встроенным инструментом для работы с нейронными сетями в пакете прикладных программ MATLAB. Пример решения задачи прогнозирования приводится в статье [1].

В данной работе рассматривается решение задачи прогнозирования поведения функции прогиба балки квадратного сечения длиной  $l$  под действием изменяющейся нагрузки  $F$ , действующей в точке, расположенной на расстоянии  $h$  от начала балки (схема задачи представлена на рис. 1, б).

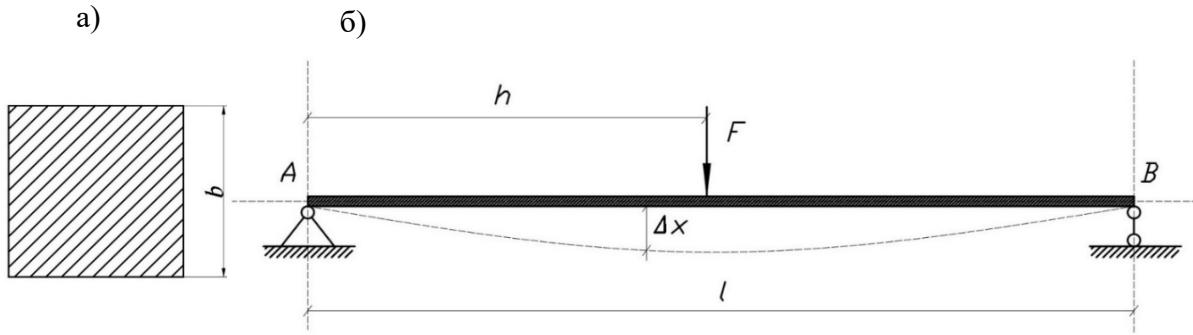


Рис. 1. Постановка задачи:  
а – сечение балки; б – схема задачи

Необходимо спрогнозировать, на какое расстояние  $\Delta x$  и как себя поведёт функция прогиба балки при перемещении силы  $F$ .

Нами была разработана и предложена методика решения данной задачи, представленная в виде блок-схемы (см. рис. 2).



Рис. 2. Блок-схема метода решения задачи прогнозирования

Как видно из схемы, всё решение делится на 5 этапов:

1. В первый этап входят сведения об анализируемом процессе, которые включают в себя: величину силы, длину балки, размеры и форму поперечного сечения балки, момент инерции сечения, модуль упругости в зависимости от материала и саму постановку задачи.

2. На втором этапе мы решаем задачу сопротивления материалов, определяя реакции опор  $A$  и  $B$ , углы поворота сечения на двух участках, а также функции прогиба.

3. Далее осуществляем обработку данных. Выполняем аппроксимацию функции прогиба балки из набора точек, полученных в предыдущем пункте, с помощью полиномов 4-й степени. Производим запись значений коэффициентов полинома для каждой силы и её места приложения в

виде таблицы, т.е. получаем входные и выходные данные для обучения нейросети, так называемая *обучающая выборка*.

4. На четвёртом этапе производим построение модели: выбираем структуру нейронной сети типа *многослойный персептрон*, а также метод обучения нейронной сети, такой как *обучение с учителем*, осуществляющееся в среде MATLAB. Реализация обучения сети происходит на основе входных и выходных данных выборки в пакете прикладных программ MATLAB [2, 6].

5. На пятом этапе мы получаем обученную сеть, готовую к применению для решения задачи прогнозирования.

В итоге решения задачи данной методикой для следующих входных параметров (см. табл. 1) была создана и обучена нейронная сеть, с помощью которой можно определить функцию прогиба, подавая на вход данные о величине силы и точке её приложения в качестве прямой задачи и определяя величину силы, точку приложения силы, зная при этом только функцию прогиба для обратной задачи.

Для прямой задачи были получены данные нейронной сети (см. табл. 2).

Таблица 1  
Основные параметры задачи

Поперечное сечение балки	Размер сечения, м	Длина балки $l$ , м	Момент инерции $I_i = \frac{b^4}{12}$ , м <sup>4</sup>	Модуль упругости (материал) $E$ , кН/м <sup>2</sup>	Сила $F$ , $F_1 \leq F \leq F_2$ , кН
	$b = 0,01$	1	$8,33 * 10^{-10}$	$2 * 10^8$ (сталь)	$F_1 = 0$ $F_2 = 1$

Таблица 2  
Данные, полученные при помощи нейронной сети

№ симуляции	Сила $F$ , кН	Точка приложения силы (от начала балки) $l$ , м	Коэффициент полинома				
			$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
1	0,5	0,25	0,001011	-0,19499	0,184483	0,107072	-0,09813
2	0,5	0,50	-0,00048	-0,1704	-0,13573	0,612241	-0,30611
3	0,5	0,75	-0,00054	-0,10267	-0,08301	0,285349	-0,0981

Графики функций прогиба балки, построенные на основе данных, полученных при помощи нейронных сетей (см. табл. 2), представлены на рис. 3.

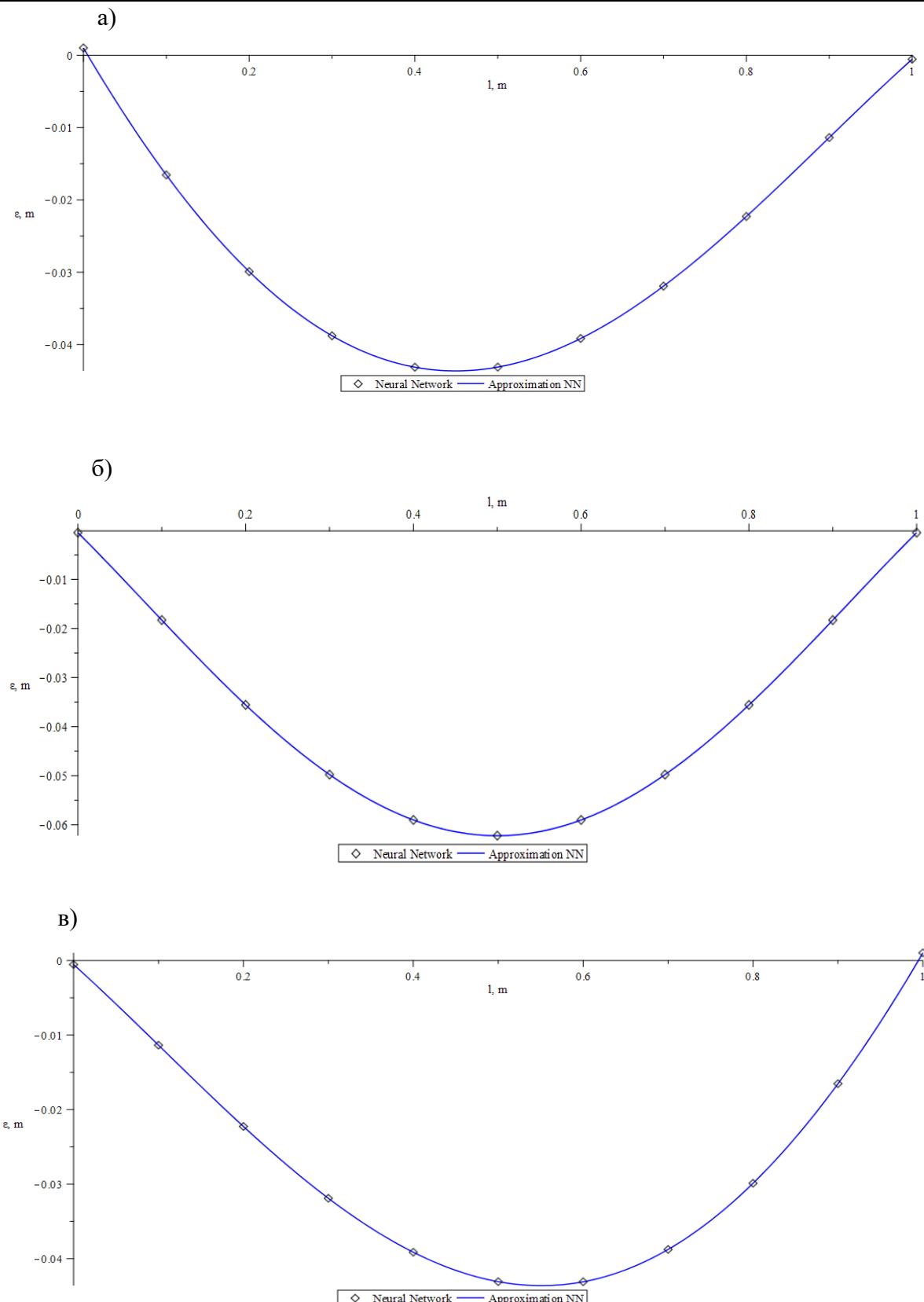


Рис. 3. Графики функций прогиба балки под действием силы  $F = 0,5$  кН в точках:  
а – 0,25 м; б – 0,5 м; в – 0,75 м



Из полученных графиков можно проследить поведение, а также максимальное расстояние ( $\Delta x$ ), на которое изгибаются балка под действием заданной силы в определённой точке её приложения:

- При силе  $F = 0,5$  кН в точке 0,25 м максимальный прогиб балки составил

$$\Delta x = 0,04312 \text{ м.}$$

- При силе  $F = 0,5$  кН в точке 0,5 м максимальный прогиб балки составил

$$\Delta x = 0,0622 \text{ м.}$$

- При силе  $F = 0,5$  кН в точке 0,75 м максимальный прогиб балки составил

$$\Delta x = 0,04309 \text{ м.}$$

#### ЛИТЕРАТУРА

- Любимова, Т. В. Решение задачи прогнозирования с помощью нейронных сетей / Т. В. Любимова, А. В. Горелова // Инновационная наука. – 2015. – № 4. – С. 39-42.
- Федотов, А. В. Моделирование нейронных сетей в MATLAB / А. В. Федотов. – Омск, 2010. – 14 с.

**Иванов С. Н., Ким К. К., Просолович А. А., Хисматулин М. И.**

**S. N. Ivanov, K. K. Kim, A. A. Prosolovitch, M. I. Hismatulin**

## **АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

### **ELECTROMECHANICAL SYSTEM ANALYSIS WITH SIMULATION METHODS**

**Иванов Сергей Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: Ivanov.sn@email.knastu.ru.

**Sergey N. Ivanov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Electrical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: Ivanov.sn@email.knastu.ru.

**Ким Константин Константинович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 9; тел. +7(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Konstantin K. Kim** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Electrical and Heat Engineering St. Petersburg State Transport University Emperor Alexander I (Russia, St. Petersburg); 190031, St. Petersburg, 9 Moskovsky str.; tel. +7(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Просолович Алексей Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: alpr72@mail.ru.

**Aleksey A. Prosolovitch** – Associate Professor, Computer-aided Design System Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: alpr72@mail.ru.

**Хисматулин Марат Ильдусович** – аспирант кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9. E-mail: lokomotivlar@gmail.com.

**Marat I. Khismatulin** – Post Graduate Student, Electrical and Heat Power Engineering Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Saint Petersburg); 190031, Saint Petersburg, 9 Moscovsky pr. E-mail: lokomotivlar@gmail.com.

**Аннотация.** В статье определены основные этапы исследования, включающие построение геометрической модели объекта, определение типа решаемой задачи и соответствующих начальных и граничных условий, обоснование определяющих критериев, моделирование электромагнитных, тепловых и гидравлических процессов и их анализ. В основе программных пакетов используются классические уравнения электродинамики, теплопередачи, энергии, движения и сплошности. Создание трёхмерной твёрдотельной параметрической модели реализовано в системе T-FlexCAD. Имитационный эксперимент проведён с использованием системы SolidWorks Flow Simulation, позволяющей обработать начальный массив проектных параметров в условиях мультифизической постановки задачи. Ранжирование переменных выполнено в программе статистической обработки и анализа данных Statistica. Результаты моделирования энергообменных процессов при варьируемой геометрии определяющих проектных параметров позволяют установить зависимость выходных характеристик электромеханической системы от конструктивного исполнения и размерных соотношений параметров элементов и на этой основе проектировать высокоэффективные электромеханические системы.

**Summary.** The article defines the main stages of the research, including the construction of a geometric model of the object, the definition of the type of the problem to be solved and the corresponding initial and boundary conditions, the justification of the defining criteria, the modeling of electromagnetic, thermal and hydraulic processes



and their analysis. The software packages are based on the classical equations of electrodynamics, heat transfer, energy, motion, and continuity. The creation of a three-dimensional solid-state parametric model is implemented in the T-FlexCAD system. The simulation experiment was carried out using the SolidWorks Flow Simulation system, which allows processing the initial array of design parameters in the conditions of a multiphysical problem statement. The ranking of variables is performed in the statistical data processing and analysis program Statistica. The results of the simulation of energy exchange processes with varying geometry of the design parameters allow us to determine the dependence of the output characteristics of the electromechanical system on the design and dimensional ratios of the parameters of the elements and on this basis to design highly efficient electromechanical systems.

**Ключевые слова:** геометрическая модель, трёхмерная параметризация, моделирование, анализ.

**Key words:** geometric model, three-dimensional parametrization, modeling, analysis.

УДК 621.313

**Введение.** Электромеханические системы (ЭМС) находят широкое применение на всех видах транспорта, и степень их интеграции постоянно возрастает. На сегодняшний день наряду с железнодорожным, автомобильным и морским транспортом известны опытные образцы авиационных систем, например, Cessna Grand Caravan использует электромотор magni500 мощностью 560 кВт, Airbus E-Fan – два электрических двигателя мощностью 30 кВт каждый. В этих условиях возрастает актуальность создания новых, более высокоэффективных ЭМС. Применительно к транспорту основным критерием эффективности является снижение весогабаритных характеристик ЭМС. Теоретические основы преобразования энергии изложены в [1], а конструкции некоторых специальных типов ЭМС рассмотрены в [2].

Существующие методики проектирования современных электромеханических преобразователей [3–5] позволяют получить приближённые результаты, что связано с рядом существенных допущений и упрощений физической картины энергетических процессов в расчётных областях преобразователя. При расчётах выделяются области воздушных зазоров и токовая область, вводится векторный магнитный потенциал, записываются уравнения Максвелла для каждой области, уравнения Лапласа для бестоковых областей и уравнение Пуассона для токовой области. Из решения этих уравнений определяется векторный потенциал для каждой области, а затем их поля и плотность тока. Такие вычисления не обеспечивают достаточной точности и дают существенное расхождение теоретических результатов с экспериментальными данными при различных конструктивных особенностях и режимах работы ЭМС.

Более строгая постановка задачи показывает, что электромеханической системе может быть поставлен в соответствие ряд признаков (возможность формального описания качественного представления процессов, наличие уравнений, модельно описывающих работу объекта, при этом параметры, входящие в эти уравнения, не детерминированы), характеризующих её как систему с аналитически немоделируемой динамикой. Это исключает решение задач точной оптимизации применительно к объекту анализа.

Результаты проектных расчётов учитываются при принятии конструкторско-технологических решений, непосредственно определяющих весогабаритные соотношения преобразователя. Накапливающиеся при этом неточности ещё больше увеличивают расхождение с требуемыми техническими характеристиками.

В качестве примера можно рассмотреть методику вентиляционного расчёта при проектировании электродвигателей. В её основу заложены базовые положения теории подобия и моделирования, систематизированные В. А. Вениковым [6]. При расчёте учитываются наружный диаметр вентилятора, скорость вращения, количество лопастей. Исходя из этих параметров определяются производительность (расход) охлаждающего агента и давление (напор).

Количество воздуха, необходимое для охлаждения машины при схеме вентиляции, обеспечивающей режим одинакового превышения температуры воздуха внутри машины:

$$V_B = \frac{\sum P_B}{c_B \Delta u_B},$$

где  $\sum P_B$  – потери, отводимые воздухом, Вт;  $c_B$  – удельная теплоёмкость воздуха;  $\Delta u_B = u_{\text{гор}} - u_{\text{хол}}$  – превышение температуры воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ , здесь  $u_{\text{гор}}$  – температура горячего воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $u_{\text{хол}}$  – температура холодного воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ .

Вентиляционная цепь разбивается на соединённые между собой элементарные квазиоднородные участки.

Гидравлическое сопротивление отдельного  $i$ -го участка:

$$Z_i = \frac{\xi}{2\rho S^2},$$

где  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $\rho$  – плотность охлаждающей среды;  $S$  – сечение канала.

Напор вентилятора  $H_i$

$$H_i = Z_i \cdot V_i,$$

где  $V_i$  – массовый расход охлаждающей среды  $i$ -го участка.

Для расчёта сопротивления  $Z_i$  используют значения коэффициентов  $\xi$ , требующие экспериментального определения на реальной системе. Выбор  $\xi$  на этапе проектирования является неточным, но позволяет выбрать размеры и конфигурацию вентиляционных каналов.

Современные вентиляционные расчёты могут быть выполнены с использованием специализированных пакетов прикладных программ (Ansys, Comsol, Fluent, Solid Works&CosmoFlow, FlowVision). Метод расчёта вентиляционных цепей базируется на решении системы уравнений, составленных для всех узлов и контуров вентиляционной схемы по аналогии с первым и вторым законами Кирхгофа, т.е. во всех узлах алгебраическая сумма расходов и сумма напоров, а также потерь давления всех ветвей для любого замкнутого контура равны нулю. При решении необходима правильная постановка задачи в виде задания граничных условий. Основная проблема – основополагающие уравнения Навье – Стокса в общем виде точного численного решения не имеют.

Определение номинального напора – заключительный этап вентиляционного расчёта. Номинальный напор  $H_{\text{ном}}$  вычисляется через произведение номинального расхода охлаждающей среды (воздуха)  $V_{\text{ном}}$  на расчётное суммарное сопротивление всей схемы охлаждения  $Z_{\Sigma}$ :

$$H_{\text{ном}} = Z_{\Sigma} V_{\text{ном}}^2.$$

Из последней формулы видно, что существующая методика не позволяет определять расходные и напорные характеристики вентилятора с учётом его конструктивного исполнения и особенностей вентиляционной цепи (форма и размеры лопастей вентилятора, угол установки и т.д.).

Аналогичные выводы можно сделать при оценке точности расчёта других конструкционных элементов (корпуса, вала и т.п.). Таким образом, используемые в настоящее время для анализа методики не позволяют учёт влияние большинства конструкционных параметров на эксплуатационные характеристики ЭМС. Поэтому основной задачей, решаемой в данной статье, является постановка задачи анализа ЭМС методами имитационного моделирования.

**Методы исследования.** Методы исследования определяются содержанием задач на последовательно выполняемых этапах.

Основным методом исследования сложных технических систем является параметризация и анализ формализованных математических моделей. Для описания электромагнитных процессов в ЭМС используется известная в электромеханике модель обобщённого электромеханического преобразователя. Исследуемая система замещается неподвижными обмотками на статоре и обмотками на роторе, вращающимися с частотой  $\omega_p$  [2]. Дифференциальные уравнения напряжений учитывают в виде коэффициентов активные сопротивления, полные собственные и взаимные индуктивности, индуктивности рассеяния обмоток.



Выражение для определения активного сопротивления ротора  $r$ , приведённого к обмотке фазы статора, имеет вид

$$r \approx \frac{4m \cdot \rho \cdot w^2 \cdot k_{\text{обм}}^2 k_r}{\pi \cdot D \cdot l},$$

где  $m$  – число фаз обмотки статора;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала обмотки;  $D, l$  – соответственно диаметр и длина активной части статора;  $w, k_{\text{обм}}$  – соответственно число витков и обмоточный коэффициент обмотки статора;  $k_r$  – эмпирический коэффициент, учитывающий распределение тока в роторе.

Также известно выражение для расчёта активного сопротивления короткозамкнутого ротора с «беличьей» клеткой  $r_2$ , использующее формулу для расчёта активного сопротивления обмотки статора, хотя конструктивно они существенно отличаются, что делает выбор числа фаз и проводников ротора неоднозначным:

$$r'_2 = r_2 \frac{4m \cdot w^2 \cdot k_{\text{обм}}^2}{Z_2 \cdot k_{\text{ск}}^2},$$

где  $r_2$  – активное сопротивление короткозамкнутого ротора;  $Z_2$  – количество зубцов (пазов) ротора;  $k_{\text{ск}}$  – коэффициент скоса.

При питании обмотки статора напряжением промышленной частоты индуктивное сопротивление рассеяния ротора с условным числом витков 0,5 принимается равным нулю.

Сопротивление взаимоиндукции статора и ротора рассчитывается по формуле

$$x \approx \frac{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot w^2 \cdot k_{\text{обм}}^2 \cdot D \cdot l \cdot f}{k_{\mu} \cdot k_{\delta} \cdot \delta \cdot p^2},$$

где  $k_{\mu}$  – коэффициент насыщения магнитной цепи;  $k_{\delta}$  – коэффициент воздушного зазора;  $p$  – число пар полюсов;  $f$  – частота;  $\delta$  – воздушный зазор.

Индуктивность как количественная характеристика явления самоиндукции зависит от геометрии контура и магнитной проницаемости среды  $\mu$  (характеристика ферромагнитных материалов), окружающей контур.

Приведённые выражения показывают, что очевидными недостатками существующего подхода являются существенное упрощение и неточность научной задачи анализа.

Постановку задачи и её последующую реализацию поясняет алгоритм, приведённый на рис. 1.

Целью начального этапа является определение номенклатуры проектных параметров. На этом этапе информация формируется исходя из всех имеющихся сведений об ЭМС. Структурные связи не определены, возможность сокращения проектных параметров отсутствует. Форма и расположение отдельных элементов неочевидны, поэтому исходный массив проектных параметров может иметь большую размерность.

Например, исследуется влияние конструкции охлаждающего элемента на температуру теплоаккумулирующих частей с внутренними источниками тепла (обмотка ЭМС). Условиями ограничения являются только пространство проектирования и физические характеристики материала элемента. Размерные и топологические соотношения, определяющие эффективность работы элемента, неизвестны. Для конструкционной увязки всех форм и размеров в условиях инвариантности требуется полное описание и построение трёхмерной геометрической параметризованной 3D-модели.

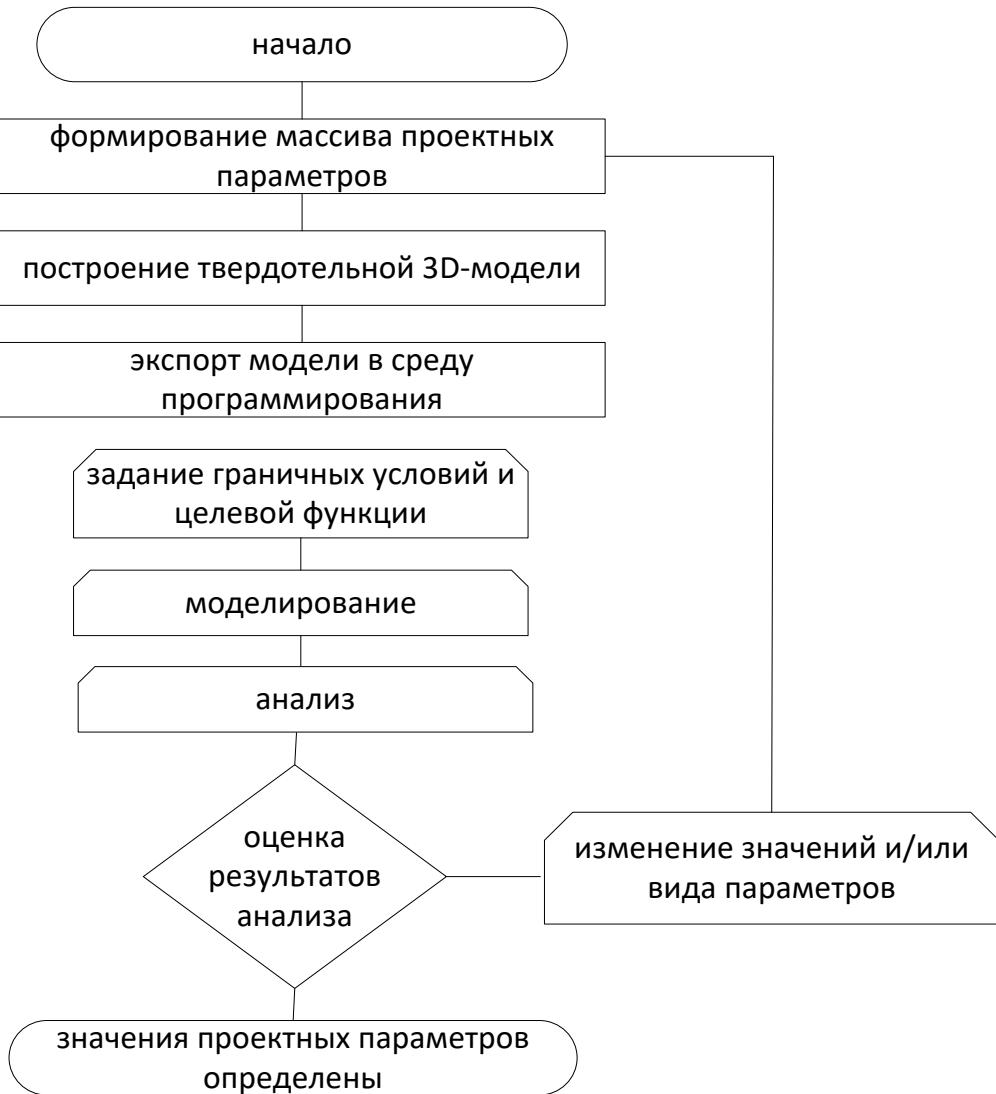


Рис. 1. Алгоритм анализа

Результатом этого этапа являются модель с изменяемыми параметрами и файлы нейтрального стандартного формата для экспорта геометрии на следующие этапы исследования. Методической основой создания трёхмерной твёрдотельной параметрической модели является среда T-FlexCAD. Она обеспечивает возможность послойного создания и последующего исследования виртуальной трёхмерной модели.

Второй этап – проведение вычислительного эксперимента на базе систем инженерного анализа с использованием САЕ/CAM-систем. Имитационный эксперимент при одновременном учёте мультифизических процессов реализуется в системе SolidWorks Flow Simulation, которая сконфигурирована для любого количества проектных параметров ЭМС. Она позволяет определить динамические характеристики и визуализировать результаты, являющиеся основой для анализа поверхностей отклика.

Следующий этап исследования – определение значимых проектных параметров и исключение второстепенных. Для выполнения этого этапа планируется вычислительный эксперимент с использованием программного статистического комплекса Statistica.

Заключительным этапом решения задачи анализа является сравнение значений эксплуатационных характеристик ЭМС. Методологическая основа заключительного этапа – прототипирование модели посредством 3D-печати.

**Результаты.** Для реализации предложенного алгоритма в качестве объекта исследования выбран напорный элемент электромеханической системы, в которой совмещены функции тепло- и массопереноса [2]. В качестве критерия оценки результатов анализа принятые скорости рабочей среды в целевых областях моделирования, определяющие выходные характеристики системы.

*Определение номенклатуры проектных параметров.* Характерные проектные параметры, которые теоретически могут влиять на эффективность устройства: длина  $l$ , толщина  $t$  и наружный диаметр  $d$  напорного элемента; количество  $n_k$  и ширина колец  $w_k$ ; количество  $n_p$  и ширина рёбер  $w_p$ ; количество  $n_l$ , длина  $l_l$ , толщина  $t_l$ , высота  $h_l$  и угол установки лопастей  $\alpha$  (alfa); диаметр  $d_\phi$ , длина  $l_\phi$  и толщина  $t_\phi$  внутреннего ферромагнитопровода (ФМ)  $d_\phi$ ; для напорного элемента: длина лопасти  $l_l$ ; толщина лопасти  $t_l$ ; высота лопасти  $h_l$ ; количество лопастей  $n_l$  (см. рис. 2).

Проведение вычислительного эксперимента предполагает моделирование гидродинамических процессов в ЭМС на базе технологий Computational fluid dynamics. Используемый модуль Flow Simulation системы SolidWorks обеспечивает использование импортированных в формате «igs» параметрических моделей ЭМС, созданной в системе T-FlexCAD.

Результатом гидродинамического расчёта является поле скоростей теплоносителя в рабочем канале ЭМС [7–21]. Визуализация результата расчёта приводится в виде поля скоростей в продольном и поперечном сечениях преобразователя. Для определения момента прекращения расчёта необходим контроль сходимости процесса вычислений. В качестве целей для сходимости выбираются минимальное и максимальное значения осевой составляющей скорости течения рабочей среды.

Контроль сходимости осуществляется в процессе расчёта в соответствии с рис. 3.

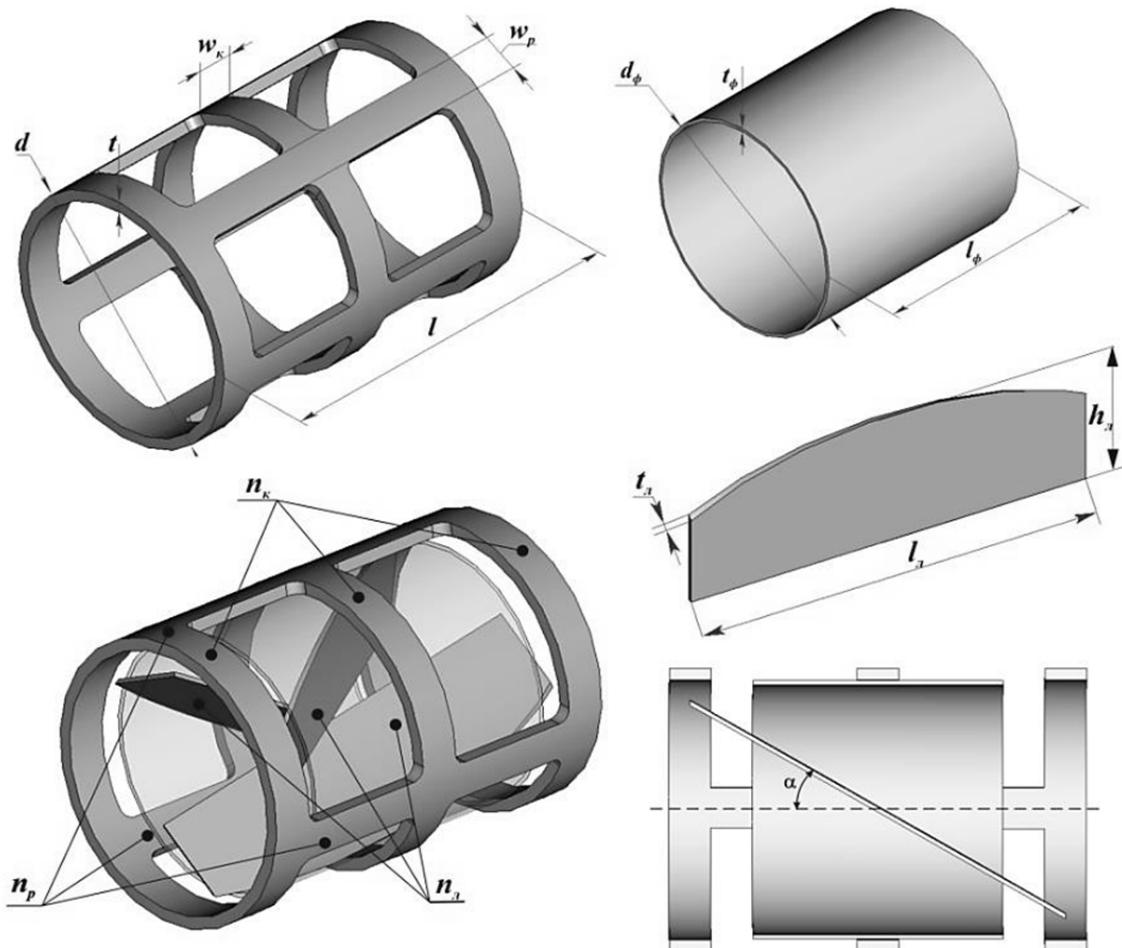


Рис. 2. К выбору проектных параметров

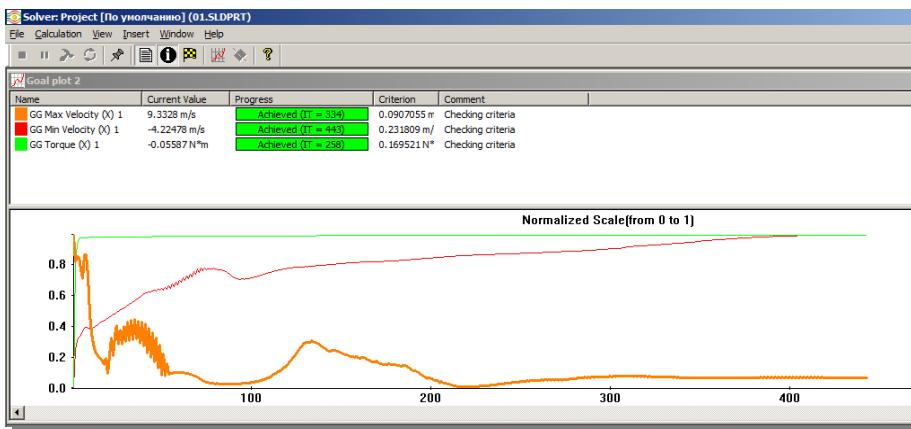


Рис. 3. График сходимости

Для определения значимых проектных параметров (факторов) при исследовании конструкции ЭМС, проводится планирование эксперимента. Для создания плана эксперимента и обработки результатов используется модуль планирования эксперимента Design of Experiments программного статистического комплекса Statistica.

Визуализация результатов в виде диаграмм Парето для разных областей ЭМС показана на рис. 4.

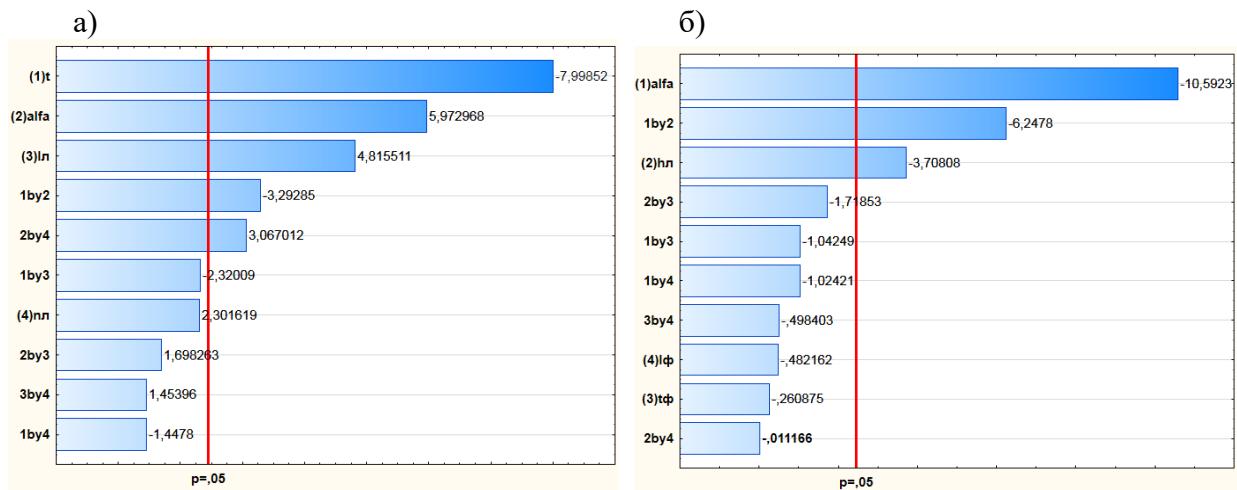


Рис. 4. Определение значимых параметров:  
а – область теплообмена; б – область массопереноса

Результаты в виде поверхностей отклика приведены на рис. 5.

**Анализ.** Определение значимых проектных параметров позволяет перейти к анализу их совместного влияния на осевую и радиальную составляющие скорости массопереноса и температуры в разных областях ЭМС.

Полученные результаты моделирования приведены в [2]. Их анализ показывает, что для исследуемой системы общим значимым параметром для зон тепло- и массопереноса является угол установки лопасти  $\alpha$ , т.е. угол установки лопасти  $\alpha$  влияет на осевую составляющую скорости одновременно в обеих зонах и не может быть управляющим параметром отдельно для каждого из этих процессов.

Для зоны теплообмена следующими значимыми параметрами являются толщина корпуса, длина и число лопастей, коррелированные с осевой составляющей скорости.

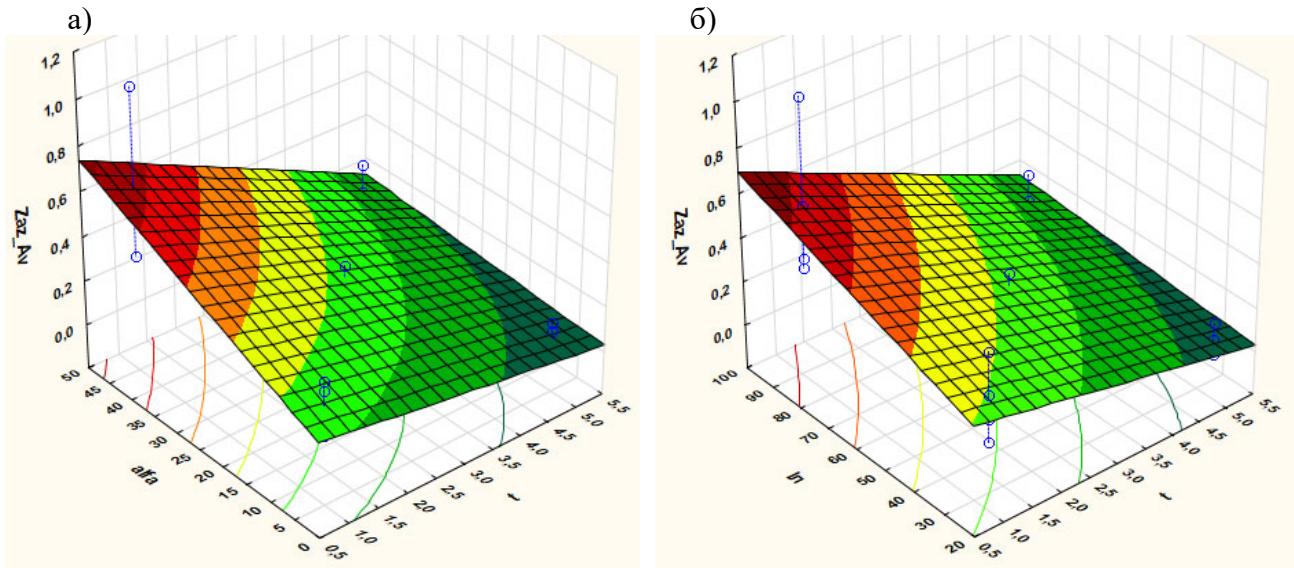


Рис. 5. Поверхности отклика

Толщина корпуса является первым по значимости параметром для зоны теплопереноса. Между толщиной корпуса и осевой составляющей скорости выявлена обратная корреляция.

Длина лопасти влияет на площадь, определяющую передачу энергии вращательного движения рабочей среды. Между длиной лопасти и осевой составляющей скорости в зоне теплообмена существует прямо пропорциональная зависимость.

Количество лопастей при детерминированном значении общего параметра  $\alpha$  оказывается следующим по значимости параметром для зоны теплопереноса. Между количеством лопастей и осевой составляющей скорости наблюдается прямая корреляция.

Совместный эффект количества лопастей и угла установки лопасти по значимости для этой зоны проявляется менее существенно.

Следует отметить, что результаты моделирования показали существенное влияние сочетания проектных параметров на эффективность ЭМС. Например, высота лопасти оказалась последним по значимости параметром для зоны теплопереноса и незначащим параметром для зоны массопереноса. Однако совместный эффект высоты лопасти и угла установки лопасти оказался вторым по значимости для второй зоны, для которой наблюдается сложная связь между высотой лопасти и осевой составляющей скорости (см. рис. 6).

Результаты моделирования могут быть представлены в виде аппроксимации, связывающей осевую составляющую скорости в зонах тепло- и массопереноса ( $v_t, v_m$ ) с основными проектными параметрами:

$$v_t = 0,120636 - 0,020579t + 0,008767l_{\text{л}} + 0,038687n_{\text{л}} - 0,002021t l_{\text{л}},$$

$$v_m = 2,6166 + 0,2012 h_{\text{л}} - 0,0057 (h_{\text{л}})^2.$$

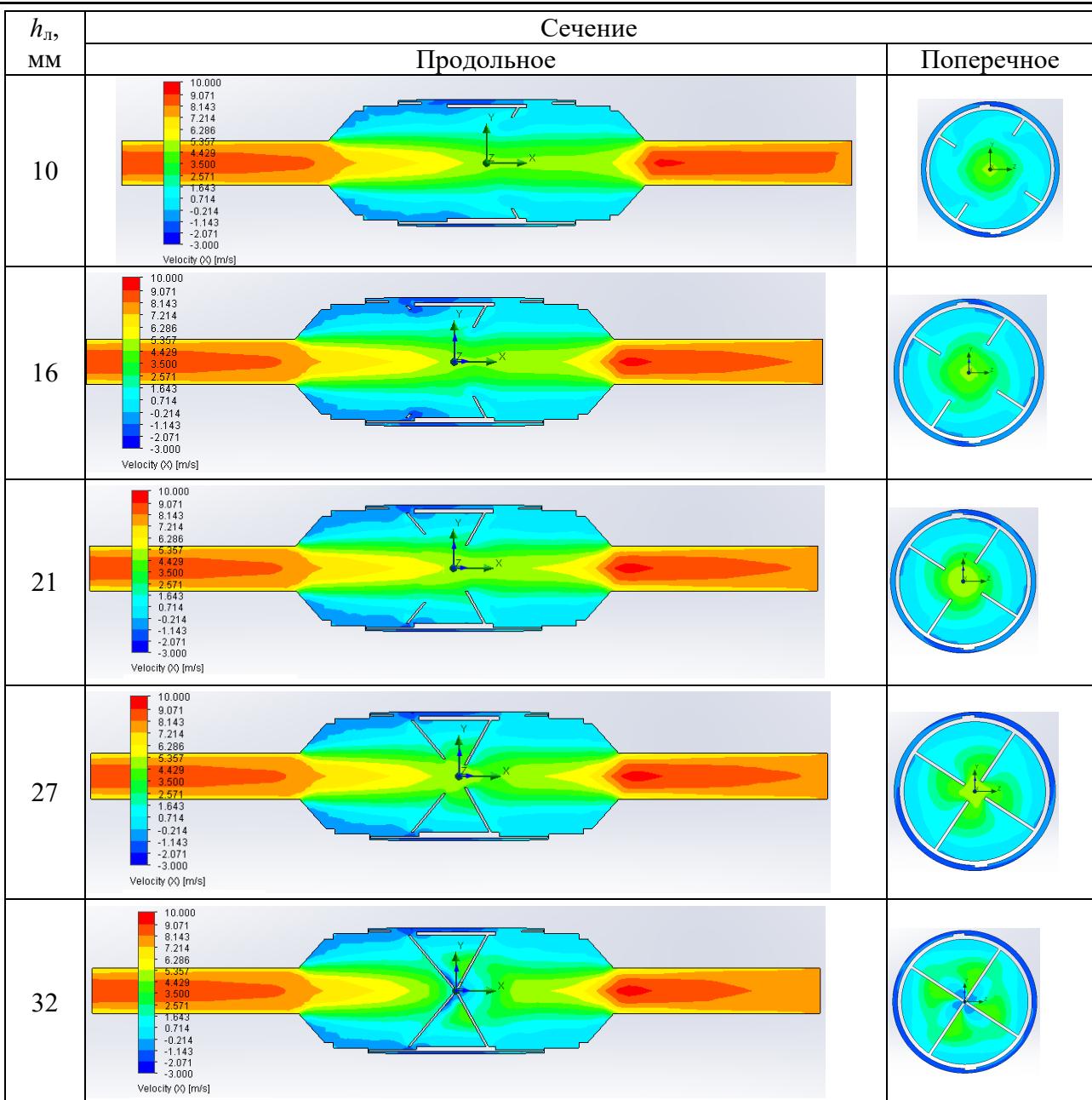


Рис. 6. Влияние высоты лопасти на осевую составляющую скорости в зоне массопереноса

**Заключение.** Использование методов имитационного моделирования позволяет определять основные проектные параметры сложных электромеханических систем, не имеющих однозначного аналитического решения.

Основой такого подхода является создание трёхмерной параметрической модели и её реализация в системах, симулирующих энергетические преобразования, связанные с электромагнитными, тепловыми и гидравлическими процессами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Mazgaonkar N., Chowdhury M., Fernandes L. F. Design of Electric Motor Using Coupled Electromagnetic and Structural Analysis and Optimization (2019) / SAE Technical Paper.
2. Ким, К. К. Электромеханические генераторы тепловой энергии: монография / К. К. Ким, С. Н. Иванов. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 289 с.

3. Gieras J., Saari J., Sundstrand H. Performance Calculation for a High Speed Solid-Rotor Induction Motor (2012) / IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 59. P. 2689-2700.
4. Das J., Ray R. N. 3D modeling of high temperature superconducting hysteresis motor using COMSOL Multiphysics (2017) / 2017 8th Annual Industrial Automation and Electromechanical Engineering Conference (IMECON). IEEE. P. 96-100.
5. Pisarevsky, Yu.V. Mathematical modeling of thermal processes in small-sized DC electric drives (2019) / Yu.V. Pisarevsky [and others] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 643. Issue 1.
6. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования: Применительно к задачам электроэнергетики / В. А. Веников, Г. В. Веников. – 4-е изд. – М.: URSS, 2014. – 440 с.
7. Ким, К. К. Преимущества применения устройств транспортирования и нагрева жидких рабочих сред в различных отраслях промышленности / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. И. Хисматулин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16, вып. 4. – С. 573-583.
8. Ivanov S., Kim K. K. The efficiency of the use of composite materials in electrotechnical equipment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Volume 313 012001. P. 1-7.
9. Ivanov, S., Kim, K. K. Formation and study of coatings from composite material for special electrical devices (2018) / IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 14th International Conference on Films and Coatings. P. 1-4.
10. Kim K. K., Karpova I. M., Anisimov G. N., Burkov A. T., Kiselev I. G., Urushev S. V. Using Inductive Heating in Biogas Production (2020) / Russian Electrical Engineering, 91 (10), p. 609-612.
11. Kim K. K., Ivanov S. N., Gorbunov A. V. Synthesis of the control device of the electromechanical drive of the main valve (2020) / Proceedings 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, № 9112086.
12. Kim K. K., Panychev A. Y., Blazhko L. S. Magnetic Sweep of a Relativistic Electron Beam into a Rectangular Raster (2018) / Russian Electrical Engineering, 89 (10). P. 559-565.
13. Kim K. I., Kim K. K. A Study of the Operation Mode of a Synchronous Compensator with Two Excitation Windings (2018) / Russian Electrical Engineering, 89 (10). P. 598-606.
14. Kim K. K., Ivanov S. N. Raising of Reliability of Heat-Generating Electromechanical Devices (2019) / International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019, № 8934080.
15. D'Alessio S. D., Ogden K. A., Pascal J. P., Jasmine H. A. Film flow over heated wavy inclined surfaces (2010) / J. Fluid Mech. Vol. 665. P. 418-456.
16. Takagi D., Huppert H. E. Flow and instability of thin films on a cylinder and sphere (2010) / J. Fluid Mech. Vol. 647. P. 221-238.
17. Langer U., Steinbach O. Coupled finite and boundary element domain decomposition methods (2007) / Boundary element analysis. Springer, 2007. P. 61-95.
18. D. Bertolotto, R. Chawla (Dir.). Coupling a System Code with Computational Fluid Dynamics for the Simulation of Complex Coolant Reactivity Effects (2011). Vol. 5227. EPFL, 278 p.
19. N. Malleron, F. Zaoui, N. Goutal, T. Morel. On the use of a high-performance framework for efficient model coupling in hydroinformatics (2011) / Environmental Modelling & Software. Vol. 26 (12). P. 1747-1758.
20. Wei Zhang, Shujie Lyu, Yuliang Zhu and Xiaowen Chen. A Coupled Model of the 1D River Network and 3D Estuary Based on Hydrodynamics and Suspended Sediment Simulation (2014) / Journal of Applied Mathematics.
21. Akhlaghi H., Rangrazi A., Roohi E. Study of Physical Aspects of Rarefied Gas Flow Through Micro/Nano Scale Channels Using DSMC (2014) / Arab J Sci Eng. Vol. 39. P. 2331-2338.
22. Wang K., Vafai K., Wang D. Analytical characterization of gaseous slip flow and heat transport through a parallel-plate microchannel with a centered porous substrate (2016) / International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow. Vol. 26 (3-4). P. 854-878.
23. Barichello L. B., Kamphorst C. H., Rodrigues P. A closed-form solution of a kinetic integral equation for rarefied gas flow in a cylindrical duct (2014) / Applied Mathematics. Vol. 5. P. 1516-1527.
24. Taheri P., Struchtrup H. Poiseuille flow of moderately rarefied gases in annular channels (2012) / International Journal of Heat and Mass Transfer. V. 55. P. 1291-1303.
25. Yamaguchi, H. Mass flow rate measurement of thermal creep flow from transitional to slip flow regime (2016) / H. Yamaguchi et al. // J. Fluid Mech. Vol. 795. P. 690-707.

**Канашин И. В., Григорьева А. Л., Хромов А. И., Григорьев Я. Ю., Машевский В. А.**  
РАСТЯЖЕНИЕ СЖИМАЕМОЙ ПОЛОСЫ С НЕПРЕРЫВНЫМ ПОЛЕМ СКОРОСТЕЙ  
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

**Канашин И. В., Григорьева А. Л., Хромов А. И., Григорьев Я. Ю., Машевский В. А.**  
**I. V. Kanashin, A. L. Grigorieva, A. I. Khromov, Ya. Yu. Grigoriev, V. A. Mashevsky**

## **РАСТЯЖЕНИЕ СЖИМАЕМОЙ ПОЛОСЫ С НЕПРЕРЫВНЫМ ПОЛЕМ СКОРОСТЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

### **COMPRESSIBLE MATERIAL BAR STRETCHING WITH CONTINUOUS FIELD OF MOTION VELOCITIES UNDER PLANE STRAIN CONDITIONS**

**Канашин Илья Валерьевич** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Щу V. Kanashin** – Post-Graduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Григорьева Анна Леонидовна** – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой «Прикладная математика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Anna L. Grigorieva** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of the Applied Mathematics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Хромов Александр Игоревич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Прикладная математика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Alexander I. Khromov** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Applied Mathematics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Григорьев Ян Юрьевич** – кандидат физико-математических наук, доцент, декан факультета компьютерных технологий Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Yan Yu. Grigoriev** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Dean of the Faculty of Computer Technologies, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Машевский Владимир Антонович** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Vladimir A. Mashevsky** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** Данная работа посвящена исследованию процесса растяжения полосы из сжимаемого материала с непрерывным полем скоростей перемещений в условиях плоской деформации. Была получена система уравнений для определения поля скоростей. В полученной системе учитывается изменение плотности материала в процессе деформирования.

**Summary.** This work is devoted to the investigation of theory of compressible material bar stretching with continuous field of motion velocities under conditions of plane strain. Equations system for velocities field finding was obtained. Material density change is taken into account in this system.

**Ключевые слова:** растяжение, поле скоростей перемещений, плотность, сжимаемое тело, плоская деформация.

**Key words:** stretching, field of motion velocities, density, compressible material, plane strain.

УДК 621.9:519.8

Для задачи о растяжении полосы с непрерывным полем скоростей существует решение, результатом которого являются выражения главных значений тензора Альманси в виде

$$E_1 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2(\bar{\epsilon} + 1)^2}, \quad E_2 = -\frac{1}{2}\bar{\epsilon}^2 - \bar{\epsilon},$$



где  $\bar{\epsilon}$  – относительное удлинение образца.

В соответствии с данным решением, а также определяющим поверхность деформационных состояний для пластически сжимаемых жёсткопластических тел уравнением

$$(1 - 2E_1)(1 - 2E_2)(1 - 2E_3) = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^2,$$

вид которого связан с формулировкой закона сохранения массы в виде уравнения неразрывности

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho V_{k,k} = 0 \text{ или } V_{k,k} = -\frac{d}{dt}[\ln \rho],$$

была поставлена задача о растяжении сжимаемой полосы с непрерывным полем скоростей перемещений.

Как и в задаче о растяжении несжимаемой полосы с непрерывным полем скоростей перемещений, граничные условия для напряжений имеют вид при  $x_2 = 1$   $\sigma_{22} = 2k$ , при  $x_2 = -1$   $\sigma_{22} = 2k$ , на боковой поверхности образца напряжения отсутствуют.

При предположении, что весь образец находится в пластическом состоянии, данные граничные условия приводят к однородному напряжённому состоянию вида

$$\sigma_{22} = 2k, \sigma_{11} = \sigma_{12} = 0$$

и прямолинейному полю линий скольжения, наклонённых к оси  $x_1$  под углом  $\varphi = \pi/4$ .

Определение поля скоростей при плоской деформации сводится к интегрированию уравнений

$$\frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial V_2}{\partial x_2} = -\frac{d}{dt}[\ln \rho], \quad \frac{\partial V_1}{\partial x_2} + \frac{\partial V_2}{\partial x_1} = \left(\frac{\partial V_1}{\partial x_1} - \frac{\partial V_2}{\partial x_2}\right)(-\operatorname{ctg}2\varphi). \quad (1)$$

При  $\varphi = \pi/4$  система уравнений (1) примет вид

$$\begin{aligned} (\text{I}) \quad & \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial V_2}{\partial x_2} = -\frac{d}{dt}[\ln \rho], \\ (\text{II}) \quad & \frac{\partial V_1}{\partial x_2} + \frac{\partial V_2}{\partial x_1} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Преобразование (2) по законам

$$\frac{\partial}{\partial x_1}(\text{I}) - \frac{\partial}{\partial x_2}(\text{II}) \text{ и } \frac{\partial}{\partial x_2}(\text{I}) - \frac{\partial}{\partial x_1}(\text{II})$$

приводит к системе уравнений

$$\begin{aligned} 2 \frac{\partial \rho}{\partial x_1} \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \rho \frac{\partial^2 V_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial \rho}{\partial x_1} \frac{\partial V_2}{\partial x_2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial t \partial x_1} + V_1 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_1^2} + V_2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_2^2} - \frac{\partial \rho}{\partial x_2} \frac{\partial V_1}{\partial x_2} - \rho \frac{\partial^2 V_1}{\partial x_2^2} &= 0, \\ 2 \frac{\partial \rho}{\partial x_2} \frac{\partial V_2}{\partial x_2} + \frac{\partial \rho}{\partial x_2} \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \rho \frac{\partial^2 V_2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial t \partial x_2} + V_1 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_1 \partial x_2} + V_2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_2^2} - \frac{\partial \rho}{\partial x_1} \frac{\partial V_2}{\partial x_1} - \rho \frac{\partial^2 V_2}{\partial x_1^2} &= 0. \end{aligned}$$

Результатом решения полученной системы должны стать функции  $V_1(x_1, x_2)$  и  $V_2(x_1, x_2)$ , позволяющие найти компоненты скоростей деформаций и в дальнейшем главные значения тензора Альманси  $E_1$  и  $E_2$ , выраженные с использованием относительного удлинения образца  $\bar{\epsilon}$ , а также выражения для определения изменения ширины полосы, а с течением времени и необходимого для растяжения полосы усилия  $P$ .

Аналогичные исследования были сделаны по плоскому напряжённому состоянию в работах [1; 2; 3; 6; 9].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьева, А. Л. Одноосное растяжение полосы при плоском напряжённом состоянии / А. Л. Григорьева, И. В. Слабожанина, А. И. Хромов // Актуальные проблемы математики и механики: материалы и доклады Всероссийской научной конференции, посвящённой 75-летию со дня рождения доктора физико-математических наук, профессора Г. И. Быковцева. – Самара: Самарский университет, 2013. – С. 57-58.
2. Григорьева, А. Л. Одноосное растяжение жёсткопластической полосы в условиях плоского напряжённого состояния при однородном поле скоростей деформаций / А. Л. Григорьева, А. И. Хромов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковleva. Серия: Механика предельного состояния. – 2015. – № 4 (26). – С. 198-205.
3. Канашин, И. В. Математическое моделирование процессов деформационного изменения полей тензоров деформаций / И. В. Канашин, А. И. Хромов, А. Л. Григорьева // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019. – С. 300-302.
4. Качанов, Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
5. Lozmanov, A. Yu. Plastic constants of destruction / A. Yu. Lozmanov, A. A. Sirotin, A. I. Khromov // Scientific notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. Sciences of nature. – 2018. – № III-1 (35). – С. 109-113.
6. Deformation of a plane sample under a homogeneous field of strain rates under plane strain conditions / A. I. Khromov, Y. Yu. Grigor'ev, A. L. Grigor'eva, E. P. Zharkova // Modern scientific and technical technologies. – 2019. – № 10. – С. 73-77.
7. Хромов, А. И. Деформация и разрушение жёсткопластических тел / А. И. Хромов. – Владивосток: Дальнаука, 1996. – 183 с.
8. Хромов, А. И. Разрушение жёсткопластических тел. Константы разрушения / А. И. Хромов, О. В. Козлова. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 159 с.
9. Grigorieva A. L., Grigoriev Y. Y., Khromov A. I. The strain of a plane sample at the homogeneous field of the strain rates under the plane strain conditions // Materials Science Forum. 2018. T. 945 MSF. P. 857-865.



Кузьмичев Е. Н., Николенко С. В., Власенко В. Д., Дроздов Е. А.  
E. N. Kuzmichev, S. V. Nikolenko, V. D. Vlasenko, E. A. Drozgov

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПЕРЕПЛАВЕ

### SIMULATION OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES WHEN ELECTRO-SLAG REMETALTING

**Кузьмичев Евгений Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680000, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153. E-mail: e\_kuzmichev@mail.ru.

**Evgenii N. Kuzmichev** – PhD in Engineering, Associate Professor, Institute of Materials Technology, Khabarovsk Centre of FEC the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: e\_kuzmichev@mail.ru.

**Николенко Сергей Викторович** – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680000, Хабаровск, ул. Тихоокеанская 153. E-mail: nikola1963@mail.ru.

**Sergei V. Nikolenko** – Doctor of Technical Sciences, Institute of Materials Technology, Khabarovsk Centre of FEC the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: nikola1960@mail.ru.

**Власенко Виктор Дмитриевич** – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Вычислительного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ХФИЦ ДВО РАН (Россия, Хабаровск); Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65. E-mail: vlasenko@as.khb.ru.

**Viktor D. Vlasenko** – PhD in Physics and Mathematics, Computing Center of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science (Russia, Khabarovsk). E-mail: vlasenko@as.khb.ru.

**Дроздов Евгений Александрович** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680000, Хабаровск, ул. Тихоокеанская 153. E-mail: vag6@festu.khv.ru.

**Evgenii A. Drozgov** – PhD in Engineering, Institute of Materials Technology, Khabarovsk Centre of FEC the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: vag6@festu.khv.ru.

**Аннотация.** Рассмотрены механизмы движения тепломассопереноса при электрошлаковом переплаве: возбуждение объёмной электромагнитной силы в расплаве шлака в результате взаимодействия электрического тока с собственным магнитным полем и возникновение тепловой конвекции в результате выделения джоуля тепла. Показано, что определяющей в подобных процессах является электромагнитная конвекция.

**Summary.** The mechanisms of heat and mass transfer movement during electroslag remelting are considered: the excitation of a volumetric electromagnetic force in the slag melt as a result of the interaction of an electric current with its own magnetic field and the appearance of thermal convection as a result of the release of Joule heat. It is shown that the decisive factor in such processes is electromagnetic convection.

**Ключевые слова:** электрошлаковый переплав, электромагнитная конвекция, тепловая конвекция.

**Key words:** electroslag remelting, electromagnetic convection, thermal convection.

УДК 621.791

**Введение.** Электрошлаковый переплав – один из способов получения качественных рафинированных металлов и сплавов [1–5]. Отличительной особенностью электрошлакового процесса является то, что расходуемый электрод переплавляется в ванне электропроводного синтетического солевого расплава под действием тепла, которое выделяется в жидкой шлаковой ванне при прохождении через неё электрического тока (см. рис. 1).

**Моделирование процесса.** Электрошлаковый переплав отличается от других видов сварки плавлением прежде всего тем, что основная доля теплоты, идущей на плавление электродного металла, выделяется в шлаковой ванне, в которую погружен переплавляемый электрод (вторым электродом служит жидкокометаллическая ванна и частично стенки формирующего слиток кристаллизатора (см. рис. 1). Объясняется это высоким электросопротивлением расплава шлака, которое на 3-4 порядка выше электросопротивления металла, что и определяет значительную концентрацию в расплаве выделяемой при переплаве энергии:

$$Q = 0,24I_c^3(R_{\text{ш}} + R_s),$$

где  $I_c$  – сварочный ток;  $R_{\text{ш}}$  – электросопротивление межэлектродного промежутка шлаковой ванны;  $R_s$  – электросопротивление погруженного электрода, т.е. не погруженной в расплав части электрода.

Наличие жидкой шлаковой ванны определяет существенные отличия электрошлакового переплава от других видов электрической сварки плавлением.

Во-первых, устойчивый электрошлаковый процесс может быть обеспечен при достаточно большой глубине шлаковой ванны (20 мм и более).

Во-вторых, физико-химические свойства шлака определяют ионный, исключающий дуговой разряд характер электрического тока в расплаве.

Наконец, шлаковая ванна, в которой происходит как плавление, так и перенос капель расплавленного металла, характеризуется более равномерным распределением в ней теплоты. Кроме того, высокая устойчивость электрошлакового процесса, в том числе и при использовании переменного тока промышленной частоты, выгодно отличает его от дугового плавления электродов, так как устойчивость горения дуги в ряде случаев ограничена не только родом электрического тока, но и малыми толщинами электролов.

Свойства ионного расплава шлаковой ванны во многом определяют не только режимы, но и её схему, технику поддержания электрошлакового процесса.

Выделяющаяся в результате воздействия электрического тока теплота нагревает шлаковую ванну до температуры 2100...2600 К и более и вызывает оплавление конца электрода в ней. В результате электрошлакового процесса капли расплавленного металла проходят через жидкий шлак, кристаллизуясь под шлаковым слоем в виде металлического слитка.

В процессе электрошлакового переплава в образовавшемся металлическом слитке значительно снижается содержание кислорода, уменьшается содержание неметаллических включений, понижается концентрация серы, фосфора и других вредных для металла примесей. Полученный слиток отличается высокой плотностью и однородностью металла, хорошим качеством поверхности, обладает высокими механическими и эксплуатационными свойствами.

Важнейшим отличительным свойством электрошлакового процесса является электрический ток. Из-за относительно низкой электропроводности шлака ток формирует в нём интенсивное джоулево теплоизделение, которое и обеспечивает плавление расходуемого электрода. Помимо этого, температура в шлаковой ванне неоднородна из-за неравномерного распределения плотности тока, вследствие чего в ней возникает тепловая конвекция. Также необходимо учитывать и тот факт, что электрический ток обладает собственным магнитным полем, что приводит к появлению электромагнитной силы, которая может вызвать конвекцию жидкого шлака. Таким образом, явление тепломассопереноса в шлаковой ванне необходимо рассматривать с помощью магнитной гидродинамики [6; 7].

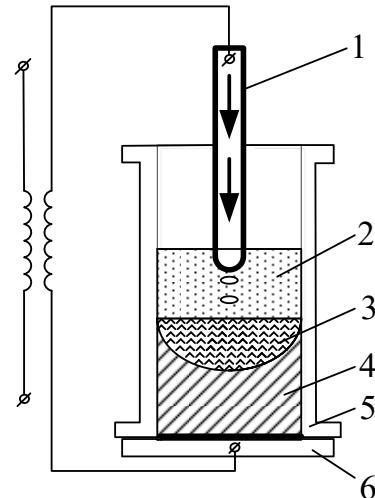


Рис. 1. Схема электрошлакового переплава: 1 – расходуемый электрод; 2 – шлаковая ванна; 3 – металлическая ванна; 4 – слиток; 5 – водоохлаждаемый кристаллизатор, 6 – поддон



Запишем основные уравнения переноса импульса, теплоты и массы. Наличие электрического тока в шлаковой и жидкокометаллической ваннах содержится в уравнениях переноса.

Уравнение Навье-Стокса стационарного движения вязкой жидкости содержит дополнительную силу – электромагнитную  $\vec{f}_e = \vec{J} \times \vec{B}$ :

$$\rho(\vec{v}\nabla)\vec{v} = -\nabla p + \rho v\nabla^2\vec{v} + \rho\vec{g} + \vec{J} \times \vec{B},$$

а уравнение переноса теплоты – плотность джоулева тепловыделения  $|\vec{J}|^2 / \sigma$ :

$$\rho\vec{v}\nabla T = \kappa\nabla^2 T + |\vec{J}|^2 / \sigma.$$

Уравнения переноса концентрации и неразрывности:

$$\vec{v}\nabla C = D\nabla^2 C, \quad \operatorname{div}\vec{v} = 0.$$

К этим уравнениям добавляется уравнение состояния среды:

$$\rho = \rho(T, C).$$

Кроме того, необходимы уравнения Максвелла:

$$\operatorname{div}\vec{B} = 0,$$

$$\vec{J} = \frac{1}{\mu_0\mu} \operatorname{rot}\vec{B},$$

$$\partial\vec{B}/\partial t = -\operatorname{rot}\vec{E},$$

$$\operatorname{div}\vec{E} = \rho_e/\epsilon_0,$$

где  $\vec{v}$  – скорость;  $T$  – температура;  $C$  – концентрация;  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность;  $v$  – кинетическая вязкость;  $\vec{g}$  – ускорение свободного падения;  $\kappa$  – коэффициент теплопроводности;  $D$  – коэффициент диффузии;  $\vec{J}$  – плотность электрического тока;  $B$  – индукция магнитного поля;  $E$  – напряжённость электрического поля;  $\sigma$  – удельная электропроводимость жидкости;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость вещества;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;  $\rho_e$  – плотность электрических зарядов.

**Решение задачи.** Вышеприведённые дифференциальные уравнения переноса и электромагнитного поля должны решаться при определённых граничных условиях.

При электрошлаковом переплаве расплавленный флюс и жидкий металл находятся в замкнутом объёме шлаковой ванны, причём на твёрдых поверхностях, ограничивающих этот объём, выполняется условие прилипания  $\vec{v} = 0$ , а на свободной поверхности  $-\partial\vec{v}_\tau/\partial\vec{n} = 0$  ( $\vec{v}_\tau$  – касательная скорость,  $\vec{n}$  – нормаль к поверхности). То есть на границах жидкого объёма заданы однородные граничные условия, и, значит, на границе объёма не задан внешний источник расплава, связанный с действием поверхностных сил. В таком случае жидкость может прийти в движение лишь за счёт действия внутренних объёмных сил, но при этом сила должна быть вихревой ( $\operatorname{rot}\vec{f} \neq 0$ ).

Так как к расплаву подводится извне только электрический ток, то только он может стать источником движения расплава. Рассмотрим два механизма этого движения: возбуждение объёмной электромагнитной силы в расплаве в результате взаимодействия электрического тока с собственным магнитным полем и возникновение тепловой конвекции из-за джоулева тепловыделения.

Рассмотрим первый механизм. Пусть ванна имеет форму круглого цилиндра, соосно которому погружен в расплав электрод. Вторым электродом является дно цилиндра. В цилиндриче-

ской системе координат ( $z, r, \phi$ ) сварочный ток имеет  $z$ - и  $r$ -составляющие. При условии осевой симметрии  $\partial/\partial\phi = 0$  с учётом выражения ротора в цилиндрических координатах ( $\vec{i}_z, \vec{i}_r, \vec{i}_\phi$  – единичные вектора)

$$\text{rot } \vec{A} = \frac{1}{r} \begin{vmatrix} \vec{i}_z & \vec{i}_r & \vec{i}_\phi \\ \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial r} & 0 \\ A_z & A_r & rA_\phi \end{vmatrix},$$

а также уравнения Максвелла получаем, что такой ток вызывает только азимутальное магнитное поле  $B_\phi$  и следующую связь между  $B_\phi$  и составляющими плотности тока:

$$\vec{J}_z = \frac{1}{\mu_0 r} \frac{1}{r} \frac{\partial r B_\phi}{\partial r}, \quad \vec{J}_r = -\frac{1}{\mu_0 r} \frac{1}{r} \frac{\partial r B_\phi}{\partial z} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial B_\phi}{\partial z}.$$

Тогда электромагнитная сила вычисляется как  $\vec{f}_e = J_r B_\phi \vec{i}_z - J_z B_\phi \vec{i}_r$ , т.е. как и электрический ток, она действует в меридиональных плоскостях  $z-r$ . Вычислим ротор силы  $\vec{f}_e$ , тогда по знаку ротора можно узнать характер движения в ванне и, приравнивая ротор  $\vec{f}_e$  нулю, можно выяснить, при каких условиях электрический ток не вызывает движения расплава.

Найдём

$$\text{rot } \vec{f}_e = -\vec{i}_\phi \frac{1}{\mu_0 r} \frac{\partial B_\phi^2}{\partial z}. \quad (1)$$

Если внутри ванны выделить цилиндрическую поверхность радиуса  $r_1$  (на рис. 2 показана штриховой линией), то видно, что когда площадь погружённого электрода меньше площади попечерного сечения ванны, полный ток внутри выделенного цилиндра будет возрастать по мере приближения к электроду. Следовательно, будет возрастать и  $B_\phi$  на поверхности цилиндра, т.е.

$$\left. \frac{\partial B_\phi}{\partial z} \right|_{r=\text{const}} > 0 \text{ с ростом } z.$$

Таким образом,  $\text{rot } \vec{f} \neq 0$  и электромагнитная сила должна закручивать жидкость в меридиальной плоскости в показанном на рис. 2 направлении. Поэтому общее движение расплава представляет собой вихревой тор с движением по оси симметрии тора вниз от погружённого электрода и вверх вдоль боковых стенок ванны.

Рассмотрим теперь второй механизм. Применим тот же приём, что и при рассмотрении электромагнитной силы, т.е. обратимся не к самой силе, а к её ротору. Применяя в осесимметричном (для простоты) случае операцию  $\text{rot}$  к архимедовой силе  $\rho \vec{g} = -\rho g \vec{i}_z = -\rho_0 g (1-\beta T) \vec{i}_z$ , получаем

$$\text{rot} \rho \vec{g} = g \frac{\partial \rho}{\partial r} \vec{i}_\phi = -g \rho_0 \beta \frac{\partial T}{\partial r} \vec{i}_\phi, \quad (2)$$

т.е. тепловая конвекция возможна только при радиальном градиенте температуры. Другого механизма возникновения тепловой конвекции в слое жидкости, подогреваемой сверху, нет, в отличие от подогрева снизу, когда одной из причин возникновения движения может явиться конвективная неустойчивость.

На основании полученного результата можно предсказать и характер тепловой конвекции. Во-первых, она будет происходить в вертикальных (меридиональных) плоскостях. Во-вторых, направление движения расплава, определяемое знаком  $\text{rot} \rho \vec{g}$ , зависит от характера изменения температуры по радиусу (от знака  $\partial T / \partial r$ ).

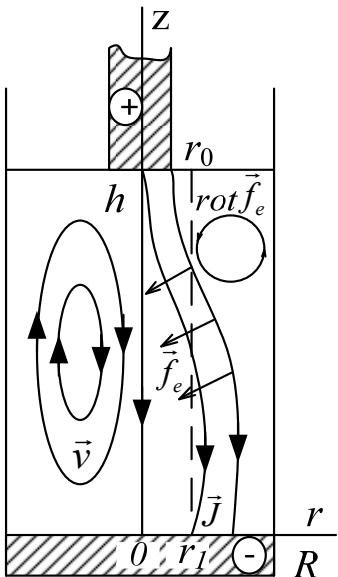


Рис. 2. Возникновение движения в шлаковой ванне:  $\vec{J}$  – линии электрического тока;  $\vec{f}_e$  – распределение магнитной силы;  $\vec{v}$  – движение расплава;  $r_0$  – радиус электрода;  $R$  – радиус ванны;  $h$  – высота шлаковой ванны

$\Delta T_{\max} = T|_{r=0} - T|_{r=R}$ , т.е. во втором выражении (3) и полагая  $\Delta T_{\max} = 10^3 K$ , получаем

$$\left| \text{rot } \vec{f}_e \right|_{\max} \approx 2 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^4, \quad \left| \text{rot } \vec{g} \right|_{\max} \approx 1,2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^4.$$

### Выводы.

1. Решение показывает, что в выбранных условиях электрошлакового процесса определяющей является электромагнитная конвекция. Естественно, при других условиях оценки могут быть иными.

2. Применение управляемых процессов при электрошлаковом переплаве позволит в перспективе получать этой технологией металлические композиционные материалы на основе комплексного использования минеральных концентратов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Компан, Я. Ю. Электрошлаковые сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами / Я. Ю. Компан, Е. В. Щербинин. – М.: Машиностроение, 1989. – 272 с.
2. Kuzmichev, E. Complex alloying of low-carbon steel by mineral concentrates under electroslag remelting / E. Kuzmichev, D. Balakhonov, H. Ri, S. Nikolenko // Procedia Engineering. – 2016. – V. 165. – P. 1496-1502.
3. Бабенко, Э. Г. Разработка и исследование легированных сталей, полученных электрошлаковым переплавом низкоуглеродистой стали с использованием минеральных ассоциаций / Э. Г. Бабенко, А. Д. Верхотуров, Е. Н. Кузьмичев // Перспективные материалы. – 2003. – № 1. – С. 67-72.

Тепловая конвекция прямо противоположна электромагнитной (см. рис. 2). В этой связи возникает проблема оценки относительной роли тепловой конвекции и электромагнитной, так как в зависимости от преобладания того или иного механизма конвекции коренным образом меняются условия тепломассообмена в ванне.

Сравнение роторов сил по (1) и (2) затруднительно тем обстоятельством, что первый из них определяется производной энергии магнитного поля по осевому направлению, а второй – производной температуры по радиальному направлению. Для примера возьмём следующие данные: радиус шлаковой ванны  $R = 2,5 \cdot 10^{-2}$  м, радиус электрода  $r_0 = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м, высота ванны  $h = R$ , сварочный ток  $I_c = 1500$  А. Дифференциалы величин в (1), (2) заменим конечными разностями:  $\partial z \rightarrow h$ ,  $\partial r \rightarrow r_1$  ( $r_1$  – произвольный радиус (см. рис. 2));

$$\partial B_\varphi^2 \rightarrow B_\varphi^2|_{z=0} - B_\varphi^2|_{z=h} = \left( \frac{\mu_0}{2\pi r_1} \right)^2 (I^2 - k^2 I^2),$$

где  $k$  – коэффициент, определяющий долю полного тока, проходящего через круг радиуса  $r_1$  на дне ванны,

$$\partial T \rightarrow \Delta T = T|_{r=0} - T|_{r=r_1}.$$

Тогда

$$\left| \text{rot } \vec{f}_e \right| = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 r_1^3 h} (1 - k^2), \quad \left| \text{rot } \vec{g} \right| = \frac{g\rho_0 \beta \Delta T}{r_1}. \quad (3)$$

Наибольшее значение ротора электромагнитной силы будет иметь место при  $r_1 = r_2$ , наименьшее – при  $r_1 = 0$  и при  $r_1 = R$ . Наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что

4. Verkhoturov, A. D. Development and examination of alloy steels, produced by electroslag remelting of low carbon steel using mineral associations / A. D. Verkhoturov, E. G. Babenko, E. N. Kuzmichev // Journal of Advanced Materials. – 2003. – № 1. – P. 75-78.
5. Verkhoturov, A. D. Reduction of tungsten during the electroslag remelting of flux containing the scheelite concentrate for production of tungsten-containing steels / A. D. Verkhoturov, E. G. Babenko, E. N. Kuzmichev // Theoretical Foundations of Chemical Engineering September. – 2014. – V. 48, Iss. 5. – P. 716-721.
6. Hernandez-Morales B. Review of mathematical models of fluid flow, heat transfer and mass transfer in electroslag remelting process / B. Hernandez-Morales, A. Mitchell // Ironmaking and Steelmaking. – 1999. – V. 26. – P. 423-438.
7. Choudhary M. Modelling of fluid flow and heat transfer in industrial-scale ESR system / M. Choudhary, J. Szekely // Ironmaking and Steelmaking. – 1981. – V. 5. – P. 225-232.



Младова Т. А., Муллер Н. В.  
T. A. Mladova, N. V. Muller

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ СВАИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НАКЛОННОЙ ВЫДЕРГИВАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ

## MATHEMATICAL MODEL OF THE PILE BEHAVIOR UNDER THE INFLUENCE OF AN INCLINED PULL-OUT LOAD

**Младова Татьяна Александровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Кадастры и техносферная безопасность» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: vip.mladova@mail.ru.

**Tatyana A. Mladova** – PhD in Engineering, Associate Professor, Cadastre and Technosphere Security Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: vip.mladova@mail.ru.

**Муллер Нина Васильевна** – кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой «Кадастры и техносферная безопасность» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: only\_nina@mail.ru.

**Nina V. Muller** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Cadastre and Technosphere Security, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: only\_nina@mail.ru.

**Аннотация.** В статье проведено исследование поведения системы анкер-грунт, и это может послужить основанием для успешного проектирования и эксплуатации подводных тросовых систем (ПТС). Проводились исследования оценки прочности и анализ держащей способности анкерных закреплений в грунте. Для решения поставленной задачи рассмотрены методы расчёта грунта, основанные на теории предельного равновесия. В данных методах расчёта идёт разграничение на горизонтальные и вертикальные составляющие и незначительные смещения сваи. Ограничение по перемещениям для свайного анкера ПТС ведёт к неэкономичным решениям, так как при этом допустимая нагрузка оказывается во много раз меньше нагрузки, при которой анкер разрушается или выдергивается из грунта.

**Summary.** The paper presents a solution to a set of problems related to modeling the behavior of the anchor-ground system, which can serve as the basis for the successful design and operation of underwater cable systems (PTS). Studies were conducted to assess the strength and analysis of the holding capacity of anchors in the ground. To solve this problem, we consider methods for calculating the soil based on the theory of limiting equilibrium. In these calculation methods, there is a distinction between horizontal and vertical components and minor displacements of the pile. The restriction on movement for the PTS pile anchor leads to uneconomical solutions, since the permissible load is many times less than the load at which the anchor is destroyed or pulled out of the ground.

**Ключевые слова:** выдергивающая сила, анкер, система анкер-грунт, коэффициент удержания, подводная тросовая система, предельное состояние, пластическая стадия.

**Key words:** pulling force, anchor, anchor-ground system, retention coefficient, underwater cable system, limit state, plastic stage.

УДК 624.154

Усилия от внешних нагрузок на сваю имеют неравномерный, циклический характер и совпадают с периодом волновых воздействий. Основной нагрузкой является выдергивающая нагрузка, приложенная в точке соединения оттяжек и сваи под определённым углом.

Проведённые исследования работ по расчёту свай на выдергивающую горизонтальную нагрузку позволили сделать следующие выводы: существуют данные о сваях с различными характеристиками и с горизонтально приложенной нагрузкой. Эти сваи находятся под воздействием ступенчато-возрастающих, циклических, знакопеременных усилий в сложных грунтовых услови-

ях. Результаты этих исследований показывают, что связь анкер-грунт практически всегда нелинейная.

Приложенная к свае горизонтальная нагрузка в соответствии с существующими расчётами рассматривается как балка на упругом (Винклеровом) основании с различной формой эпюры коэффициентов постели (см. рис. 1). В соответствии с СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» принимаем треугольную форму эпюры для коэффициентов жёсткости всех видов грунтов. Зарубежные страны рекомендуют принимать треугольную форму эпюры для несвязных грунтов и прямоугольную для связных. Существуют методики расчёта свай на горизонтальную нагрузку с постоянным или переменным линейно увеличивающимся по глубине модулем деформации. Анализ существующих методик показал, что в большинстве случаев зависимость параметров при расчётах является линейной, а это не даёт полной картины поведения сваи. Задачей настоящей работы является разработка методики определения выдергивающей нагрузки на сваю с уширением, с жёстким и с гибким стволом.

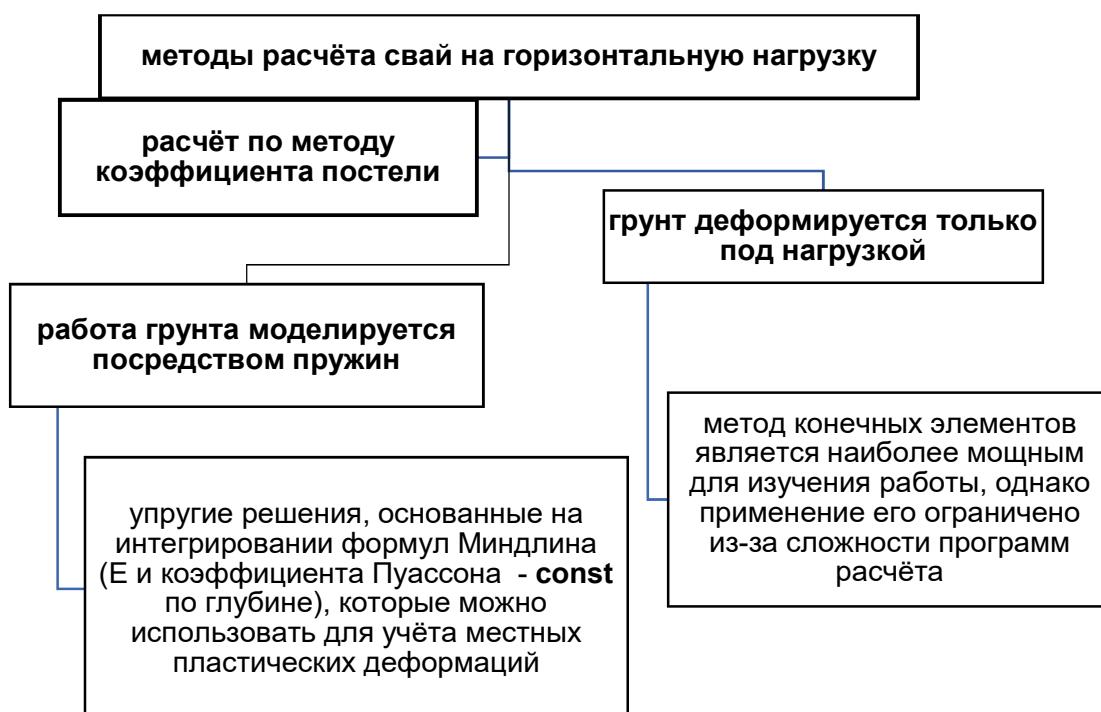


Рис. 1. Методы расчёта

Для решения поставленной задачи рассмотрены методы расчёта грунта, основанные на теории предельного равновесия. В данных методах расчёта идёт разграничение на горизонтальные и вертикальные составляющие и незначительные смещения сваи. Ограничение по перемещениям для свайного анкера ПТС ведёт к неэкономичным решениям, так как при этом допустимая нагрузка оказывается во много раз меньше нагрузки, при которой анкер разрушается или выдергивается из грунта.

Существует формула для расчёта максимальной нагрузки, то есть нагрузки, вырывающей сваю из грунта в зависимости от угла наклона:

$$P = \frac{l' \cdot \operatorname{tg}(\varphi - \beta)}{k \cdot \cos \beta},$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{1 + \alpha^2 \cdot f_{sp}^2} \cdot \left[ \sqrt{1 + \alpha^2 \cdot f_{sp}^2 - \left( \frac{F \cdot k \cdot \cos \beta}{l' \cdot \cos(\varphi - \beta)} \right)^2} - \alpha \cdot f_{sp} \cdot \frac{F \cdot k \cdot \cos \beta}{l' \cdot \cos(\varphi - \beta)} \right].$$

Таким образом, задача сводится к реализации методики вычисления выдергивающей наклонной нагрузки. Сваи принимаются с уширением, жёстким и гибким стволом, при выдергивании таких свай возникает массив вырыва. Необходимо провести модельный эксперимент для подтверждения численных расчётов.

При незначительном увеличении диаметра сваи в месте уширения осевые и поперечные усилия равны нулю.

Определим предельную силу в каждой из этих стадий (см. рис. 2).

## МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЁТА

- 1) Свай бесконечно жёсткая – геометрическое допущение, определяет свойства анкера.
- 2) Силы трения, препятствующие вырыву анкера, подчиняются закону Кулона – это физические допущения, описывающие свойства анкера и грунта.
- 3) Модель линейно-деформированного основания  $\sigma = k \cdot y$  – физическое допущение.
- 4) Пластическое описание среды, уравнение предельного равновесия.

Рис. 2. Модель расчёта сваи на выдергивающую нагрузку

Силу, действующую на сваю (см. рис. 3), можно разложить на продольную и поперечную. Когда система анкер-грунт находится в равновесии, продольная сила уравновешивается силами трения. На сваю оказывает давление грунт; касательные напряжения, возникающие от обжатия грунта, описываем законом Кулона:

$$\tau = P \cdot \operatorname{tg} \varphi_o,$$

где  $P = \sigma \cdot b_x$  – давление грунта на сваю;  $b_x$  – периметр сваи.

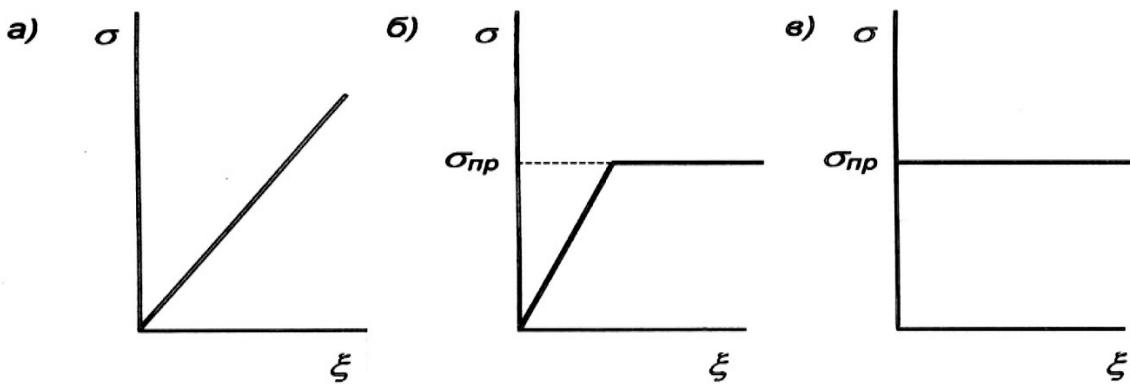


Рис. 3. Расчётные схемы поведения грунта:  
а – линейно-деформированная среда; б – пластическая среда;  
в – упругопластическая среда

Для решения задач по теории предельного равновесия необходимо составить систему уравнений, состоящую из статических уравнений, соотношения деформаций и физических уравнений. Система изменения процесса вырыва сваи из грунта при нагрузке происходит следующим образом: когда наклонная сила достигает определённого значения, грунт течёт, но по мере наклона она

уменьшается и наступает упругая часть работы среды. Свай, следовательно, работает в трёх стадиях, и на каждой из них может наступить вырыв анкера из среды [3].

**Пластическая стадия.** В пластической стадии задача сводится к решению уравнения равновесия, эпюра нормального давления представлена на рис. 4.

При выполнении условий равновесия можно рассчитать изменения координат при воздействии выдергивающей нагрузки.

### 1. Проекция на ось сваи

$$-\sigma_t \cdot x + \sigma_t \cdot (l - x) = N;$$

$$l - 2x = \frac{N}{\sigma_t}.$$

### 2. Момент относительно точки A

$$\sigma_t \cdot x \cdot \frac{x}{2} + \sigma_t \cdot \frac{(l^2 - x^2)}{2} = N \cdot l,$$

$$x = l \pm \sqrt{l^2 - \frac{l^2}{2}} = l - \frac{l}{\sqrt{2}} = l - \frac{l}{\sqrt{2}} \cong 0,29 \cdot l,$$

$$N = \sigma_t (l - 2 \cdot x) \cong 0,42 \cdot \sigma_t \cdot l.$$

Тогда коэффициент удержания равен

$$\alpha = \frac{T_r}{N \cdot f} = \frac{\sigma_t \cdot l}{0,42 \cdot \sigma_t \cdot l} = 2,38.$$

В результате расчёта коэффициент удержания в 2,38 раз больше поперечной силы. Сила, равная  $T = \alpha \cdot N \cdot f$ , не нарушает равновесие.

Следующая модель – это свая с уширением.

Расширение сваи при повороте определяет возникновение момента

$$m = k_t \cdot \theta,$$

где  $m$  – момент, приложенный к концу сваи (в месте крепления уширения);  $k_t$  – коэффициент пропорциональности;  $\theta$  – угол наклона сваи (или уширения).

Уравнение моментов примет вид

$$-\sigma_m \cdot x \cdot \frac{x}{2} + \sigma_m \cdot \frac{l^2 - x^2}{2} = N \cdot l - m,$$

откуда

$$x = l - \sqrt{\frac{l^2}{2} + \frac{m}{\sigma_t}} = l \cdot \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1 + \frac{2 \cdot m}{\sigma_t \cdot l^2}} \right] < 0,29 \cdot l.$$

Коэффициент  $\frac{2 \cdot m}{\sigma_t \cdot l^2}$  безразмерный, где  $\sigma_t$  – напряжение, распределённое на всю ширину сваи.

$$N = \sigma_m \cdot (l - 2 \cdot x) > 0,42 \cdot \sigma_t \cdot l,$$

$$\sigma_t \cdot l \cdot \left( \sqrt{2 \cdot \sqrt{1 + \frac{2 \cdot m}{\sigma_t \cdot l^2}}} - 1 \right).$$

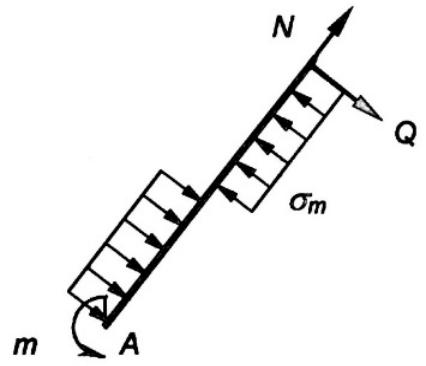


Рис. 4. Расчётная схема анкера в пластической среде

В результате расчётов получаем, что при увеличении критической нагрузки  $N$  уменьшается перемещение  $x$  сваи.

Если  $T_{tp}$  не изменяется  $T_{tp} = \sigma_m \cdot l \cdot f$ , то коэффициент удержания уменьшается (см. рис. 5).

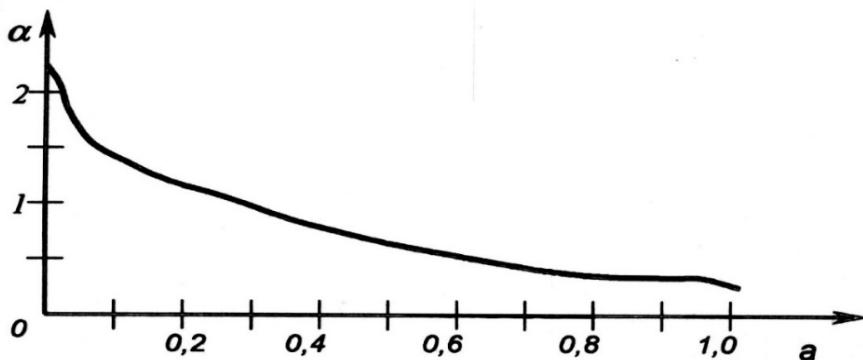


Рис. 5. График зависимости коэффициента удержания

Данный расчёт позволяет определить максимальный угол отклонения сваи от вертикальной оси до момента вырыва при известной нагрузке  $N$ :

$$\alpha = \frac{T_{mp}}{N \cdot f} = \frac{\sigma_t \cdot l}{\sigma_t \cdot l \cdot \left( \sqrt{2 \sqrt{1 + \frac{2 \cdot m}{\sigma_t \cdot l^2}}} - 1 \right)} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \left( 1 + \frac{2 \cdot m}{\sigma_t \cdot l^2} \right)} - 1}.$$

Определение вырывающей силы

$$T = P \cdot \sin \theta.$$

При  $T_{tp} = \sigma_m \cdot l \cdot f = \alpha \cdot N \cdot f > T$  анкер выдергивается из грунта в пластической стадии. В том случае, когда свая удерживается в грунте, она переходит в упругопластическую стадию и в упругую стадию.

Таким образом, уширение сваи повышает удерживающую силу и промежуток до момента потери устойчивости.

**Упругая стадия с малым уширением.** В упругой стадии эпюра давления линейная (см. рис. 6):

$$\sigma = k \cdot y.$$

Найдём значение  $x$  из условий равновесия (без влияния уширения).

Рис. 6. Расчёчная схема  
в упругой среде

Проекция на перпендикуляр к оси сваи

$$\sum M = 0; \quad \int_0^l \sigma \cdot (l - x) dx = 0,$$

$$\int_0^l k \cdot (y_0 - \theta_0 \cdot x) dx \cdot (l - x) dx = 0,$$

$$\int_0^l (k \cdot y_0 \cdot l - k \cdot y_0 \cdot x - k \cdot \theta_0 \cdot x \cdot l + k \cdot \theta_0 \cdot x^2) dx = 0,$$

$$k \cdot y_0 \cdot l^2 - \frac{k \cdot y_0 \cdot l^2}{2} - \frac{k \cdot \theta_0 \cdot l^3}{2} + \frac{k \cdot \theta_0 \cdot l^3}{3} = 0,$$

$$\begin{cases} k \cdot y_0 \cdot \frac{l^2}{2} - k \cdot \theta_0 \cdot \frac{l^3}{6} = 0, \\ k \cdot y_0 \cdot l - \frac{k \cdot \theta_0 \cdot l^2}{2} = \theta. \end{cases}$$

Определим корреляцию коэффициента ( $\alpha$ ) от параметра  $\frac{m}{P \cdot l}$  (см. рис. 7):

$$\alpha = \frac{\sigma \cdot l}{\theta N}.$$

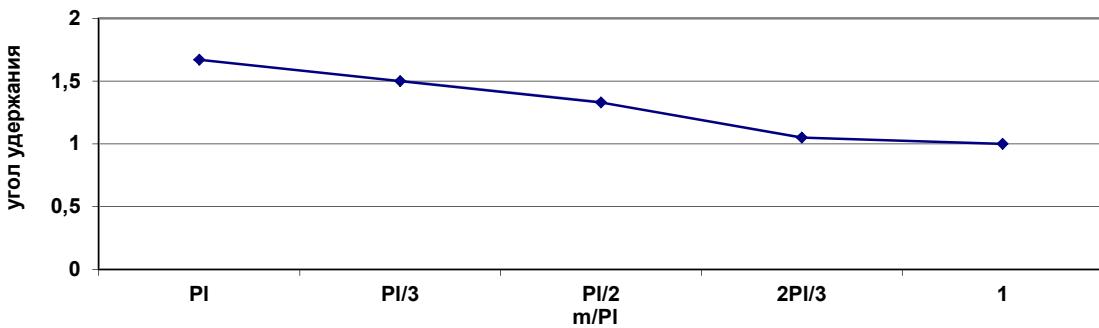


Рис. 7. Показатели при упругой среде

С увеличением момента снижается удерживающая сила.

Коэффициент удержания снижается по мере увеличения момента. В упруго-пластичной среде уровень силы, которая не даёт вырваться свае из грунта, не постоянен.

**Упругопластическая стадия.** Упругопластическая стадия учитывает область линейно-деформированной среды и область предельного равновесия, поэтому система включает следующие уравнения: равновесия; совместности; предельного равновесия (см. рис. 8).

Решим систему уравнений

$$\begin{aligned} \sigma \cdot (l - 2 \cdot x - a) - \sigma \cdot a &= N \\ \sigma \cdot (l - 2 \cdot x - 2 \cdot a) &= Q \\ x_{1,2} &= \frac{3l}{4} \pm \sqrt{\frac{9l^2}{16} - \frac{3l^2}{8}} = 0,32l; \quad \sigma = \frac{N}{l - 2x} = \frac{2,78}{l}, \alpha = 1,88. \end{aligned}$$

Определены результаты системы уравнений работы сваи на наклонную выдергивающую нагрузку в трёх стадиях среды. Уширение сваи увеличивает вероятность продолжительности устойчивости системы при неблагоприятных условиях. Рассчитан показатель, влияющий на удержание сваи в грунте:

- в пластической среде  $\alpha = 2,4;$
- в упруго-пластичной  $\alpha = 1,88;$
- в упругой  $\alpha = 1,67.$

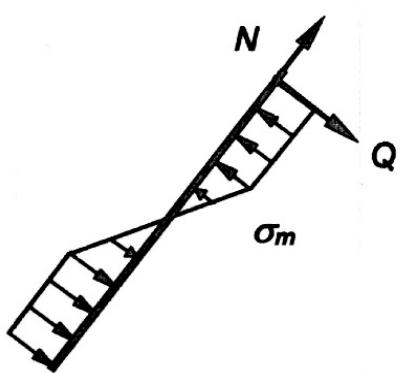


Рис. 8. Эпюра работы сваи в упругопластичной среде

Проведённые исследования поведения свай на наклонную выдергивающую нагрузку позволили сделать вывод, что единой методики решения данной задачи нет. Удерживающая сила рассчитывается индивидуально для каждого случая работы сваи в зависимости от характеристик сваи и грунта. В связи с этим была проведена работа для создания модели поведения анкера в грунте.

Задача решалась методом конечных элементов. Модель осесимметричная, геометрическая форма элемента – тетраэдр (см. рис. 9).

На начальном этапе расчёта сформирован модуль с физико-химическими свойствами песка, в середине, по вертикальной оси, пустота, предусмотренная для сваи. Тело находится под воздействием давления воды и самого грунта [2].

Следующая модель создана таким образом, что в центре тела помещается металлическая свая. На сваю действуют силы притяжения и выдергивающая нагрузка [4]. Момент извлечения сваи из основания будем считать окончанием работы. Понятие устойчивости системы (предельного состояния) принимаем до разрушения грунта.

Для определения взаимосвязи работы системы анкер-грунт важно проанализировать соотношение предельного состояния от напряжения и физических характеристик сваи, вычислить нормальные и касательные напряжения, определить координаты деформаций (см. рис. 10).

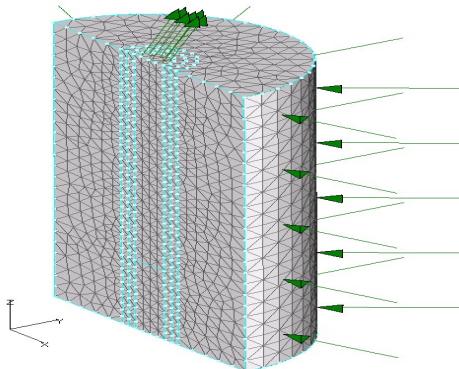


Рис. 9. Конечно-элементная схема сваи в грунте

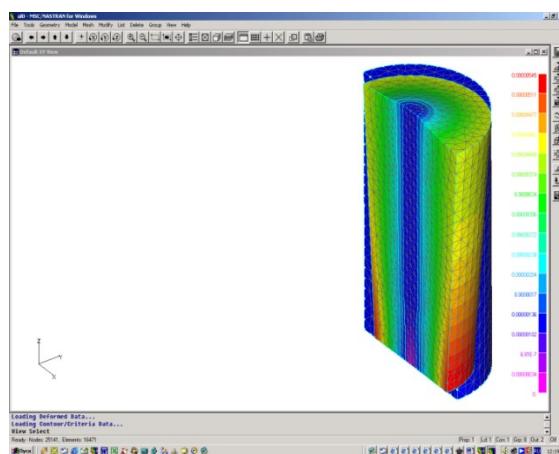


Рис. 10. Деформация основания

Для вычисления выдергивающей нагрузки с углом наклона  $\alpha$  использована расчётная схема, в основу которой положен метод конечных элементов.

Проведены следующие действия:

1. Осуществлён эксперимент с модельными сваями для установления критической выдергивающей нагрузки  $P_{kp}^\alpha$ , приложенной под разными углами  $\alpha$ . Нагрузка, направляющая к горизонту которой равна нулю, является вертикально приложенной нагрузкой. Найденные показатели  $P_{kp}^\alpha$  представлены на рис. 11.

Наклон выдергивающей нагрузки, град	0	15	30	45	60
Выдергивающая нагрузка, $P_{kp}^\alpha$ , Н	8,40	16,70	21,70	22,00	24,30

Рис. 11. Показатели выдергивающей силы

2. В зависимости от приложенной наклонной выдергивающей силы найдены параметры эквивалентных напряжений, возникающих на линии соприкосновения сваи с основанием при

критических нагрузках  $\sigma_{\text{экв}}$ . Величины эквивалентных напряжений, полученные в данном исследовании, показаны на рис. 12-13.

Угол наклона $\alpha$ , град	0	15	30	45	60
Эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ , Н/м <sup>2</sup>	( $P = 8,40$ ) 2535	( $P = 16,7$ ) 5565	( $P = 21,7$ ) 7010	( $P = 22,0$ ) 5540	( $P = 24,3$ ) 4505

Рис. 12. Показатели эквивалентных напряжений

Принимаем, что данные напряжения предельные, то есть происходит нарушение целостности системы, а именно выдергивающая наклонная сила больше силы удерживающей [1].

3. Вычислим безразмерный коэффициент  $\kappa_\sigma$ . Зависимость угла наклона от напряжения приведена на графике (см. рис. 14).

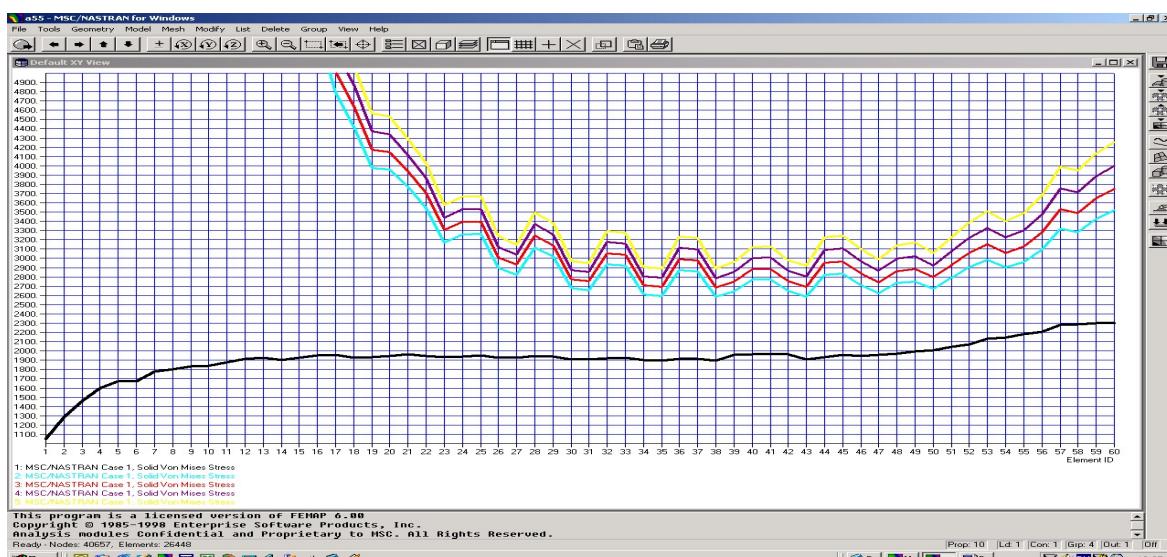


Рис. 13. Эквивалентные напряжения  $\sigma_{\text{экв}}$

4. Находим параметр максимального напряжения  $\sigma_{\text{kp}}^\alpha$  при любом угле  $\alpha$  наклона выдёргивающей силы по формуле  $\sigma_{\text{kp}}^\alpha = \kappa_\sigma \cdot \sigma_{\text{kp}}^0$ .

5. Если отношение выдёргивающей нагрузки  $P_{\text{kp}}^\alpha$  и сил  $\sigma_{\text{kp}}^\alpha$ , удерживающих сваю в грунте, будет иметь линейную зависимость, то допускаем, что коэффициент  $\kappa_\sigma$  увеличения порогового напряжения в то же время выступает в качестве критерия повышения критической (выдёргивающей) силы.

6. При линейной зависимости угла  $\alpha$  приложения выдёргивающей нагрузки и самой этой силы  $P_{\text{kp}}^\alpha$  значение критической нагрузки вычисляем по формуле

$$P_{\text{kp}}^\alpha = \kappa_\sigma \cdot P_{\text{kp}}^0,$$

где  $P_{\text{kp}}^0$  – максимальная характеристика силы для случая, когда она действует вертикально вверх, то есть при  $\alpha = 0$ .

7. Параметр порогового значения  $P_{kp}^0$  для любой фактической сваи с определёнными параметрами можно рассчитать методом конечных элементов, применяя тактику последовательного увеличения нагрузки с фиксацией времени. Были найдены напряжения, возникающие в нижней части сваи в соответствии с увеличением вертикальной выдергивающей нагрузки  $P$ .

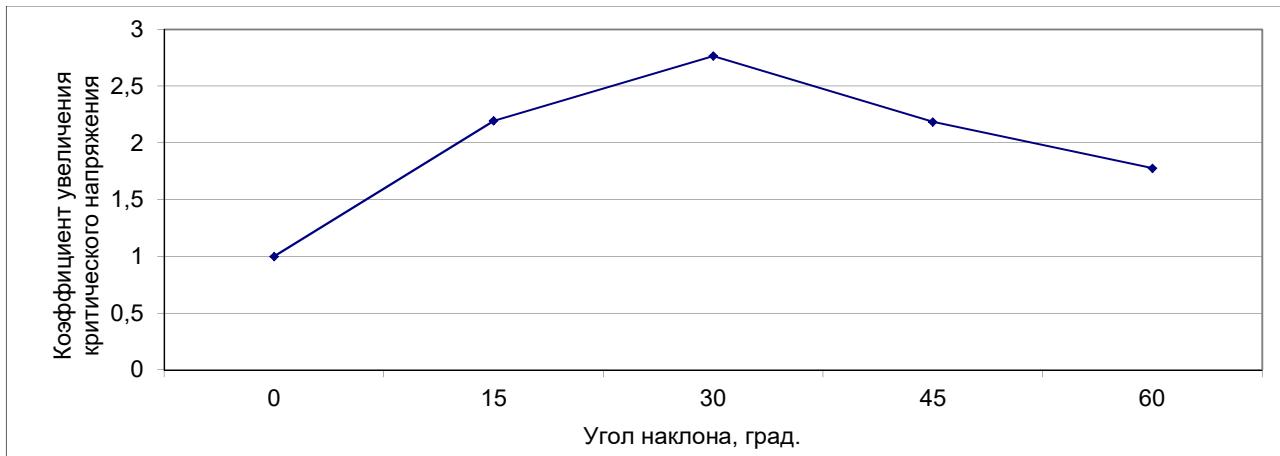


Рис. 14. Критерий повышения

Параметр  $P$  – это усилия, возникающие при потере устойчивости грунта и потере несущей способности сваи.

8. В случае, когда связь нелинейная, определение критической (выдергивающей) наклонной силы  $P_{kp}^\alpha$  производится по формуле

$$P_{kp}^\alpha = \frac{\kappa_\sigma \cdot \kappa_1}{\kappa_0} \cdot P_{kp}^0.$$

9. На основании данных может быть построен график для определения коэффициента нелинейности  $\kappa_1$  при любом  $\alpha$  (см. рис. 15).

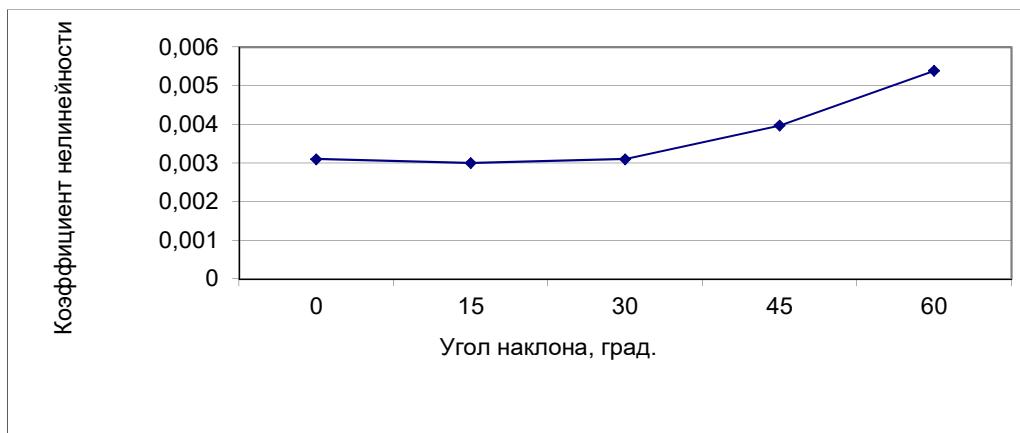


Рис. 15. Взаимосвязь параметра  $\kappa_1$

Исследования были продолжены при испытании модельных экспериментов. Результаты представлены в табл. 1.

Младова Т. А., Муллер Н. В.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ СВАИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ  
НАКЛОННОЙ ВЫДЕРГИВАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ

Таблица 1

Сопоставление расчётных и экспериментальных результатов

Значение нагрузки $P, \text{Н}$	Величина	Метод			
		СНиП	Метод Стоценко-Коровниковой	Эксперимент	МКЭ
Значение нагрузки $P, \text{Н}$	Вертикальное действие силы, $\alpha = 0$	Длина сваи $L = 0,15 \text{ м}$	11,6	-	8,4
		Длина сваи $L = 0,27 \text{ м}$	18,8	-	14,6
	Наклонное действие силы, $\alpha = 45^\circ$	Длина сваи $L = 0,15 \text{ м}$	Не определяется	20,3	23,1
		Длина сваи $L = 0,27 \text{ м}$	Не определяется	82,0	95,6
					98,2

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Петров, М. Р. Определение диаграммы растяжения трубчатого стержня из гиперэластичного материала / М. Р. Петров, А. Н. Петрова, С. Ф. Хакимов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № II-1 (34). – С. 29-34.
2. Тарануха, Н. А. Алгоритмы и модели при численном проектировании композитных сред на заданные характеристики для морских сооружений / Н. А. Тарануха, А. С. Васильев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2015. – № I-1 (21). – С. 81-86.
3. Долговечность конструкционных материалов строительных конструкций при циклическом нагружении / О. Е. Сысоев, С. В. Макаренко, Е. А. Кузнецов, С. В. Серёгин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2015. – № II-1 (22). – С. 90-94.
4. Тарануха, Н. А. Обзор и классификация стационарных морских платформ для работы в ледовых условиях / Н. А. Тарануха, А. С. Миронов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № III-1 (27). – С. 99-105.
5. Иванов, С. Н. Расчёт надёжности привода линейного перемещения машиностроительного оборудования / С. Н. Иванов, К. К. Ким, М. Ю. Сарилов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № III-1(39). – С. 75-80.



Рубан К. Е., Бахматов П. В.  
K. E. Ruban, P. V. Bakhmatov

## РАСЧЁТ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ ЗАВИСИМОСТЬ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНЫХ ШВОВ СПЛАВА АМг5

### CALCULATION OF A MATHEMATICAL MODEL THAT DETERMINES THE DEPENDENCE OF THE INPUT PARAMETERS OF LASER WELDING ON THE FORMATION OF THE WELDED JOINTS ALLOY AMg5

**Рубан Ксения Евгеньевна** – магистрант кафедры технологии сварочного и металлургического производства Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. 8(914)177-73-24. E-mail: krauzer\_sams96@list.ru.

**Ksenia E. Ruban** – Master's Degree Student, Welding and Metallurgical Production Technology Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin str., 27; tel. 8(914)177-73-24. E-mail: krauzer\_sams96@list.ru.

**Бахматов Павел Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии сварочного и металлургического производства Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

**Pavel V. Bakhmatov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Welding and Metallurgical Production Technology, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

**Аннотация.** Рассчитана математическая модель, позволяющая определять зависимость входных параметров лазерной сварки на геометрические характеристики сварного шва сплава АМг5 толщиной 1,5 мм. Полученная математическая модель позволяет прогнозировать геометрические параметры сварного шва при выполнении роботизированной лазерной сварки.

**Summary.** A mathematical model is calculated that allows determining the dependence of the input parameters of laser welding on the geometric characteristics of the AMg5 alloy weld with a thickness of 1.5 mm. The resulting mathematical model makes it possible to predict the geometric parameters of the weld when performing robotic laser welding.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, лазерная сварка, дробно факторный эксперимент, математическая модель.

**Key words:** aluminum alloy, laser welding, fractional factor experiment, mathematical model.

УДК 621.791.725

На сегодняшний день лазерные технологии активно используются в промышленности при поверхностном упрочнении [1], резке и оплавлении. Наиболее перспективной технологией для промышленного использования является лазерная сварка. Целью настоящей работы является определение влияния режимов сварки на геометрические параметры сварного шва при роботизированной лазерной сварке.

На основе работы [2] для определения математической модели, описывающей взаимосвязь мощности ( $x_1$ ), скорости сварки ( $x_2$ ), расстояния до фокальной плоскости ( $x_3$ ), ширины ( $y_1$ ), глубины вогнутости ( $y_2$ ) и превышения проплава ( $y_3$ ), решено провести статическое моделирование

дробно факторного эксперимента. Выбираем уровни варьирования факторов из соображений возможности реализации опытов в пределах технологических ограничений.

Составлена матрица планирования и карта проведения эксперимента (см. табл. 1).

Таблица 1

## Уровни варьирования факторов, карта проведения эксперимента

Параметры	$x_1$	$x_2$	$x_3$	
Размерность	Вт		мм/с	мм
Основной уровень	775		10	245
Верхний уровень	800		12	250
Нижний уровень	650		8	240
Интервал варьирования	$\pm 25$		$\pm 2$	$\pm 5$
Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	
1	2	3	4	5
1	-1	+1	+1	1,68
2	-1	-1	+1	3,43
3	-1	+1	-1	1,46
4	-1	-1	-1	1,32
5	+1	+1	-1	1,52
6	+1	+1	+1	2,75
7	+1	-1	+1	3,39
8	+1	-1	-1	1,3
				$y_1$
				$y_2$
				$y_3$

Выполнены контрольные образцы для проверки адекватности модели (см. табл. 2).

Таблица 2

## Карта проведения дополнительных экспериментов

Номер опыта	Входные параметры			Выходные параметры		
	Мощность, Вт	Скорость сварки, мм/с	Фокусное расстояние, мм	$y_1$	$y_2$	$y_3$
1	780	11	250	3,05	0,44	0,1
2	760	10	250	3,3	0,48	0,4

На основании данных произведён расчёт математической модели по методике [3]. По результатам расчётов определены следующие уравнения регрессии:

$$y_1 = -35,043 + 0,005X_1 + 0,141X_3,$$

$$y_2 = -11,13 + 0,0024X_1 + 0,041X_3,$$

$$y_3 = -5,99 + 0,0017X_1 + 0,0011X_2 + 0,0019X_3.$$

Модель можно считать адекватной, если  $F < F_{\text{табл}}$ . Табличное значение критерия Фишера находят в зависимости от числа степеней свободы  $f_1 = k - 1$  и доверительной вероятности (0,95),  $F_{\text{табл}} = 161$ .

$$F = \frac{0,81}{0,045} = 18, \quad F = \frac{0,08}{0,008} = 10, \quad F' = \frac{0,014}{0,008} = 1,75.$$

Так как  $F < F_{\text{табл}}$ , то с доверительной вероятностью модель можно считать адекватной.

Для построения графиков зависимости входных параметров от геометрических характеристик сварных швов необходимо установить область допустимых значений  $y_1, y_2, y_3$  (см. рис. 1).

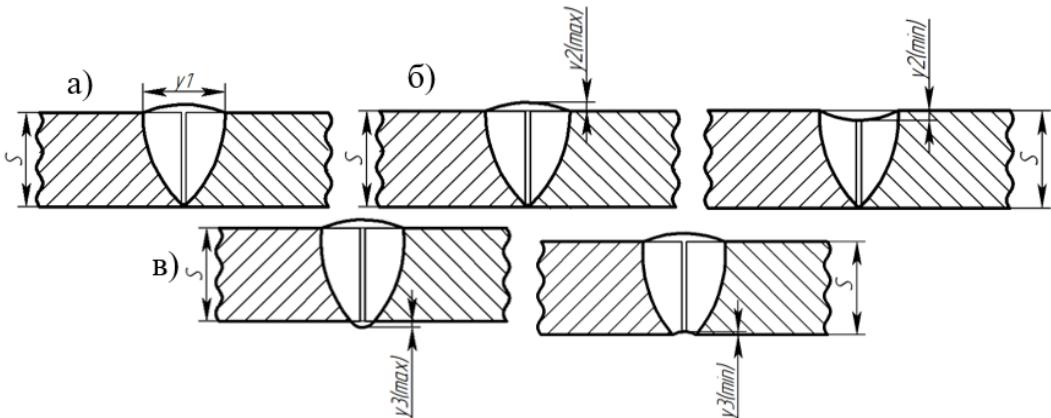


Рис. 1. Контролируемые выходные параметры:  
 а – ширина; б – выпуклость/вогнутость усиления шва; в – выпуклость/вогнутость корня шва

По ГОСТ 13919-2-2017 [4] рассчитаны области допустимых значений выходных параметров для листов сплава АМг5 толщиной 1,5 мм (см. табл. 3). Стандарт не регламентирует ширину сварного соединения.

Таблица 3

Допустимые значения выходных параметров

Категория сварного соединения	$y_1$	$y_2$		$y_3$	
		min	max	min	max
1	-	-0,075	0,43	-0,15	0,43
2	-	-0,15	0,5	-0,3	0,5
3	-	-0,23	0,65	-0,45	0,65

В результате исследования получены графики зависимости (см. рис. 2) параметров  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , обеспечивающих рассчитанные геометрические размеры сварного соединения.

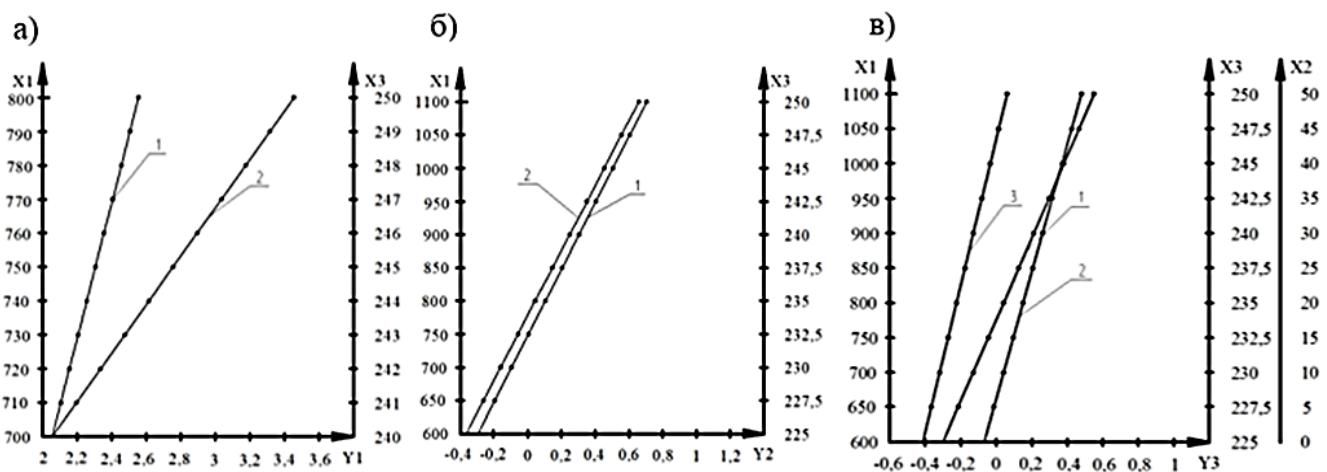


Рис. 2. Зависимость ширины (а) (1 – при расстоянии до фокальной плоскости 240 мм; 2 – при выходной мощности излучения 700 Вт), выпуклости лицевой (б) (1 – при расстоянии до фокальной плоскости 235 мм; 2 – при выходной мощности излучения 770 Вт) и корневой (в) (1 – при скорости сварки 10 мм/с и расстоянии до фокальной плоскости 240 мм; 2 – при выходной мощности излучения 800 Вт и скорости сварки 10 мм/с; 3 – при выходной мощности излучения 700 Вт и скорости сварки 10 мм/с) части шва от выходных параметров

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Лазерное упрочнение углеродистой стали У10 / В. А. Ким, А. С. Матарыкина, С. С. Матарыкина, Л. О. Назаренко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № II-1(34). – С. 75-82.
2. Цымбал, В. П. Математическое моделирование металлургических процессов: учеб. пособие для вузов / В. П. Цымбал. – М.: Металлургия, 1986. – 240 с.
3. Судник, В. А. Методы исследования сварочных процессов: учеб. пособие / В. А. Судник, В. А. Ерофеев. – Тула: ТПИ, 1980. – 100 с.
4. ГОСТ ISO 13919-2-2017. Сварка. Соединения, полученные электронно-лучевой и лазерной сваркой. Руководство по оценке уровня качества для дефектов. Часть 2. Алюминий и его сплавы. Введ. 2018-03-01. – М.: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2017. – 13 с.



Соснин А. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н.  
A. A. Sosnin, S. G. Zhilin, O. N. Komarov

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЁННОЙ ПОКОВКИ В УСТРОЙСТВЕ ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА

### ANALYTICAL FORECASTING OF THE STABILITY OF THE PROCESS FORMATION OF A LONG FORGING IN A CASTING DEVICE AND DEFORMATION OF METAL

**Соснин Александр Александрович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1; тел. +7(4217) 54-95-39. E-mail: sosnin@imim.ru.

**Aleksandr A. Sosnin** – PhD in Engineering, Senior Researcher, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681005, Russian Federation, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, st. Metallurgists 1; tel. +7(4217)54-95-39. E-mail: sosnin@imim.ru.

**Жилин Сергей Геннадьевич** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1; тел. +7(4217)54-95-39. E-mail: zhilin@imim.ru.

**Sergey G. Zhilin** – PhD in Engineering, Associate Professor, Leading Researcher, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681005, Russian Federation, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, st. Metallurgists 1; tel. +7(4217)54-95-39. E-mail: zhilin@imim.ru.

**Комаров Олег Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, врио директора Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1; тел. +7(4217)54-95-39. E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

**Oleg N. Komarov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Acting Director of the Institute of Machinery and Metallurgy of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IMM FEB RAS) of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681005, Russian Federation, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, st. Metallurgists 1; tel. +7(4217)54-95-39. E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

**Аннотация.** Существуют различные технологические процессы получения длинномерных металлоизделий, каждый из которых обладает своими преимуществами перед другими. В Институте машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук разработано и изготовлено устройство, реализующее процесс, обеспечивающий получение металлопрофиля в непрерывном режиме. Оно позволяет совместить в одном агрегате несколько технологических этапов, но требует соблюдения точных температурных параметров процесса. В результате применения математической модели по уточнённым значениям температур удалось реализовать возможность управления параметрами математического и физического моделирования процессов формирования протяжённой поковки в устройстве литья и деформации металла.

**Summary.** There are various processes used to produce long metalware and each has advantages over others. Institute of Machines and Metallurgy Science of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences has designed and made a device for continuous producing of metal profiles. It allows combining several process stages in one but under the condition that the process temperature parameters are exactly maintained. The mathematical model with adjusted temperatures allowed controlling the mathematic and physical simulation parameters for long forge forming in the metal casting and deforming unit.

Соснин А. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА

ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЁННОЙ ПОКОВКИ В УСТРОЙСТВЕ ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА

**Ключевые слова:** непрерывный процесс, математическая модель, граничные условия, технологические параметры, распределение температур.

**Key words:** continuous process, mathematical model, boundary conditions, technological parameters, temperature distribution.

УДК 004.942,621.7.043

Работа выполнена в рамках государственного задания ХФИЦ ДВО РАН.

Одним из стратегических направлений развития предприятий машиностроительного комплекса и металлургии в аспекте повышения конкурентоспособности и долгосрочного функционирования на рынке продукции является внедрение ресурсо- и энергосберегающих технологий. Достижение результатов в этом направлении возможно за счёт совмещения в одном агрегате технологических цепочек, что позволяет в значительной степени повысить производительность [2; 3; 5].

Традиционные многостадийные процессы формирования протяжённого металло profiliya с контролируемым сечением, как правило, состоят из длинной цепочки технологических этапов: производство стали, разливка и прокат [4], которые в совокупности имеют невысокую энергоэффективность. В Институте машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук разработано и изготовлено устройство, реализующее процесс, обеспечивающий получение металло profiliya в непрерывном режиме [1]. Особенностью конструктивного исполнения этого агрегата является совмещение трёх технологических этапов получения протяжённого металло profiliya в одной установке.

На рис. 1 представлены фрагменты протяжённых поковок, полученных на экспериментальном агрегате. Видно, что рост числа дестабилизирующих факторов при получении поковки приводит к образованию геометрических и поверхностных дефектов (см. рис. 1, а), а при соблюдении технологических параметров в требуемом диапазоне получаемый продукт не имеет дефектов (см. рис. 1, б).

а)



б)



Рис. 1. Фрагменты поковок, полученных на экспериментальном агрегате:  
а – поковка с дефектами; б – поковка без дефектов

Таким образом, геометрия, структура и свойства получаемой поковки формируются в достаточно узком диапазоне технологических параметров: величины и скорости обжатия, температур стенок кристаллизатора и расплава, поступающего в устройство, определяющих интенсивность теплоотвода. Экспериментально установлено, что параметром, обуславливающим устойчивость процесса, в большей степени является температурный режим, при котором металлоизделие будет формироваться в наиболее благоприятных условиях с наименьшими значениями напряжений.

Целью настоящей работы является реализация возможности управления параметрами математического и физического моделирования процессов формирования протяжённой поковки в устройстве литья и деформации металла.

Для достижения поставленной цели были произведены математические вычисления по методу, разработанному В. И. Одноковым [6] для решения задач упругости и пластичности. Для уточнения используемого в расчётах распределения температуры в объёме кристаллизатора был

проводён ряд экспериментов с использованием сплава АД0, представляющего собой технический алюминий, содержащий незначительное количество примесей (кремний, железо, магний, титан, цинк, медь и марганец). Сплав АД0 легко поддаётся формовке и механической обработке, устойчив к коррозии и отличается повышенной прочностью.

На рис. 2 представлен вид одной четвёртой части составного кристаллизатора этого агрегата, где схематично показаны точки, в которых установлены датчики измерения температуры (верхняя стенка кристаллизатора не показана). В качестве датчиков измерения температуры использованы термоэлектрические преобразователи (термопары) градуировки ХА(К) по ГОСТ Р8.585-2001 с диаметром проволоки 0,5 мм. Показания термопар фиксировали с помощью многоканального измерителя температуры марки «Термодат-29М1» (ТУ 4218-004-12023213-2004, государственный реестр средств измерения России № 17602-04).

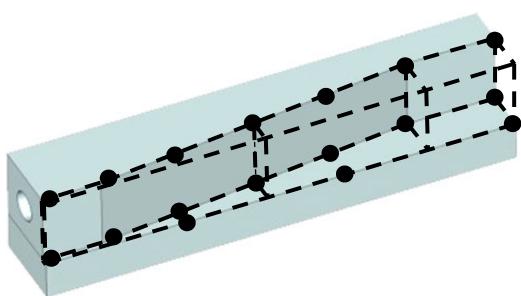


Рис. 2. Расположения термопар  
в кристаллизаторе

Значения поля температур установившегося режима, полученного в результате эксперимента, представляли в математическую модель процесса в качестве начальных условий для формирования уточнённой картины процессов, происходящих в ходе изготовления протяжённого металлопрофиля.

В результате физического эксперимента благодаря установленным согласно рис. 2 термопарам получены уточнённые значения температур на стенках кристаллизатора. После уточнения математической модели получены значения напряжений и было установлено, что благодаря математической модели расчётные напряжения,

полученные по уточнённым температурам, превышают исходные значения в среднем на 3-5 МПа.

Если учесть, что предел прочности пластиически деформированного технического алюминия марки АД0 составляет 90 МПа, то значения рассчитанных напряжений не выходят за рамки предела прочности, что обуславливает стойкость получаемых металлоизделий к разрушению при изготовлении.

Конечная математическая модель может быть использована в расчёте технологического процесса с целью прогнозирования проблемных участков формирования металлоизделия в устройствах литья и деформации металла, определения температур и напряжений в металлоизделии на различных участках кристаллизатора устройств такого типа.

## ЛИТЕРАТУРА

- Chernomas V. V., Lovizin N. S., Sosnin A. A. Stability criteria for manufacturing metal products on a horizontal metal casting and deformation plant // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2012. 41(2), p. 158-162.
- Georgi-Maschler, T. Maßnahmen zur Produktivitätssteigerung an einer Aluminium-Bandgießanlage // Proceeding of Aachner Stahlkolloquium. – Aachen, 2013. – P. 187-196.
- Jungbaue A., Linzer B., Viehböck A. Give Me Five – Rizhao Steel Counts on Arvedi ESP for High-Quality Hot Strip Production // AISTech 2015, Cleveland, Oh, USA. Proceedings. P. 2374-2379.
- Kartavtcev S. V., Matveev S. V., Neshporenko E. G. Heat-electrical regeneration way to intensive energy saving in an electric arc furnaces // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 136. 012003. (5p.).
- Müller J., Geerkens C., Emling W. H. CSP casting technology – 25 years of success // The Iron and Steel Technology Conference and Exposition (AISTech 2015), Cleveland, Oh, USA. Proceedings. P. 2380-2389.
- Odinokov, V. I., Sosnin, A. A. Mathematical simulation of metal deformation using horizontal foundry-forging module // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2012. 41(3), p. 223-228.

МАШИНОСТРОЕНИЕ  
MECHANICAL ENGINEERING

**Бабко А. П., Муравьев В. И.**  
**A. P. Babko, V. I. Muravyev**

**ЗАВИСИМОСТЬ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО СВАРОЧНОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ И КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ СВАРНОГО ШВА ИЗ ТИТАНОВОГО  
СПЛАВА**

**DEPENDENCE OF LASER WELDING INPUT PARAMETERS EQUIPMENT AND QUALITY  
OF PERFORMANCE OF TITANIUM ALLOY WELD**

**Бабко Александр Павлович** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: mim@knastu.ru.

**Alexander P. Babko** – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin str., 27. E-mail: mim@knastu.ru.

**Муравьев Василий Илларионович** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник управления научно-исследовательской деятельностью Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: vmuravyev@mail.ru.

**Vasily I. Muravyev** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Research Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin str., 27. E-mail: vmuravyev@mail.ru.

**Аннотация.** Рассмотрена зависимость таких параметров, как скорость сварки, мощность лазерного излучения, фокусное расстояние и подача защитного газа, при выполнении сварного шва из титанового сплава с помощью лазерного сварочного оборудования.

**Summary.** The dependence of such parameters as welding speed, laser radiation power, focal length and shielding gas supply when performing a weld from a titanium alloy using laser welding equipment is considered.

**Ключевые слова:** лазерная сварка, титановые сплавы, режимы сварки, качество шва.

**Key words:** laser welding, titanium alloys, welding modes, seam quality.

УДК 621.791.032

**Введение.** На стадии проведения первичных исследований по получению сварных швов из титановых сплавов BT20 и OT4 при помощи оптоволоконного лазера IPG возникли значительные трудности, так как по известным литературным источникам зачастую были представлены входные параметры по методике Григорьянца и Патона, согласно табл. 1 [1; 2].

Особенности их входных параметров заключаются в том, что они применимы больше для твёрдотельных лазеров импульсного действия первого и второго поколения, в основе которых применялись элементы рубина и алюмоиттриевого граната [1; 3].

Одной из проблем применения таких параметров стала невозможность выдачи оборудованием такого потока мощности (максимальная мощность лазера IPG 2073 Вт), а при понижении параметров с сохранением зависимости образовывались сварные швы с наличием неполного проплавления.

Нехватка информационной базы по оптоволоконному лазеру, который относится к новому перспективному направлению лазеров постоянного действия, вызвала необходимость подбора входных параметров: скорости сварки, мощности, фокуса и подачи защитного газа [3].

Скорость лазерной сварки, как выяснилось, влияет на сварной шов так же, как и в классической сварке: при больших скоростях ширина сварного шва достаточно низкая ( $v = 55$  м/ч;



$S = 2,0 \dots 2,5$  мм), а при малых скоростях ширина возрастила от 4,0 мм и более ( $v = 28,8$  м/ч;  $S = 3,6 \dots 3,9$  мм). Сварка при постоянной мощности и фокусе (экспериментальная мощность 1200 Вт, фокус 235 мм) может приводить как к поверхностному свариванию с неполным сплавлением кромок ( $v = 50 \dots 65$  м/ч), так и к полному проплавлению и высоким деформациям ( $v = 18 \dots 24$  м/ч), где при скорости уже  $v = 16 \dots 20$  м/ч возникали провалы и прожоги через 10...15 мм после начала прохождения сварного шва.

Следующим параметром являлась мощность. При значениях скорости 28,8 м/ч и фокусного расстояния 235 мм получались швы как с неполным проплавлением (при мощности 900 Вт), так и с полным сплавлением и малозначительными деформациями из-за долгого сохранения жидкой фазы (при мощности 1350 Вт). Причиной сохранения жидкой фазы является особенность титана – низкая теплопроводность. Габаритные размеры сварного шва также изменялись в зависимости от мощности: ширина валика росла с повышением мощности лазерного излучения.

Таблица 1  
Оптимальные параметры при сваривании образцов титана

$S$ , мм	$P$ , Вт	$V_{\text{св}}$ , м/ч	$F$ , мм
Образец ВТ6 – Методика Григорьянц (твёрдотельный лазер) [1]			
3	3000	80	300
2	2000	80	300
Образец ВТ22 – Методика Патона (твёрдотельный лазер) [3]			
5	4200	30	300
Образец Ti6Al4V – Методика сварки дисковым лазером (Triumph) [5]			
2	1000	48	200
	1000	54	
	600	30	
Образец ВТ20 – Собственная методика (оптоволокно IPG) [4]			
2	1230	28,8	235
	1300	28,8	235
	475	28,8	250

Третьим параметром, оказывающим непосредственное влияние на качество шва, является фокусное расстояние, с помощью которого на  $F = 250$  мм при меньшей приложенной мощности и скорости ( $P = 475$  Вт;  $v = 18$  м/ч) можно было создать такой же качественный шов, как и при  $F = 235$  мм ( $P = 1250$  Вт;  $v = 30$  м/ч) [4].

На этих параметрах режима швы либо имели удовлетворительное качество, либо такие дефекты, как прожоги, провалы сварного шва из-за продолжительного сохранения жидкой фазы, горячие трещины, непровары.

Дефекты при нехватке подачи защитного газа возникали гораздо чаще, так как титан достаточно критичен к повышению температур выше 450...500 °C, поглощая вредные примеси и увеличивая вероятность образования холодных трещин и пор [4].

Заданный газ предполагалось подавать в соответствии с авиационным стандартом ПИ 1.4.1898-2003 (на  $S = 2$  мм на лицевую – 12...14 л/мин, корневую – 7...9 л/мин), но удовлетворительных результатов не было, так как отсутствовала хорошая защита. Удовлетворительный обратный корневой шов получался при подаче аргона в количестве 10 л/мин и выше. При меньших показателях – отсутствие блеска сварного шва (вместо этого образование матовой поверхности) и растрескивание через 2...3 мин после прекращения сварки. На лицевом шве зависимость не находилась, так как даже по авиационному стандарту на лицевой шов подача газа в 1,4...1,5 раза больше, чем на корневой, поэтому качество лицевой поверхности было аналогично обратной.

**Бабко А. П., Муравьев В. И.**

ЗАВИСИМОСТЬ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО СВАРОЧНОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ И КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ СВАРНОГО ШВА ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Также большую пользу в работе оказала статья, где в качестве сварочного лазерного оборудования приводился дисковый лазер непрерывного действия, по исполнению схожий с оптоволоконным лазером [5].

**Выход.** Рассмотрев 4 главных параметра, влияющих на качество сварного шва, выявили дефекты и способы их получения. Для их недопущения необходимо выдерживать оптимальные значения, которые в данном случае строились на серии опытов и приближённых работах источников со схожей механикой работы и получением сварных швов из титанового сплава.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Григорьянц, А. Г. Лазерная сварка металлов: пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов. – М.: Высшая школа, 1988. – 207 с.
2. Лазерная сварка титановых сплавов / Б. Е. Патон [и др.] // Автоматическая сварка. Производственный раздел. – 2009. – № 10. – С. 35-39.
3. Катаяма, С. Мир физики и техники / С. Катаяма, Н. Л. Истомина. – М.: Техносфера, 2015. – 697 с.
4. Бабко, А. П. Исследование процесса роботизированной лазерной сварки элементов трубопроводных систем из титановых сплавов летательных аппаратов: выпускная квалификационная работа / Бабко А. П. – Комсомольск-на-Амуре, 2019. – 97 с.
5. Lisiecki, A. Welding of titanium alloy by different types of lasers / A. Lisiecki // Archives of Materials Science and Engineering. Volume 58. – 2012. – P. 209-218.



**Белан Б. Р., Богданова Н. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н.**  
**B. R. Belan, N. A. Bogdanova, S. G. Zhilin, O. N. Komarov**

## НОВЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОКСИДНОГО СЛОЯ ПРОТЯЖЁННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБНЫХ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ

### NEW METHODS FOR DAMAGE DIAGNOSTICS OF OXIDE LAYER OF PIPE STEAM HEATER EXTENDED ELEMENTS

**Белан Богдан Романович** – аспирант Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1; тел. +7(4217)54-95-39. E-mail: ace.97@mail.ru.

**Bogdan R. Belan** – Post-Graduate Student, Khabarovsk Federal Research Center of the FEB RAS (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681005, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, 1 Metallurgists' str.; tel. +7(4217)54-95-39. E-mail: ace.97@mail.ru.

**Богданова Нина Анатольевна** – младший научный сотрудник Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1; тел. +7(4217)54-95-39. E-mail: joyful289@inbox.ru.

**Nina A. Bogdanova** – Junior Researcher, Khabarovsk Federal Research Center of the FEB RAS (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681005, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, 1 Metallurgists' str.; tel. +7(4217)54-95-39. E-mail: joyful289@inbox.ru.

**Жилин Сергей Геннадьевич** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1; тел. +7(4217)54-95-39. E-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru.

**Sergey G. Zhilin** – PhD in Engineering, Associate Professor, Leading Researcher, Khabarovsk Federal Research Center of the FEB RAS (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681005, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, 1 Metallurgists' str.; tel. +7(4217)54-95-39. E-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru.

**Комаров Олег Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1; тел. +7(4217)54-95-39. E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru

**Oleg N. Komarov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Leading Researcher, Khabarovsk Federal Research Center of the FEB RAS (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681005, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, 1 Metallurgists' str.; tel. +7(4217)54-95-39. E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

**Аннотация.** Паропроводы и коллекторы изготавливают из конструкционных коррозионностойких жаропрочных сталей. Температурные колебания при эксплуатации паропроводов влияют на появление структурных и поверхностных дефектов, связанных с образованием оксидного слоя. По мере роста толщины оксидный слой становится защитным барьером между перегретым паром и телом трубы. Эксплуатационные теплосмены определяют появление эффекта бездеформационного разрушения защитного слоя, что приводит к выводу агрегата из строя и определяет актуальность точной диагностики деформационной стойкости. При диагностике образцы труб сплющивают и наблюдают стадии разрушения оксидного слоя. Такой подход не обеспечивает учёт деформации оксидного слоя в условиях рабочих температур, а точность регистрации разрушения слоя зависит от расположения образца в тестовой машине. Это влияет на качество прогноза остаточного ресурса конструкции. Предложен подход к регистрации деформации оксидного слоя, учитывающий отмеченные факторы.

**Summary.** Steam lines and manifolds are made of constructional corrosion-resistant heat-resistant steels. Temperature fluctuations during the operation of steam pipelines affect the appearance of structural and surface defects associated with the formation of an oxide layer. As the thickness increases, the oxide layer becomes a protective barrier between the overheated steam and the pipe body. Operational thermal cycles determine the appearance of the

effect of deformation-free destruction of the protective layer, which leads to the failure of the unit and determines the relevance of an accurate diagnosis of deformation resistance. During diagnostics, pipe samples are flattened and the stages of destruction of the oxide layer are observed. This approach does not provide taking into account the deformation of the oxide layer under operating temperatures, and the accuracy of the layer destruction recording depends on the location of the sample in the testing machine. This affects the quality of the forecast of the residual life of the structure. An approach to registering the deformation of the oxide layer is proposed, taking into account the above factors.

**Ключевые слова:** деформационная стойкость, оксидный слой, пароперегреватель, температура, эксплуатация, диагностика.

**Key words:** deformation resistance, oxide layer, superheater, temperature, operation, diagnostics.

УДК 621.9:519.8

Работа выполнена в рамках государственного задания ХФИЦ ДВО РАН.

На выбор материалов, используемых в конструкциях установок, имеющих в своём составе элементы пароперегревателей высокого давления, превалирующее влияние оказывают факторы, связанные с возможностью долговременного сохранения их эксплуатационных характеристик в условиях переменных температур.

В качестве основных материалов таких конструкций используют теплоустойчивые и коррозионностойкие жаропрочные стали марок 12Х1МФ и 12Х18Н12Т, позволяющие обеспечить долговременную эксплуатацию объектов при давлении перегретого пара более 4 МПа, а также в интервале температур +196...+600 °C. В условиях кратковременного критического повышения температур до +800 °C в результате контакта теплоносителя с рабочей поверхностью паропровода происходит интенсивное образование магнетита [1]. Со временем замедляется рост толщины этого оксидного слоя, он становится защитным барьером между теплоносителем и основным металлом конструкции, предотвращая последний от коррозии и снижая напряжения, возникающие при теплосменах [2; 3]. Разрушению защитного оксидного слоя в ходе длительной эксплуатации способствует рост упругих напряжений, значения которых при остывании могут превышать предел текучести основного материала до 2 раз [4].

С целью продления срока эксплуатации паропровода проводят мероприятия, направленные на предотвращение коррозионного образования водородных соединений в структуре основного металла, способных в значительной мере снижать пластичность последнего [5].

В ряду мероприятий по диагностике элементов конструкций пароперегревателей используются методы неразрушающего контроля, основанные на регистрации изменений физических параметров материалов [6; 7]. Наиболее точными методами оценки деформационной способности оксидного слоя всё же остаются методы разрушающего контроля [8]. Разработка методов повышения точности диагностики повреждений оксидного слоя элементов трубных пароперегревателей представляется актуальной задачей и определяет цель настоящего исследования.

В настоящее время используют различные варианты определения деформационной способности оксидного слоя методами разрушающего контроля. Так, согласно авторскому свидетельству [11], эквивалентную температуру эксплуатации и остаточную долговечность металла определяют по специальным nomogrammам, которые не позволяют учесть сплошность оксидной плёнки. А точность метода, реализуемого по патенту РФ [2], согласно которому образцы из труб подвергают испытанию на сплющивание со скоростью деформирования ~ 5 мм/мин и регистрируют стадии осыпания слоёв оксидов, представляется невысокой. В обоих случаях испытания, проводимые в нормальных температурных условиях, не позволяют сделать вывод о физико-механических свойствах исследуемого материала, характерных для температур долговременной эксплуатации, соответствующих интервалу значений +400...+700 °C (т.к. при увеличении температуры прочность оксидного слоя снижается).

Для достижения цели исследования реализован эксперимент, в ходе которого фрагмент участка паропровода с оксидным слоем (см. рис. 1), выполненного из стали 12Х1МФ, сплющивали согласно методике, представленной в [9; 10] и на рис. 2. Из анализа рис. 1, б видно, что в структуре оксидного слоя присутствуют нарушения сплошности, что может привести к его отслоению и, следовательно, снижению его защитной функции. Габаритные размеры фрагментов трубы следующие: наружный диаметр 32 мм, толщина стенки 4 мм, высота 32 мм. Оксидный слой образован в результате эксплуатации при температуре +567 °С в течение 180 тыс. ч при давлении теплоносителя 14,2 МПа. Испытания проводили на универсальной тестовой машине Shimadzu AG-X plus 250kN.

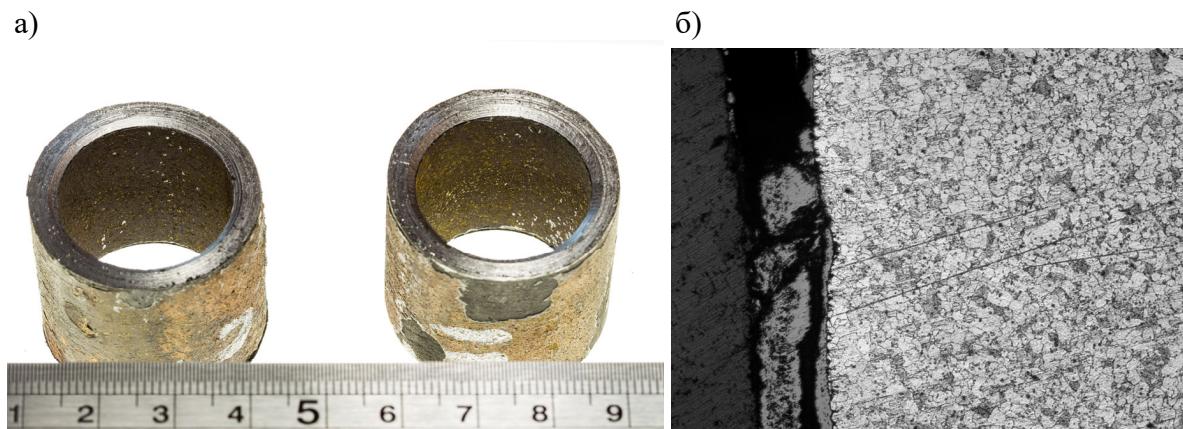


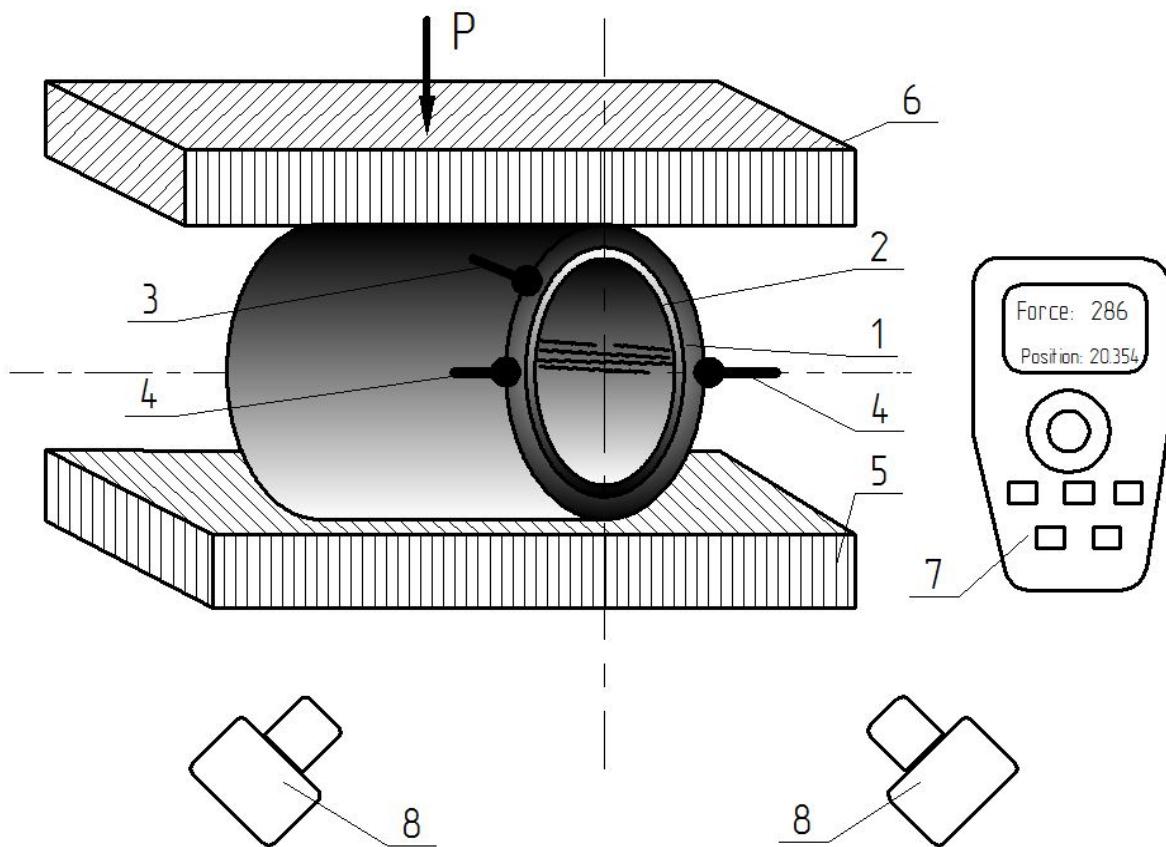
Рис. 1. Фрагменты труб из стали 12Х1МФ: а – внешний вид с оксидным слоем, б – оксидный слой на внутренней стенке трубы (х200)

Согласно рис. 2, на поверхность фрагмента трубы 1 с оксидным слоем 2 устанавливается термопара 3 (ТХА типа К) и электроконтакты 4, обеспечивающие нагрев образца до температуры эксплуатации. Образец 1 размещают между неподвижной 5 и подвижной 6 опорами испытательного стенда на сжатие. Стенд дополнительно снабжён блоком управления 7 с индикатором для отображения параметров: времени (с), перемещения подвижной опоры (мм), силы (кН). Регистрация параметров испытания осуществляется двумя видеокамерами 8, установленными так, чтобы внутренняя стенка образца и индикатор попадали в кадр каждой из камер. Задачей такого расположения камер является регистрация начала появления дефектов в оксидном слое.

В результате перемещения подвижной опоры испытательного стенда фрагмент трубы сплющивают до образования полос металла, свободных от оксидного слоя, который осыпается в результате деформации. Анализом данных видеозаписи, синхронизированных с данными индикатора, регистрируют моменты точечного отслоения частиц оксидного слоя и появление сплошных трещин в нём. В результате сплющивания внутренний диаметр фрагмента трубы увеличивается, что определяет появление  $\Delta D_{\text{вн}} = D_{\text{вн}i} - D_{\text{вн}j}$ , где  $D_{\text{вн}i}$  и  $D_{\text{вн}j}$  представляют собой значения внутреннего диаметра до и после силового воздействия соответственно. По величине  $\Delta D_{\text{вн}}$  и деформации  $\varepsilon$  в зоне сжатия с помощью экспериментальных зависимостей, представленных в [8], определяют значения деформаций  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ , характерных для стадий появления дефектов в оксидном слое в виде отслоения отдельных его чешуйек, появления цепочек таких образований и начала осыпания оксидного слоя соответственно. Согласно [8; 9], труба признаётся работоспособной при следующих значениях относительной деформации  $\varepsilon_i$ :  $\varepsilon_1 \leq 1,3\%$ ;  $\varepsilon_2 > 1,3\%$ , но  $\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \leq 0,5\%$ .

В результате серии экспериментов, направленных на выявление применимости усовершенствованной методики определения работоспособности труб пароперегревателей, установлено, что исследуемые фрагменты труб из стали 12Х1МФ, эксплуатировавшихся при повышенных температурах, отвечают условиям  $\varepsilon_2 > 1,3\%$  и  $\varepsilon_2 - \varepsilon_1 > 0,5\%$ , а значит, пригодны для дальнейшей эксплуатации. Дальнейшими механическими испытаниями установлены значения временного сопротив-

ления разрыву  $\sigma_b = 511,7$  МПа; предела текучести  $\sigma_t = 338,5$  МПа; относительного удлинения  $\delta_s = 22,7\%$ , в целом отвечающие требованиям ТУ 14-3Р-55-2001.



1 – фрагмент трубы; 2 – оксидная плёнка; 3 – термопара; 4 – электроконтакт;  
5 – неподвижная опора испытательного стенда; 6 – подвижная опора испытательного стенда;  
7 – блок управления; 8 – видеокамера

Рис. 2. Схема испытания

Таким образом, в ходе эксперимента подтверждена работоспособность усовершенствованной методики оценки работоспособности труб пароперегревателей, обеспечивающих проведение исследований в температурных условиях эксплуатации трубы, что совместно с повышением точности регистрации момента появления первой трещины в оксидной плёнке внутренней поверхности испытуемых образцов позволяет повысить точность прогноза последующей эксплуатации труб парогенераторов, котлов и т.д.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Беляков, И. И. Анализ причин эрозионных повреждений элементов испарительных контуров низкого давления котлов-utiлизаторов парогазовых энергетических установок / И. И. Беляков, В. И. Бреус, М. С. Попов // Тяжёлое машиностроение. – 2018. – № 1-2. – С. 21-25.
2. Смирнов, А. Н. Исследование микроструктуры и фазового состава стали 12Х1МФ после длительной эксплуатации / А. Н. Смирнов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2004. – № 2 (39). – С. 67-72.
3. Protecting Steam Cycle Components During Low-Load Operation of Combined Cycle Gas Turbine Plants. Dave Moelling, Peter Jackson, and Jim Malloy. Tetra Engineering Group. Power magazine, 03.01.2015.
4. Vainman A. B., Martynova O. I., Ens V. A. Failures of steam lines at thermal power stations due to corrosion surroundings // Thermal Engineering. 1999. T. 46. № 5. P. 376-386.



5. Lyubimova A. A., Makeev A. A., Tashlykov A. S., Zavorin R. N. Steel in Translation. 2014. V. 44. № 2. P. 117.
6. Дубов, А. А. Диагностика аустенитных труб пароперегревателей паровых котлов по магнитным полям рассеяния / А. А. Дубов // Теплоэнергетика. – 1999. – № 5. – С. 29-31.
7. Диагностика защитных свойств оксидных плёнок на внутренних поверхностях паропроводных труб на основе электрохимических методов исследования / Т. В. Липкина, С. М. Липкин, Т. В. Козлова [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 12. – С. 34-40.
8. СТО 17230282.27.100.005-2008. Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. Контроль состояния металла. Нормы и требования. – Москва, 2008. – С. 442-444.
9. Патент № 2726260 Российская Федерация, МПК G01N 17/00 (2006.01). Способ определения работоспособности труб пароперегревателя: № 2020101165: заявлено 10.01.2020; опубликовано 10.07.2020 / Богданова Н. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н., Попов А. В., Фирсов С. В. – 11 с.
10. Zhilin S. G., Komarov O. N and Bogdanova N. A. The diagnosis of damage of the oxide layer of the steam superheater pipes // Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2020) AIP Conf. Proc. 2315 (2020) 040050-1–040050-5.
11. Авторское свидетельство № 1012131 СССР, МПК G01N 33/20. Способ определения остаточной долговечности труб пароперегревателя котла электростанции: № 3372278: заявлен 29.12.1981: опубликован 15.04.1983 / Школьникова Б. Э., Шешенев М. Ф., Злекко В. Ф., Пронина Г. Г. – 2 с.
12. Патент № 2036466 Российская Федерация, МПК G01N 17/00(2006.01). Способ определения работоспособности труб пароперегревателя: № 5062285/28: заявлено 17.09.1992: опубликовано 27.05.1995 / Школьникова Б. Э., Шешенев М. Ф., Урусова Г. А., Белов В. В. – 7 с.

**Богданова Н. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н.**

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЁННОЙ ПРЕССОВКИ ИЗ ВОСКООБРАЗНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ЭКСТРУЗИОННОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ПОРОШКОВОГО ТЕЛА

**Богданова Н. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н.**

**N. A. Bogdanova, S. G. Zhilin, O. N. Komarov**

## **УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЁННОЙ ПРЕССОВКИ ИЗ ВОСКООБРАЗНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ЭКСТРУЗИОННОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ПОРОШКОВОГО ТЕЛА**

### **CONDITIONS FOR FORMATION OF EXTENDED PRESSING FROM WAX-LIKE MATERIAL AT EXTRUSIVE POWDER BODY PRESSURE**

**Богданова Нина Анатольевна** – младший научный сотрудник Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1; тел. +7(4217)54-95-39. E-mail: joyful289@inbox.ru.

**Nina A. Bogdanova** – Junior Researcher, Khabarovsk Federal Research Center of the FEB RAS (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681005, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, 1 Metallurgists' str.; tel. +7(4217)54-95-39. E-mail: joyful289@inbox.ru.

**Жилин Сергей Геннадьевич** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1; тел. +7(4217)54-95-39. E-mail: sergeyজilin1@rambler.ru.

**Sergey G. Zhilin** – PhD in Engineering, Associate Professor, Leading Researcher, Khabarovsk Federal Research Center of the FEB RAS (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681005, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, 1 Metallurgists' str.; tel. +7(4217)54-95-39. E-mail: sergeyজilin1@rambler.ru.

**Комаров Олег Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1; тел. +7(4217)54-95-39. E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

**Oleg N. Komarov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Leading Researcher, Khabarovsk Federal Research Center of the FEB RAS (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681005, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, 1 Metallurgists' str.; tel. +7(4217)54-95-39. E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

**Аннотация.** Холодная формовка прессовок из воскообразных материалов направлена на решение проблемы повышения размерной и геометрической точности литьих изделий. Такой подход позволяет устраниить тепловые дефекты выплавляемых моделей и повысить стойкость к образованию трещин формируемой на их поверхности керамики. Неоднородность распределения температур в участках прессовки определяет некоторые сложности при осуществлении процесса формирования длинномерных участков выплавляемой модели. Так, получение длинномерных участков прессовок связано с образованием зон различной плотности, приводящих к искажению размеров ввиду упругого отклика уплотняемого материала. С целью получения протяжённой прессовки с однородной плотностью экспериментально определены условия экструзионного выдавливания и установлены соотношения диаметра диффузора мундштука к площади экструдера.

**Summary.** Cold forming of compacts from wax-like materials is aimed at solving the problem of increasing the dimensional and geometric accuracy of cast products. This approach makes it possible to eliminate thermal defects of the melted models and increase the resistance to the formation of cracks formed on the ceramic surface. The inhomogeneity of the temperature distribution in the pressing areas determines some difficulties in the implementation of the process of forming long sections of the melted model. So, obtaining long sections of compacts is associated with the formation of zones of different density, leading to distortion of the dimensions due to the elastic response of the compacted material. In order to obtain an extended pressing with a uniform density, the conditions of extrusion were experimentally determined and the ratios of the diameter of the mouthpiece diffuser to the area of the extruder were established.

**Ключевые слова:** деформация, упругий отклик, экструзия, мундштучное выдавливание, воскообразный порошковый материал, давление, выплавляемая модель.

**Key words:** deformation, elastic response, extrusion, extrusion, wax powder, pressure, lost wax.



УДК 621.9:519.8

Работа выполнена в рамках государственного задания ХФИЦ ДВО РАН.

В современных заготовительных технологиях, как правило, применяется многостадийная последовательность получения отливок, завершающаяся механическим и термическим видами обработок. В этой связи технологии, направленные на получение заготовок с характеристиками, максимально приближёнными к готовым изделиям, являются наиболее востребованными в условиях сокращения цикла их использования. Высоким требованиям по размерной и геометрической точности литьих заготовок в наибольшей степени отвечает метод литья по выплавляемым моделям (ЛВМ), использование которого позволяет получать литьё сложной геометрии и существенно сокращать затраты на механическую обработку [1; 2]. Однако значительное количество технологических стадий в ЛВМ, а также необходимость исправления брака, связанного с теплофизическими явлениями при получении и использовании выплавляемых моделей, негативно отражаются на стоимости литья [3; 4].

Совершенствование методов формообразования в ЛВМ привело к необходимости разработки нового принципа получения выплавляемой модели прессованием [5] дисперсных воскообразных композиций, широко используемых в производственной практике [1]. Процесс прессования порошкового тела позволяет устранить тепловые дефекты в выплавляемой модели, т.к. внешний подвод тепла для её формирования не требуется и, следовательно, отмеченные выше причины образования брака устраняются самопроизвольно. Предварительно установлено, что точность прессованных моделей в среднем на 1-2 квалитета выше, чем у традиционных [6]. Однако при уплотнении порошка воскообразного материала возможно появление упругого отклика, величина которого составляет 0,4...0,6 % в направлении, поперечном оси уплотнения. Значение упругого отклика уплотнённого материала существенно меньше, чем величина усадки, достигающая в традиционных процессах ЛВМ 14 %. Однако корректировка процесса формирования прессовки всё же необходима [7; 8]. Разнотолщинные участки прессовки сложной конфигурации могут иметь отличия по плотности. Значения плотности ряда участков могут превышать плотность материала, полученного свободной заливкой. Таким образом, возможные затруднения при проектировании пресс-форм определяют актуальность исследования процесса управления формированием пористой прессовки сложной конфигурации.

Решение проблемы видится в рациональном выборе режима формирования прессовки, который определяется скоростью прессования и временем релаксации уплотнённого материала под нагрузкой. Упругий отклик возникает также при формировании тонкостенных элементов из пластичного воскообразного материала на упругой плотной основе в ходе получения выплавляемой модели биметаллической отливки. Сформированная таким способом поверхность определяет геометрию будущей отливки [9; 10]. Поскольку воскообразные материалы в традиционной промышленности не рассматриваются в качестве конструкционных и отличаются уникальным набором механических характеристик, возникает ряд проблем, связанных с использованием известных расчётных моделей, описывающих поведение материала при нагрузке и релаксации.

Таким образом, целью исследования стало экспериментальное определение параметров процесса экструзионного мундштучного выдавливания, имитирующего формирование воскообразной поверхности на модели биметаллической отливки. В рамках поставленной цели решались практические задачи, связанные с определением взаимного влияния площадей поперечных сечений загрузочного окна и диффузора цилиндрической пресс-матрицы на величину нагрузки при экструзии уплотняемого материала и плотность длинномерной прессовки.

В ходе реализации эксперимента в качестве воскообразного порошкового тела использован парафин марки Т1 фракций 0,63 мм и 2,5 мм, который помещали в цилиндрическую пресс-матрицу, снабжённую диффузором с внутренней конической поверхностью, угол образующих сторон которого равен 120°. Соотношение внутренних диаметров диффузора и пресс-матрицы в ходе эксперимента изменялось от 1:60 до 1:6. В ходе эксперимента материал Т1 дозировался в

**Богданова Н. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н.**

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЁННОЙ ПРЕССОВКИ ИЗ ВОСКООБРАЗНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ЭКСТРУЗИОННОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ПОРОШКОВОГО ТЕЛА

пресс-матрицу и уплотнялся поршнем, скорость перемещения которого составила 0,5 мм/с. Даные по нагрузке регистрировались при помощи испытательной машины AG-X plus Shimadzu.

В результате эксперимента установлены параметры экструзионного выдавливания, при которых формируются длинномерные пористые прессовки с плотностью меньшей, чем плотность материала Т1, характерная для условий свободной заливки. При формировании поверхности с удовлетворительной геометрией такой эффект позволяет судить об отсутствии упругого отклика материала. Установлено, что увеличение соотношений указанных выше площадей приводит к росту значений максимальной нагрузки, сопровождающей момент начала экструзии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Литьё по выплавляемым моделям / В. Ф. Гаранин, В. Н. Иванов, С. А. Казеннов и др.; под общ. ред. В. А. Озерова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1994. – 448 с.
2. Жильцов, Н. П. Проблема очищаемости отливок литья по выплавляемым моделям / Н. П. Жильцов, Н. А. Кидалов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2019. – № 7 (230). – С. 80-83.
3. Гусева, М. А. Исследование реологии модельных композиций для литья по выплавляемым моделям в зависимости от природы и соотношения основных компонентов / М. А. Гусева, И. Р. Асланян, С. А. Пономаренко // Труды ВИАМ. – 2020. – № 1 (85). – С. 126-134.
4. Оспенникова, О. Г. Теплофизические и реологические характеристики синтетических смол для модельных композиций / О. Г. Оспенникова // Литейное производство. – 2016. – № 10. – С. 26-28.
5. Жилин, С. Г. Влияние параметров уплотнения порошкового тела из воскообразного материала на формирование остаточных напряжений прессовки / С. Г. Жилин, Н. А. Богданова, О. Н. Комаров // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2019. – № 3 (41). – С. 110-121.
6. Снижение упругого отклика при уплотнении порошковой парафиностеариновой композиции / С. Г. Жилин, Н. А. Богданова, О. Н. Комаров, А. А. Соснин // Деформация и разрушение материалов. – 2020. – № 1. – С. 29-33.
7. Burenin A. A. Elastic Response of Media in the Process of Propagation, Stoppage and Reoccurring of a Visco-plastic Flow, Including Instatntaneous Unloading // Fundamental problems in theoretical and applied mechanics. Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod, 2011, № 4 (5), pp. 2043-2044.
8. Zhilin S. G., Komarov O. N., Bogdanova N. A. Production of the steel casting with improved dimensional and geometrical accuracy using complex models // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 (2020) 033104.
9. Sosnin A. A., Bogdanova N. A., Zhilin S. G. and Komarov O. N. Finite Element Modeling of the Stress-Strain State of Waxy Compacts // Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2019) AIP Conf. Proc. 2176, pp. 030017-1–030017-4.
10. Bogdanova N. A., Zhilin S. G. and Komarov O. N. Influence of the channel diameter ratio during extrusion forming of a paraffin powder body on compacting parameters // Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2020) AIP Conf. Proc. 2315 (2020) 030003-1–030003-5.



Гостевская А. Н.  
A. N. Gostevskaya

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ НА ЗОНУ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ РЕЛЬСОВ МАРКИ Э76ХФ

## STUDY OF THE INFLUENCE OF PARAMETERS CONTACT BUTT WELDING ON THE ZONE OF THERMAL INFLUENCE OF E76HF RAILS

Гостевская Анастасия Николаевна – аспирант Сибирского государственного индустриального университета (Россия, Новокузнецк). E-mail: lokon1296@mail.ru.

Anastasia N. Gostevskaya – Post-Graduate Student, Siberian State Industrial University (Russia, Novokuznetsk). E-mail: lokon1296@mail.ru.

**Аннотация.** В работе проведено исследование влияния контактного подогрева режимов сварки на макро- и микроструктуру сварных соединений рельсов марки Э76ХФ. При исследовании установлены оптимальные параметры сварки, благодаря которым возможно получить требуемую структуру материала.

**Summary.** In this work, the study of the effect of contact heating of welding modes on the macro- and microstructure of welded joints of E76HF rails was carried out. In the course of the study, the optimal welding parameters were established, thanks to which it is possible to obtain the required material structure.

**Ключевые слова:** контактная стыковая сварка, сварной шов, рельсовая сталь, структура, зона термического влияния.

**Key words:** resistance butt welding, weld seam, rail steel, structure, heat-affected zone.

УДК 669.72

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420003 р\_а «Развитие физико-химических и технологических основ создания принципиально нового способа сварки дифференцированно термоупрочнённых железнодорожных рельсов».

Разрушение железнодорожных рельсов является одной из самых актуальных проблем на сегодняшний день. Существующие технологии сварки не позволяют обеспечить необходимую надёжность сварных соединений [1–3]. На сегодняшний день активно развивается строительство и укладка скоростных магистралей железных дорог с использованием рельсов типа Р65, изготовленных из рельсовой стали.

Одной из важных проблем сварки рельсов является несоответствие данных, полученных при исследовании контрольных образцов после сварки непрерывным или пульсирующим оплавлением и образцов без воздействия на сварное соединение термообработкой. В сравнении с отечественным способом при сварке рельсовых стыков зарубежный метод выдвигает специальные требования по термообработке. Способ непрерывного оплавления приводит к удлинению зоны термического влияния, что воздействует на прочность сварных соединений рельсовых стыков.

Изучение свойств сварных стыков рельсов показало, что на сегодняшний день сварка рельсов методом непрерывного оплавления не позволяет достичнуть необходимого уровня прочностных характеристик, что, в свою очередь, приводит к образованию в металле сварного стыка сварочных дефектов. Из-за этого происходит падение срока службы рельсов и приводит к большим затратам на ремонт.

Исследования показали, что важными условиями, приводящими рельсы к разрушению, считаются наличие в стали неметаллических включений, присутствие непозволительной структу-

ры в сварном соединении и протяжённость зоны термического влияния. Целью работы является изучение влияния режимов сварки на твёрдость, уровень загрязнённости неметаллическими включениями, а также макро- и микроструктуру сваренных образцов.

Для проведения исследований была выбрана рельсовая сталь марки Э76ХФ, с химическим составом образцов, приведённым в табл. 1.

Таблица 1

## Химический состав образцов рельсовой стали

Химический элемент	Массовая доля элементов, %		
	Режим № 0	Режим № 1	Режим № 2
C	0,76	0,76	0,76
Mn	0,77	0,77	0,77
Si	0,53	0,53	0,53
Cr	0,37	0,36	0,36
V	0,04	0,04	0,04
P	0,009	0,014	0,014
S	0,005	0,007	0,007
Al	0,003	0,003	0,003
Ni	0,07	0,06	0,06
Cu	0,11	0,08	0,08
Ti	0,002	0,002	0,002
Mo	0,005	0,004	0,004
Nb	0,001	0,001	0,001
Sn	0,005	0,004	0,004
Sb	0,002	0,001	0,001
O	0,0009	0,0009	0,0009
H, ppm	1	1,1	1,1

Для сварки использовались образцы из рельсов сечением 10×30 мм и длиной 90 мм. Образец № 0 получен способом контактной стыковой сварки непрерывным оплавлением без термообработки. Контактную стыковую сварку непрерывным оплавлением проводили на машине МС-20.08 по режиму:  $K_{tp} = 65$ ,  $U_2 = 5,76$  В,  $I_2 = 11,7$  кА,  $V_{опл} = 1$  мм/с,  $\Delta_{опл} = 10$  мм,  $\Delta_{ос} = 4$  мм, где  $K_{tp}$  – коэффициент трансформации;  $U_2$  – вторичное напряжение;  $I_2$  – вторичный ток;  $V_{опл}$  – скорость оплавления;  $\Delta_{опл}$  – припуск на оплавление;  $\Delta_{ос}$  – припуск на осадку.

При сварке образцов № 1 и № 2 происходил подвод дополнительного тепла в момент их охлаждения путём пропускания через сварной стык переменного электрического тока по заданным режимам (см. табл. 2). Исследуемыми параметрами введения дополнительного тепла явились:  $X_1$  – время охлаждения после осадки (характеризуется скоростью охлаждения (степенью переохлаждения аустенита) и температурой  $T_1$ , до которой происходит охлаждение);  $X_2$  – время подогрева (характеризуется температурой  $T_2$ , до которой происходит нагрев);  $X_3$  – время охлаждения после подогрева (характеризуется температурой  $T_1$ , до которой происходит охлаждение);  $X_4$  – количество импульсов подогрева (характеризуется инкубационным периодом превращения аустенита в перлит).

Таблица 2

## Режимы контактного подогрева образцов стали Э76ХФ

Номер режима	$X_1$ , с	$X_2$ , с	$X_3$ , с	$X_4$ , с
1	25	0,6	15	4
2	25	0,6	15	2

Исследование образцов стали Э76ХФ на неметаллические включения проводилось на металлографическом микроскопе OLYMPUS GX-51 при увеличении в 100 крат в соответствии с

ГОСТ 1778-70. Металлографический анализ изменений структуры проводился при увеличении в 500 крат в соответствии с ГОСТ 8233-56. Для создания оптического контраста образцы химически травились раствором, представляющим собой 4%-й раствор азотной кислоты в этиловом спирте, в течение 6 с. Анализ и оценка микроструктуры образцов выполнены по ГОСТ 8233-56.

Зона термического влияния образца, полученного по режиму № 0 без дополнительного подвода тепла, имеет протяжённость 4 мм (см. рис. 1, а).

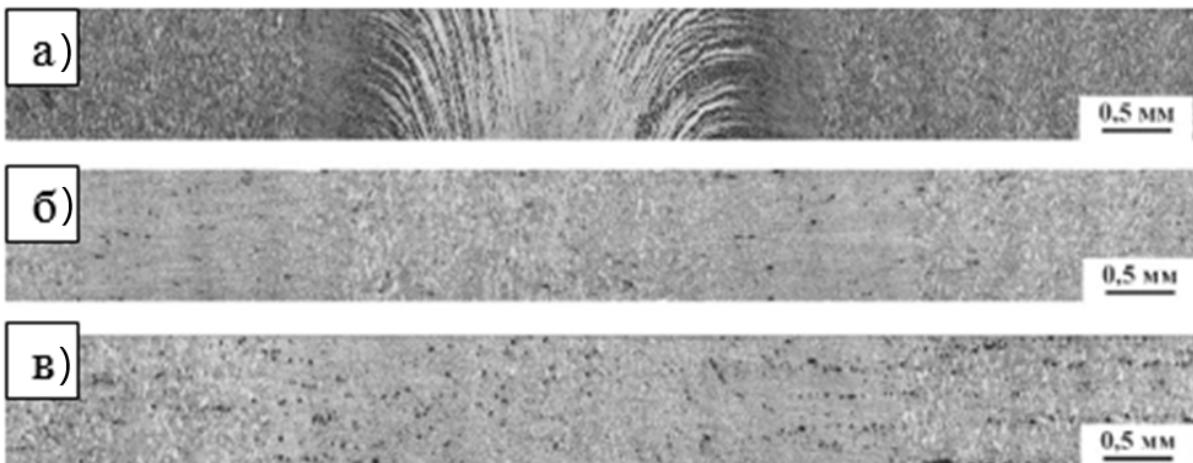


Рис. 1. Макроструктура образцов: а – образец № 0; б – образец № 1; в – образец № 2

В образце № 0, сваренном без дополнительного подвода тепла, были обнаружены включения в виде точечных оксидов (балл № 1) и недеформирующихся силикатов (балл № 1) (см. рис. 2, а).

На рис. 3 показано, что в микроструктуре зоны сварного шва и зоны крупного зерна существует структура игольчатого мартенсита. В зоне мелкого зерна и основного металла выявлена структура мелкодисперсного перлита.

Структура образца после сварки значительно отличается от исходного, в структуре в зоне сварного шва наблюдается игольчатый мартенсит. Исследование микроструктуры сварного шва позволило выявить, на какие зоны подразделяется материал после электроконтактной сварки:

1. основной металл (см. рис. 3, а);
2. участок мелкого зерна (нормализации) (см. рис. 3, б);
3. зона крупного зерна (см. рис. 3, в);
4. зона сварного шва (см. рис. 3, г).

Как видно из рис. 3, сварной шов и зона термического влияния имеют структуру игольчатого мартенсита. На расстоянии 4 мм от сварного соединения структура изменяется и представлена в виде перлита мелкой дисперсности. Структура образца через 8 мм от сварного соединения является характерной для основного металла.

Изучение образца № 1 показало, что зона термического влияния составляет 5 мм (см. рис. 1, б).

Исследования неметаллических включений образца, полученного по режиму № 1, показали, что данный образец является наиболее загрязнённым неметаллическими включениями. В образце были выявлены силикаты пластинчатые и точечные.

Анализ микроструктуры выявил в образце № 1 наличие следующих зон:

1. основной металл (см. рис. 4, а);
2. участок мелкого зерна (нормализации) (см. рис. 4, б);
3. зона крупного зерна (см. рис. 4, в);
4. зона сварного шва (см. рис. 4, г).

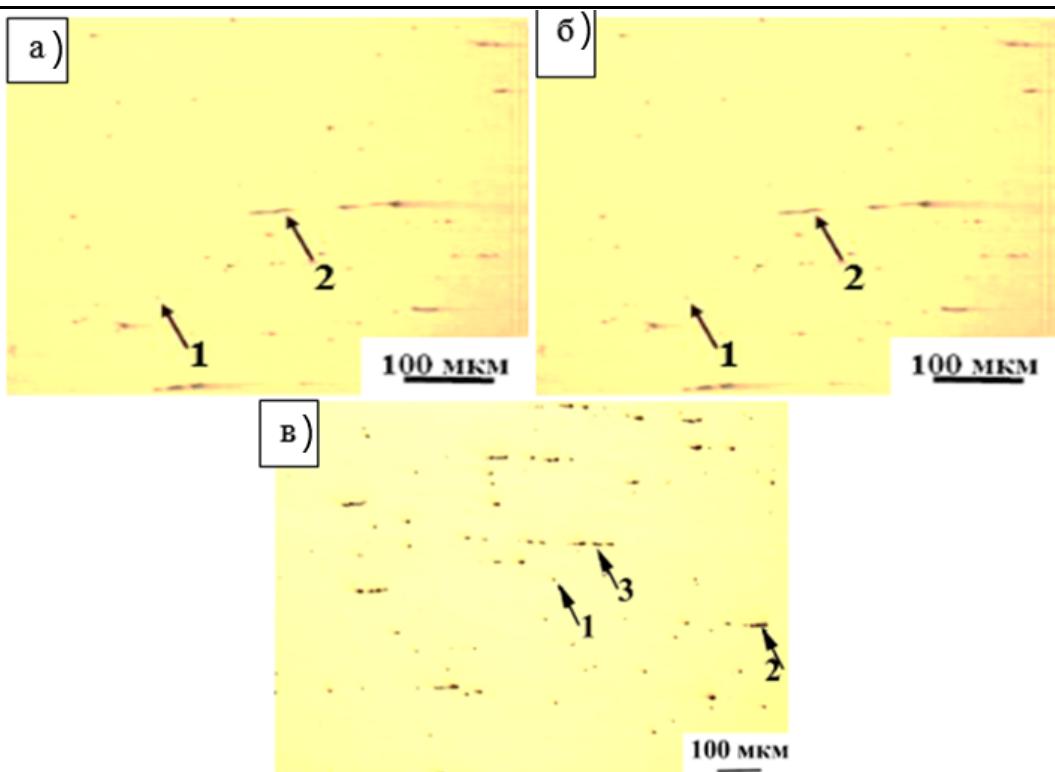


Рис. 2. Неметаллические включения сварного шва стали марки Э76ХФ образца № 0 (а), образца № 1 (б), образца № 2 (в): 1 – точечные оксиды; 2 – силикаты пластинчатые; 3 – строчечные нитриды

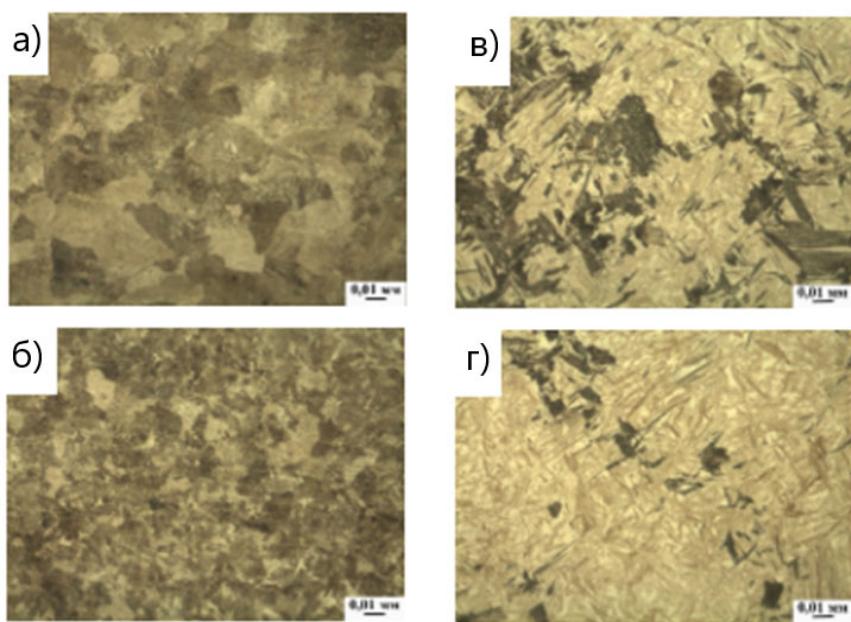


Рис. 3. Микроструктура образцов, полученная при сварке по режиму № 0 с дополнительным подводом тепла: а – основной металл > 4 мм (перлитная структура); б – зона мелкого зерна 2,8-4 мм (структура перлита различной степени дисперсности); в – зона крупного зерна 0,5-2,8 мм (игольчатый мартенсит + перлит); г – сварной шов 0-0,5 мм (игольчатый мартенсит)

Микроструктура образца стали Э76ХФ после сварки с дополнительным контактным подогревом по режиму № 1 представляет собой тонко- и мелкопластинчатый перлит с межпластинчальным расстоянием до 0,6 мкм (см. рис. 4).

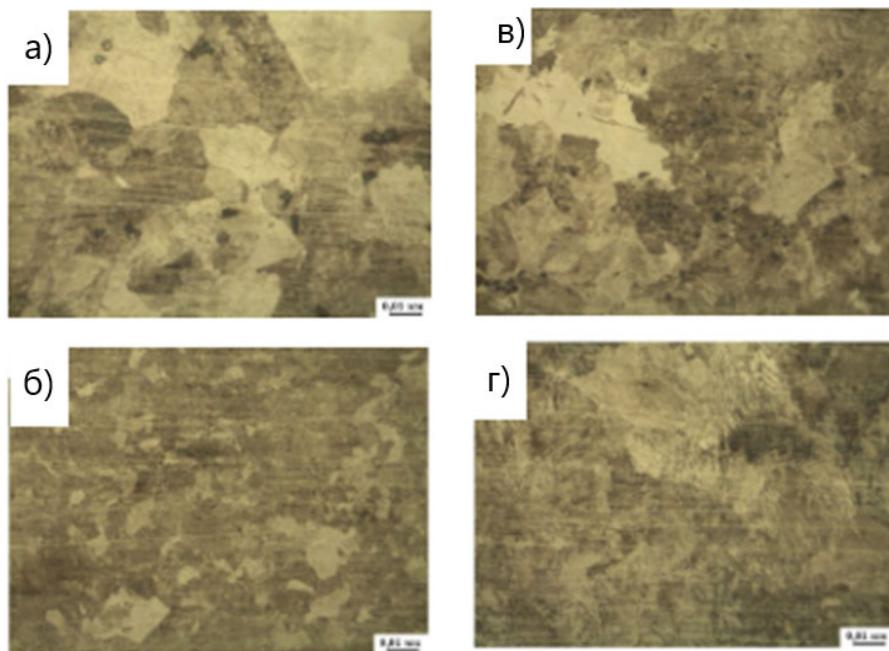


Рис. 4. Микроструктура образцов, полученная при сварке по режиму № 1 с дополнительным подводом тепла: а – основной металл  $> 5$  мм (перлитная структура); б – зона мелкого зерна 2,5-5 мм (структура перлита различной степени дисперсности); в – зона крупного зерна 0,5-2,5 мм (перлит); г – сварной шов 0-0,5 мм (перлит)

Зона термического влияния образца, полученного по режиму № 2 с применением дополнительного контактного подогрева, имеет протяжённость 5 мм (см. рис. 1, в).

Исследования неметаллических включений образца, полученного по режиму № 2, показали, что данный образец является наиболее загрязнённым неметаллическими включениями. В образце были выявлены силикаты пластинчатые (балл № 1), точечные оксиды (балл № 2) и строчечные нитриды (балл № 2) (см. рис. 2, в).

Микроструктура, представленная на рис. 5, позволила выделить в образце, полученном по режиму № 2, области, идентичные установленным на вышеупомянутых образцах:

1. сварной шов (см. рис. 5, 2);
2. зона крупного зерна (см. рис. 5, в);
3. участок мелкого зерна (нормализации) (см. рис. 5, б);
4. основной металл (см. рис. 5, а).

По результатам проведённого анализа установлено, что в сварном шве преобладает сорбичнообразный перлит. В зоне крупного зерна преобладает структура среднепластинчатого перлита. В основном металле, как и в остальном образце, преобладает перлитная структура.

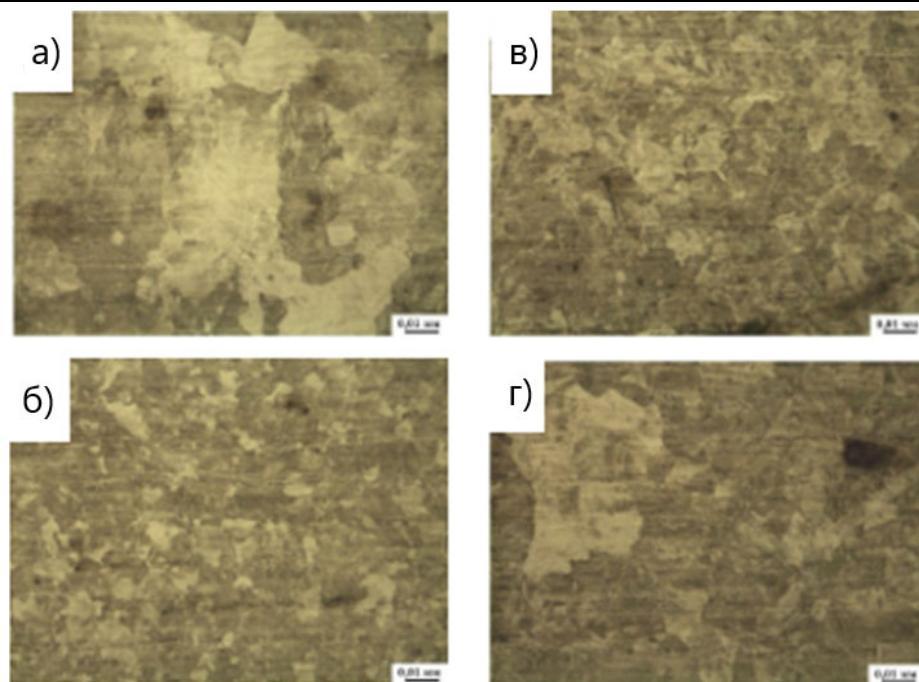


Рис. 5. Микроструктура образцов, полученная при сварке по режиму № 2 с дополнительным подводом тепла: а – основной металл  $> 5$  мм (перлитная структура); б – зона мелкого зерна 2,8-5 мм (структура перлита различной степени дисперсности); в – зона крупного зерна 0,5-2,8 мм (перлит); г – сварной шов 0-0,5 мм (пластинчатый перлит)

По результатам исследования в соответствии с ГОСТ 1778-70 было установлено, что основными типами неметаллических включений в сварных швах являются точечные оксиды, силикаты пластинчатые и строчечные нитриды. Было установлено, что режимы контактнойстыковой сварки с дополнительным подводом тепла не оказывают значительного влияния на загрязнённость образцов. На основании полученных экспериментальных данных сделан вывод, что при сварке по режиму № 0 (параметрами  $K_{\text{тр}} = 65$ ,  $U_2 = 5,76$  В,  $I_2 = 11\ 700$  А,  $\Delta_{\text{опл}} = 10$  мм,  $\Delta_{\text{ос}} = 4$  мм,  $V_{\text{опл}} = 1$  мм) образец более подвержен разрушению и образованию дефектов в сварном шве и зоне термического влияния при эксплуатации. Наилучшими параметрами контактного подогрева после сварки с точки зрения полученной микроструктуры и протяжённости зоны термического влияния являются параметры, использованные в режиме № 1 (режим контактного подогрева: время охлаждения после осадки 25 с, время подогрева 0,6 с, время охлаждения после подогрева 10 с, количество импульсов подогрева 4 с). Этот режим даёт возможность получить сварное соединение из рельсовой стали типа Р65 марки Э76ХФ в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685-2013 по структуре.

## ЛИТЕРАТУРА

- Генкин, И. З. Сварные рельсы и стрелочные переводы / И. З. Генкин. – М.: Интекст, 2003. – 93 с.
- Исследование структуры сварного соединения рельсовой стали марки Э76Х при различных параметрах изотермической выдержки / К. А. Бутакова [и др.] // Вестник горно-металлургической секции Российской академии наук. Отделение металлургии. – 2018. – № 41. – С. 221-224.
- Бахматов, П. В. Влияние режимов лазерной сварки тонкостенных конструкций на структуру и свойства сварных соединений из нержавеющих сталей / П. В. Бахматов, Н. О. Плетнев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № III-1(39). – С. 81-95.



Григорьев В. В., Муравьев В. И., Бахматов П. В.  
V. V. Grigoriev, V. I. Muravyev, P. V. Bakhmatov

## ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ НЕРАЗЪЁМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СИЛОВЫХ ТИТАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ

### CHANGES IN THE PROPERTIES OF PERMANENT JOINTS DEPENDING ON THE MANUFACTURING PROCESSES OF LARGE-SIZE POWER TITANIUM STRUCTURES OF AIRCRAFT MADE BY ELECTRON BEAM WELDING

**Григорьев Владимир Владимирович** – аспирант кафедры «Авиастроение», заведующий лабораториями факультета машиностроительных и химических технологий Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. 8(914)183-02-99. E-mail: grigorev.vlv@gmail.com.

**Vladimir V. Grigoriev** – Post-graduate Student, Aircraft Engineering Department, Head of Laboratories at the Faculty of Mechanical Engineering and Chemical Technologies, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel. 8(914)183-02-99. E-mail: grigorev.vlv@gmail.com.

**Муравьев Василий Илларионович** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник управления научно-исследовательской деятельностью Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: vmuravyev@mail.ru.

**Vasily I. Muravyev** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Research Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin str., 27. E-mail: vmuravyev@mail.ru.

**Бахматов Павел Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии сварочного и металлургического производства Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: mim@knastu.ru.

**Pavel V. Bakhmatov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Welding and Metallurgical Production Technology, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

**Аннотация.** В настоящей работе представлены результаты оценки влияния технологических процессов на свойства неразъёмных соединений, выполняемых электронно-лучевой сваркой титановых сплавов. Установлено, что доминирующее влияние на образование субмикропористости оказывает наличие в приповерхностном слое капиллярно-конденсированных загрязнений. Определено, что термическая обработка за короткий промежуток времени позволяет получить удовлетворительные прочностные свойства и, соответственно, минимизировать дефектность неразъёмных соединений, выполняемых сваркой.

**Summary.** This paper presents the results of evaluating the impact of technological processes on the properties of permanent joints performed by electron beam welding of titanium alloys. It was found that the dominant influence on the formation of submicroporosity is exerted by the presence of capillary-condensed mud in the near-surface layer. It is determined that heat treatment in a short period of time allows you to obtain satisfactory strength properties and, accordingly, minimize the defects of permanent joints performed by welding.

**Ключевые слова:** титановые сплавы, термическая обработка, неразъёмные соединения, механические свойства, электронно-лучевая сварка, силовые конструкции, фазовые превращения.

Григорьев В. В., Муравьев В. И., Бахматов П. В.

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ НЕРАЗЪЁМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СИЛОВЫХ ТИТАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ

**Key words:** titanium alloys, heat treatment, permanent joints, mechanical properties, electron beam welding, power structures, phase transformations.

УДК 621.791.722

Титановые сплавы широко используются для изготовления ответственных изделий авиационной техники (передних кромок крыла, стабилизатора, элеронов), а также для создания силового набора фюзеляжа и крыла оперения [1]. Удовлетворительная свариваемость титана и его сплавов открывает широкую перспективу для создания неразъёмных соединений (НС), выполненных электронно-лучевой сваркой силовых конструкций летательных аппаратов (ЛА) [2].

На сегодняшний день существенным недостатком образования неразъёмных соединений сваркой титановых сплавов является появление различных дефектов, в основном пор, достигающих в диаметре более 50 нм. При этом их наличие приводит к существенному снижению механических свойств [3].

Целью данной работы является оценка воздействия технологических процессов на качество образования неразъёмных соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой, и изменения их свойств в зависимости от образования специфических дефектов, присущих данному виду сварки.

Для исследования применялись титановые темплеты из сплавов BT20 и BT23, соответствующие максимальному количеству дефектов, выявленных в процессе серийного производства силовых титановых конструкций. Подготовку и сборку образцов производили по традиционной технологии. После подготовительных операций производили электронно-лучевую сварку в установке КЛ-144 с последующим визуальным контролем и раскроем темплетов для проведения радиографического и разрушающего контроля. В последующем была выполнена термическая обработка по традиционной технологии (в вакуумной печи УВН 1500 отжиг при 750 °C в течение 30 мин, старение в течение 10 ч при температуре 550 °C) и экспериментальной (в печи сопротивления Graficabro при температуре 980 °C выдержка образцов в течение 15, 30, 60, 90, 120 с).

Установлено, что наличие в приповерхностном слоестыкуемых кромок капиллярно-конденсированной влаги приводит в процессе сварки к образованию субмикропор в зоне сплавления и пор в структуре неразъёмного соединения. Наличие цепочек субмикропор в зоне сплавления фиксируется на радиографических снимках виде тёмных полос, при этом их наличие приводит к снижению прочностных свойств и к отсутствию таких характеристик, как удлинение и сужение.

Исследованиями термической обработки неразъёмных соединений в температурном интервале фазовых превращений установлено, что скоростной нагрев сварного шва титанового сплава позволяет за короткий промежуток времени (90...120 с) полностью завершить процесс фазового превращения и улучшить механические свойства по сравнению со свойствами основного металла. При этом выявлена стадийность процесса фазового превращения в неразъёмных соединениях титановых сплавов (см. рис. 1).

Образование субмикропустот вызвано недостаточной энергией электронного луча за счёт частичного плавления по границам зёрен из-за различия диффузионных процессов.

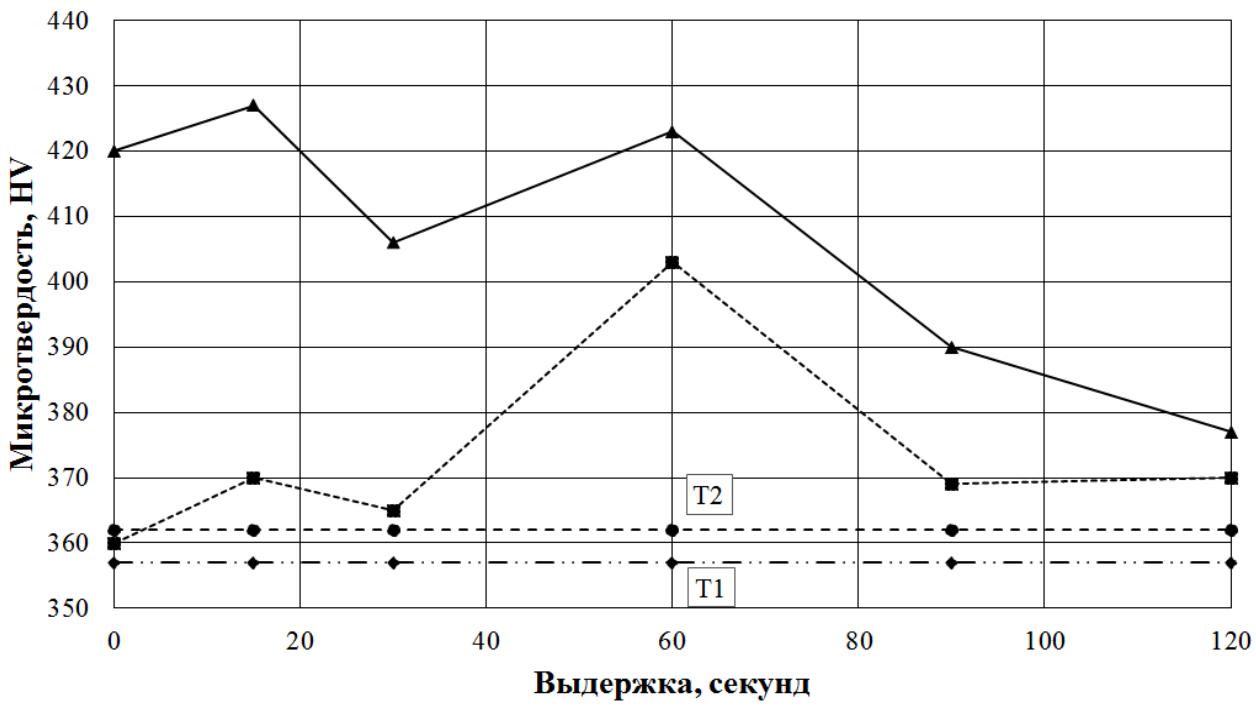


Рис. 1. Кинетика изменения микротвёрдости сварного шва образцов из сплава ВТ20 в зависимости от режимов ЭЛС и термообработки: Т1 – термическая обработка по режиму 650 °C, 2 ч, воздушная электропечь; Т2 – 750 °C, 30 мин в вакуумной печи; —▲— – микротвёрдость металла шва; -·---■--- – микротвёрдость металла околошовной зоны

Наиболее перспективным способом в области исключения специфических дефектов может служить осцилляция электронного луча в процессе образования неразъёмного соединения с выявлением условий существования жидкокометаллической ванны [4], а также минимизация капиллярно-конденсированной влаги в приповерхностном и поверхностных слоях стыкуемых кромок при использовании форсированных режимов механической обработки фрезерованием [5].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Эффективность применения титана и его сплавов в авиастроении / А. Г. Братухин, В. И. Муравьев, Б. И. Долотов и др. // Авиационная промышленность. – 1997. – № 4. – С. 3-9.
2. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блащук и др.; под ред. В. Н. Замкова. – 2-е изд., доп. и перераб. – Киев: Наукова думка, 1986. – 240 с.
3. Григорьев, В. В. Исследование влияния дефектов электронно-лучевой сварки на процессы разрушения титановых сплавов / В. В. Григорьев, В. И. Муравьев, П. В. Бахматов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2020. – № 3. – С. 23-34.
4. Осцилляция электронного луча как средство улучшения формирования корня сварного шва и облегчения контроля сквозного проплавления при электронно-лучевой сварке / С. В. Варушкин, В. Я. Беленыйский, Н. А. Зырянов, А. А. Кылосов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2017. – Т. 19, № 2. – С. 151-159.
5. Саблин, П. А. Динамика сил резания при высокоскоростном фрезеровании / П. А. Саблин, К. А. Жигалкин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № II-1 (38). – С. 41-49.

**Иванкова Е. П.**

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ  
И СТРУКТУРЫ МНОГОСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

**Иванкова Е. П.**

**E. P. Ivankova**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУРЫ МНОГОСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ**

### **MODELING AND OPTIMIZATION OF CHOOSING PROPERTIES OF MATERIALS AND STRUCTURE OF MULTILAYER SHELL SHAPES BY MELT-OUT MODELS**

**Иванкова Евгения Павловна** – старший преподаватель кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: jenyvany@mail.ru.

**Evgenia P. Ivankova** – Senior Lecturer, Industrial Electronics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: jenyvany@mail.ru.

**Аннотация.** Представлена математическая модель процесса оптимизации выбора материала многослойной оболочковой формы, обладающего наибольшей сопротивляемостью к трещинообразованию при заливке её жидким металлом. С помощью математического эксперимента проведено исследование морфологического строения оболочковой формы. Рассмотрена оболочковая форма из пяти слоёв. Скорректированная система уравнений позволяет учитывать свойства слоёв, выполненных из разных материалов. Осуществлены расчёты, когда слой оболочковой формы из материала, найденного оптимизацией, занимает различные положения в сечении формы; при этом остальные слои формы изготовлены из традиционной керамики. Найдено оптимальное местоположение этого слоя. Показано, что наличие нескольких слоёв с найденными свойствами не влияет на повышение трещиностойкости оболочковой формы.

**Summary.** A mathematical model of the process of optimizing the choice of material for a multilayer shell mold, which has the highest resistance to cracking when it is filled with liquid metal, is presented. A mathematical experiment was used to study the morphological structure of the shell form. A shell form of five layers is considered. The adjusted system of equations allows one to take into account the properties of layers made of different materials. Calculations have been made when the shell mold layer from the material found by optimization occupies different positions in the mold section; the rest of the mold layers are made of traditional ceramics. The optimal location of this layer has been found. It is shown that the presence of several layers with the found properties does not affect the increase in the crack resistance of the shell shape.

**Ключевые слова:** многослойная оболочковая форма, трещиностойкость, свойства материалов, напряжённое состояние материалов, деформация, температура.

**Key words:** multilayer shell mold, crack resistance, material properties, stress state of materials, deformation, temperature.

УДК 621.74.045

Работа выполнена под руководством доктора технических наук доцента Э. А. Дмитриева, при участии доктора технических наук профессора В. И. Однокова и доктора технических наук профессора А. И. Евстигнеева.

Качество фасонных отливок оценивается по таким параметрам, как точность и чистота поверхности. Причиной образования трещин в оболочковых формах (ОФ) по выплавляемым моделям (ВМ) является напряжённо-деформированное состояние (НДС) на различных этапах формообразования.

Для повышения трещиностойкости за счёт снижения НДС необходимо выделить физические параметры материала, наиболее сильно влияющие на появление трещин ОФ при её заливке

жидким металлом. Построение математической модели процесса заливки жидкого металла в ОФ позволяет найти оптимальные параметры системы и спрогнозировать возможность управления структурно-морфологическим строением ОФ.

Опубликовано большое количество теоретических и экспериментальных работ [1-4], которые посвящены исследованию НДС ОФ по ВМ, а также системы отливка – форма.

В настоящее время прорабатываются и развиваются вопросы НДС по новым модифицированным структурам ОФ и их особенностям. Именно этому вопросу и посвящена настоящая работа, а в качестве объекта исследования взята многослойная ОФ по ВМ.

В работе [5] изложены теоретические основы математического моделирования НДС ОФ по ВМ, как монослойных, так и многослойных, поэтому автор счёл обоснованным дать только анализ и результаты расчётов.

Расчётная схема задачи представлена на рис. 1 со следующими геометрическими параметрами:  $T = 5$  мм;  $H = 50$  мм;  $R_1 = 20$  мм.

Рассмотрим пятислойную ОФ (см. рис. 1), штриховкой показан внутренний слой ОФ со свойствами  $\alpha = 0,12 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ ;  $G = 2000$  кг/мм $^2$ ;  $\lambda = 0,001$  Вт/(мм $\cdot$ °C);  $C = 1350$  Дж/(кг $\cdot$ °C);  $\gamma = 4,0 \cdot 10^{-6}$  кг/мм $^3$ , остальные слои обладают следующими физическими свойствами [5]:

$$G = 2960 \text{ кг/мм}^2; \alpha = 0,51 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}; \\ \lambda = 0,000\,812 \text{ Вт/(мм}\cdot\text{°C)}; C = 840 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}; \gamma = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ кг/мм}^3. \quad (1)$$

Исходная система уравнений будет аналогична системе монослойных ОФ [5] с той лишь разницей, что уравнения будут записаны со своими физическими параметрами по каждому слою:

$$\sigma_{ij,j} = 0; \sigma_{ij} - \sigma\delta_{ij} = 2G_p \varepsilon_{ij}^*; \varepsilon_{ij}^* = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}\varepsilon\delta_{ij}; \varepsilon = \varepsilon_{ij}; \\ \varepsilon_{ij} = 3k_p^t \sigma + 3\alpha_p^t (\theta_n - \theta_p^*); \varepsilon_{ij} = 0,5(U_{i,j} + U_{j,i}); \dot{\theta} = \bar{\alpha}_2 \Delta\theta; \quad (2) \\ (i, j = 1, 2, 3),$$

где  $\sigma_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) – компоненты тензора напряжений;  $U_i$  – перемещения;  $\varepsilon_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) – компоненты тензора упругих деформаций;  $\sigma$  – гидростатическое напряжение;  $G_p$  ( $p = 2, 3$ ) – модуль сдвига; при  $p = 2$  – металла,  $p = 3$  – слоистой формы, причём  $G_3 = \{G_3^t\}$ , где  $t$  – номер слоя;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $k_p^t$  – коэффициент объёмного сжатия;  $\alpha_p^t$  – коэффициент линейного расширения в области (III) в слое ( $t$ );  $\bar{\alpha}_p$  – коэффициент температуропроводности в области ( $p$ ),  $p = 1, 2$ ;  $\theta_n$  – текущая температура;  $\theta_p^*$  – начальная температура в области ( $p$ ).

Решение системы уравнений (2) [5] осуществляется с теми же начальными и граничными условиями, что и ранее, с использованием численных методов, описанных в работе [6].

В настоящей работе проведены расчёты разливки металлов в ОФ, в которой характеристики физических свойств некоторых слоёв соответствуют найденным ранее в работе [5].

Результаты теоретических расчётов приведены на рис. 2-4.

При найденном значении  $\alpha = 0,12 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$  было принято:  $G = 8000$  кг/мм $^2$ ;  $a^* = 0,2$  мм $^2/\text{с}$ . То есть взяты более жёсткие

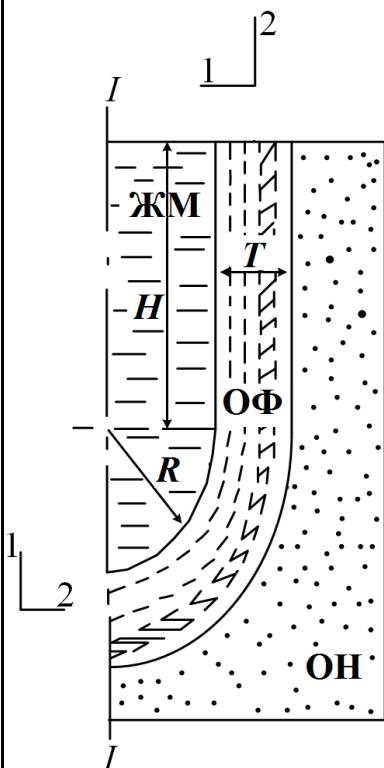


Рис. 1. Схема пятислойной оболочковой формы в меридиальном сечении с учётом осевой симметрии:

ЖМ – жидкий металл;  
ОФ – оболочковая форма;  
ОН – опорный наполнитель

параметры по модулю сдвига (верхняя граница). Если ОФ с такими параметрами слоя выдержит, то при использовании слоя с меньшим значением  $G$  – тем более.

По результатам теоретических расчётов получено, что наиболее рационально параметрами  $G = 8000 \text{ кг}/\text{мм}^2$ ;  $a^* = 0,2 \text{ мм}^2/\text{с}$  должен обладать слой, примыкающий к наружному слою ОФ.

На рис. 2 приведены эпюры  $\sigma_{22}$  при разливке алюминия в холодную форму (сплошными линиями показаны эпюры  $\sigma_{22}$  при разливке алюминия в монослойную форму со свойствами (1), пунктирными – эпюры  $\sigma_{22}$  при разливке в пятислойную ОФ со свойствами  $G = 8000 \text{ кг}/\text{мм}^2$ ;  $a^* = 0,2 \text{ мм}^2/\text{с}$ .

Свойства алюминия:  $\theta_m = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\alpha = 26,5 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ ;  $\lambda = 0,23 \text{ Вт}/(\text{мм} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ ;  $L = 397 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}$ ;  $G = 4000 \text{ кг}/\text{мм}^2$ ;  $\gamma = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ кг}/\text{мм}^3$ .

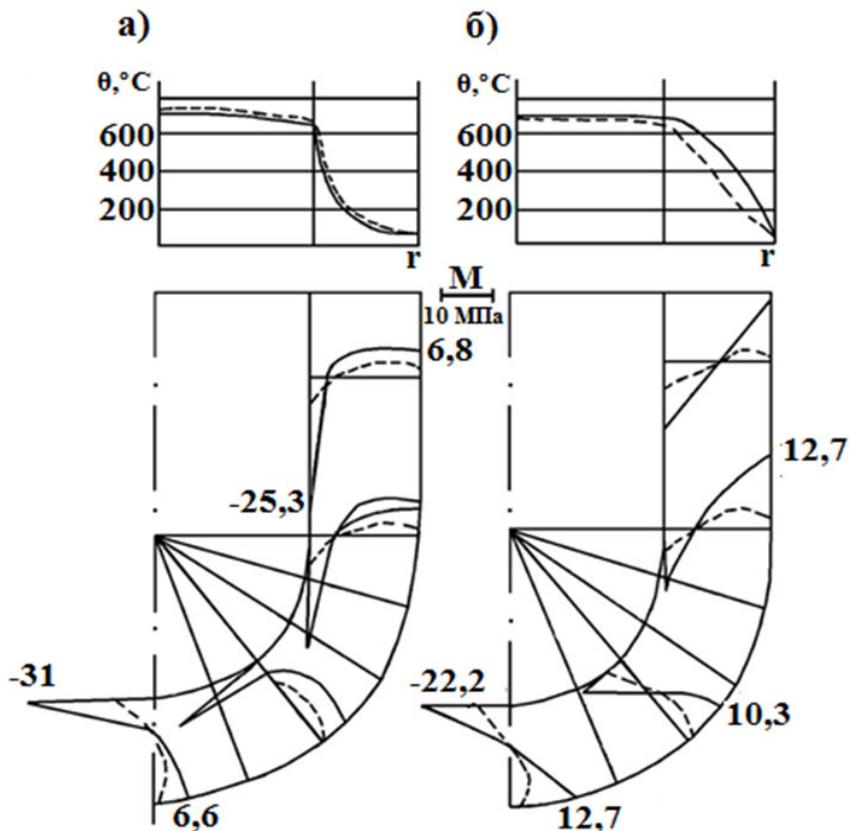


Рис. 2. Эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  по толщине оболочковой формы при заливке алюминия в холодную форму: а – при  $\tau_{\text{окл}} = 0,45 \text{ с}$ ; б – при  $\tau_{\text{окл}} = 2,62 \text{ с}$

Видно, что при разливке алюминия в традиционную форму может произойти её разрушение по сжимающим напряжениям  $\sigma_{22} = 31 \text{ МПа}$  уже через 0,45 с.

Пятислойная ОФ, характеризуемая свойствами  $G = 8000 \text{ кг}/\text{мм}^2$ ;  $a^* = 0,2 \text{ мм}^2/\text{с}$ , выдерживает нагрузку без разрушения.

На рис. 3 представлены результаты разливки стали в горячую форму ( $\theta_\phi = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Наибольшие растягивающие напряжения  $\sigma_{22}$  при использовании традиционной формы (сплошные линии на рис. 3) составляют 21,8 МПа при  $\tau = 24 \text{ с}$ , а в пятислойной ОФ (пунктирные линии на рис. 3)  $\sigma_{22} = 5,3 \text{ МПа}$  в срединном сечении цилиндрической части. Видим, что разрушений в обоих случаях нет, но пятислойная ОФ работает значительно надёжнее.

На рис. 4 представлены значения  $\sigma_{22}$  при разливке стали в холодную форму. Традиционная форма разрушается (сплошные линии), а пятислойная ОФ со слоем, свойства которого  $G = 8000 \text{ кг}/\text{мм}^2$ ;  $a^* = 0,2 \text{ мм}^2/\text{с}$ , выдерживает нагрузку без разрушения. Наибольшие значения

напряжений  $\sigma_{22}$  в традиционной форме на оси симметрии при  $\tau = 1,65$  с составляют 52 МПа. Напряжения  $\sigma_{22}$  в цилиндрической части при  $\tau = 18,65$  с составляют 25 МПа, а при наличии слоя со свойствами  $G = 8000$  кг/мм<sup>2</sup>;  $a^* = 0,2$  мм<sup>2</sup>/с значения  $\sigma_{22}$  невелики, значит, при этом ОФ тоже не разрушается. Напряжения  $\sigma_{22}$  на оси симметрии при  $\tau = 1,65$  с составляют 14,3 МПа, в срединном сечении цилиндрической части при  $\tau = 1,65$  с  $\sigma_{22} = 6,7$  МПа (здесь приведены максимальные значения  $\sigma_{22}$  по абсолютной величине).

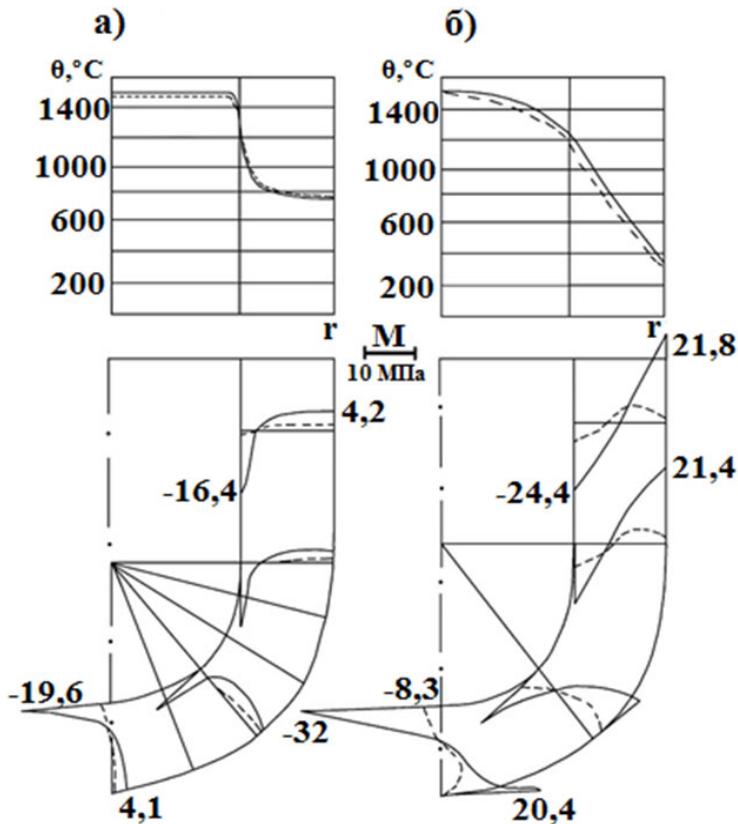


Рис. 3. Эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  по толщине оболочковой формы при заливке стали в горячую форму: а – при  $\tau_{\text{охл}} = 0,25$  с; б – при  $\tau_{\text{охл}} = 34$  с

При этом прослеживаются определённые закономерности. При разливке алюминия в традиционную форму (см. рис. 2) сжимающие напряжения  $\sigma_{22}$  достигают наибольшей величины с внутренней поверхности ОФ, а растягивающие напряжения – с наружной. Сжимающие напряжения достигают наибольшей величины уже при  $\tau = 0,45$  с, а растягивающие напряжения  $\sigma_{22}$  увеличиваются до  $\tau = 26,2$  с.

По внутренней образующей ОФ сжимающие напряжения имеют наибольшие значения в осевом сечении, уменьшаются в цилиндрической части ОФ. Растягивающие напряжения  $\sigma_{22}$  на наружной поверхности ОФ имеют примерно одну и ту же величину, изменяясь только во времени (см. рис. 2).

Сжимающие напряжения  $\sigma_{22}$  формы со слоем (см. рис. 1) имеют тот же характер, что и сжимающие напряжения в традиционной форме, но в 3-4 раза меньше по абсолютной величине, а растягивающие напряжения  $\sigma_{22}$  достигают своего максимального значения внутри сечения, ближе к середине, они примерно одинаковы по образующей и увеличиваются во времени.

При разливке стали в горячую (см. рис. 3) и холодную (см. рис. 4) формы качественная тенденция распределения напряжений  $\sigma_{22}$  примерно сохраняется, но значения сильно меняются. Сжимающие напряжения по внутренней образующей для всех форм увеличиваются во времени, достигая максимума при  $\tau = 34$  с (разливка стали в горячую форму (см. рис. 3)) и при  $\tau = 18,6$  с

(разливка стали в холодную форму (см. рис. 4)). Растягивающие напряжения  $\sigma_{22}$  также увеличиваются во времени по внешней образующей при использовании традиционной формы и в середине сечения при использовании формы со слоем.

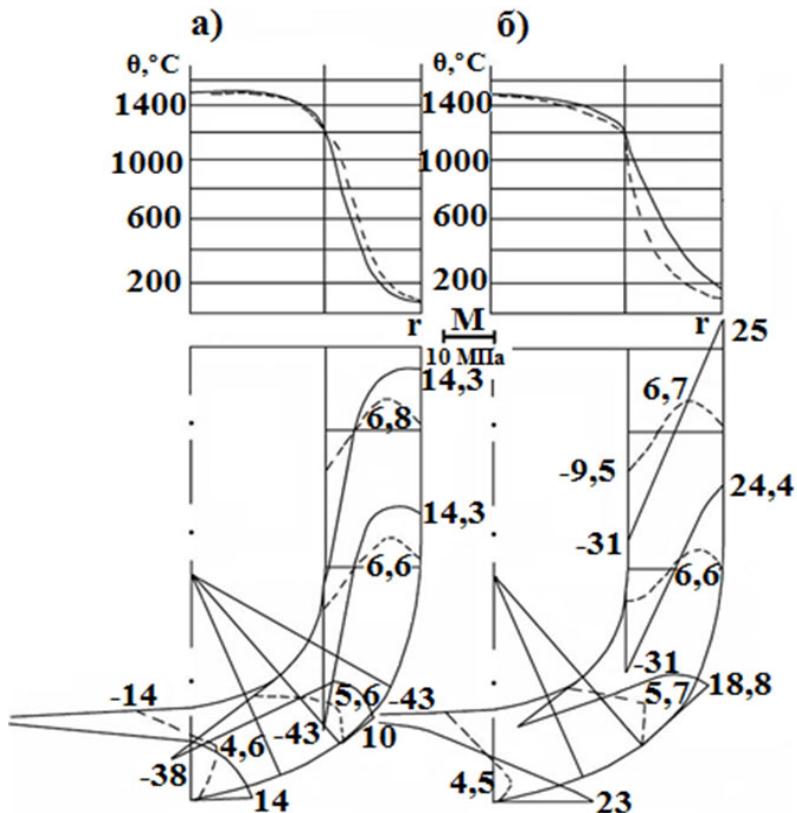


Рис. 4. Эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  по толщине оболочковой формы при заливке стали в холодную форму: а – при  $t_{\text{окл}} = 1,65$  с; б – при  $t_{\text{окл}} = 18,65$  с

Таким образом, проведённые теоретические исследования показывают, что многослойная ОФ, изготовленная из керамического материала, обладающего физическими свойствами (1) со слоем вблизи наружной поверхности с физическими свойствами  $G = 8000 \text{ кг/мм}^2$ ,  $a^* = 0,2 \text{ мм}^2/\text{с}$  при  $\alpha = 0,12 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$  вполне пригодна для разливки любого металла.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Литьё по выплавляемым моделям / В. Н. Иванов, С. А. Казеннов, Б. С. Курчман и др.; под ред. Я. И. Шкленника и В. А. Озерова. – М.: Машиностроение, 1984. – 408 с.
2. Математическое моделирование напряжённо-деформированного состояния оболочковых форм по выплавляемым моделям: монография / А. И. Евстигнеев, В. И. Одноков, В. В. Петров, Э. А. Дмитриев. – Владивосток: Дальнаука, 2009. – 140 с.
3. Напряжённо-деформированное состояние оболочковых форм в литье по выплавляемым моделям / И. Г. Сапченко, С. А. Некрасов, С. Г. Жилин, М. В. Штерн. – Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, 2005. – 156 с.
4. Савинов, А. С. Методические основы оценки и прогнозирования напряжённо-деформированного состояния системы «отливка-форма» для предупреждения образования горячих трещин в фасонных отливках: автореф. д-ра техн. наук / Савинов Александр Сергеевич. – Магнитогорск, 2016. – 42 с.
5. Моделирование и оптимизация выбора свойств материалов и морфологического строения структуры оболочковых форм по выплавляемым моделям / В. И. Одноков, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев и др. // Чёрная металлургия. – 2020. – № 9. – С. 742–754.
6. Математическое моделирование сложных технологических процессов / В. И. Одноков, Б. Г. Каплунов, А. В. Песков, А. В. Баков. – М.: Наука, 2008. – 176 с.



**Бахматов П. В., Фролов А. В., Кравченко А. С.**  
**P. V. Bakhmatov, A. V. Frolov, A. S. Kravchenko**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНИКИ МАНИПУЛИРОВАНИЯ РАБОЧИМ ТОРЦОМ ЭЛЕКТРОДА ПРИ TIG СВАРКЕ НА КАЧЕСТВО ФОРМИРОВАНИЯ ШВА

### RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE TECHNIQUE OF HANDLING THE WORKING END OF THE ELECTRODE DURING TIG WELDING ON THE SEAM FORMATION QUALITY

**Бахматов Павел Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии сварочного и металлургического производства Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

**Pavel V. Bakhmatov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Welding and Metallurgical Production Technology, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

**Фролов Алексей Валерьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

**Aleksey V. Frolov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

**Кравченко Александр Сергеевич** – аспирант кафедры технологии сварочного и металлургического производства Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

**Aleksandr S. Kravchenko** – Post-Graduate Student, Welding and Metallurgical Production Technology Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

**Аннотация.** Представлены результаты анализа техник выполнения сварных соединений ручной аргонодуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом (TIG) с присадкой. Рассмотрены различные манипуляции рабочим торцом электрода и присадочным прутком, способствующие получению оригинального рисунка поверхности формирующегося валика.

**Summary.** The results of the analysis of the techniques for making welded joints in manual argon-arc welding with a non-consumable tungsten electrode (TIG) with an additive are presented. Various manipulations with the working end of the electrode and the filler rod, contributing to the obtaining of the original pattern of the surface of the forming bead, are considered.

**Ключевые слова:** дуговая сварка, техника выполнения, манипуляции, дуга, форма валика.

**Key words:** arc welding, execution technique, manipulation, arc, bead shape.

УДК 621.791.3/.8

Работа выполнена за счёт средств ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» при поддержке НИР «Разработка алгоритма и исследование процесса программируемого управления формированием сварочного/наплавочного валика (в том числе и в применении аддитивных технологий) на установке автоматической сварки в защитных газах» (приказ № 170-«О» от 04 июня 2020 г.).

**Введение.** Дуговая сварка, найдя себе широкое применение практически во всех отраслях народного хозяйства, стала рутинным процессом. Казалось бы, всё в этом процессе изучено и известно, но практически ежегодно публикуется множество статей, посвящённых улучшению сварочных материалов, оборудования, оснастки, техники и технологии процедуры сварки. Авторы статьи хотели внести свою лепту в развитие последнего.

Управлять формированием валика можно по-разному: либо импульсно подавать сварочную проволоку (вводить и выводить из зоны действия дуги, при этом важным аспектом является сохранение обдува торца проволоки защитным газом во избежание его окисления, так как при невыполнении этого требования формирование валика может нарушиться) при непрерывном прямолинейном движении дуги (возможно, с незначительным возвратно-поступательным движением в направлении сварки), либо использовать колебательные движения горелки при постоянной подаче сварочной проволоки. В первом варианте при равномерной амплитуде движения сохраняется постоянный дуговой зазор и образуются чередующиеся (наложенные друг на друга) чешуйки, как показано на рис. 1.

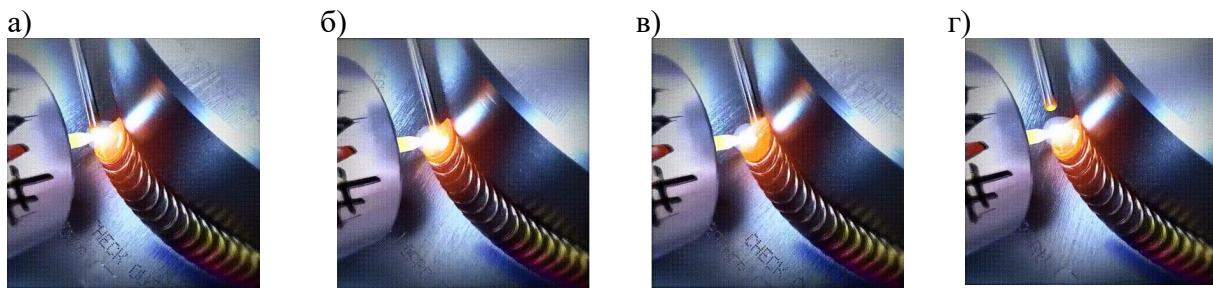


Рис. 1. Вид шва, формируемого при непрерывном прямолинейном движении дуги с импульсной подачей сварочной проволоки: а – момент введения проволоки в верхнюю часть ванны; б – смещение проволоки в центральную часть ванны; в – смещение проволоки в нижнюю часть ванны; г – момент вывода проволоки

Как показал анализ литературы, посвящённой технике сварки, движению рабочего торца электрода при дуговой сварке уделяется весьма незначительное влияние. Это касается как ручных, механизированных (полуавтоматических), так и автоматических способов дуговой сварки.

Вместе с тем всё больше пользователей социальных сетей (профессиональные сварщики) пропагандируют различные методики колебательных движений, в значительной степени улучшающих внешний вид шва и упрощающих манипулирование горелкой/держаком. К таким методикам можно отнести движения, называемые «бабочка» (американка). Этот метод основан на обкатывании керамическим соплом аргонодуговой горелки чешуек сформированного сварного шва, при этом сварщик манипулирует горелкой, делая движения, напоминающие восьмёрку (см. рис. 2). При применении метода сварщик не утруждает себя удержанием постоянного дугового зазора, а движение горелки с постоянной амплитудой гарантирует равномерность геометрических параметров сварного шва (см. рис. 3).

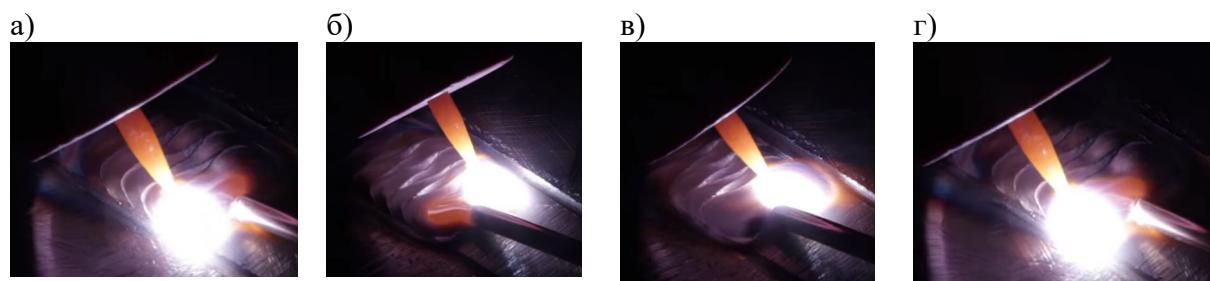
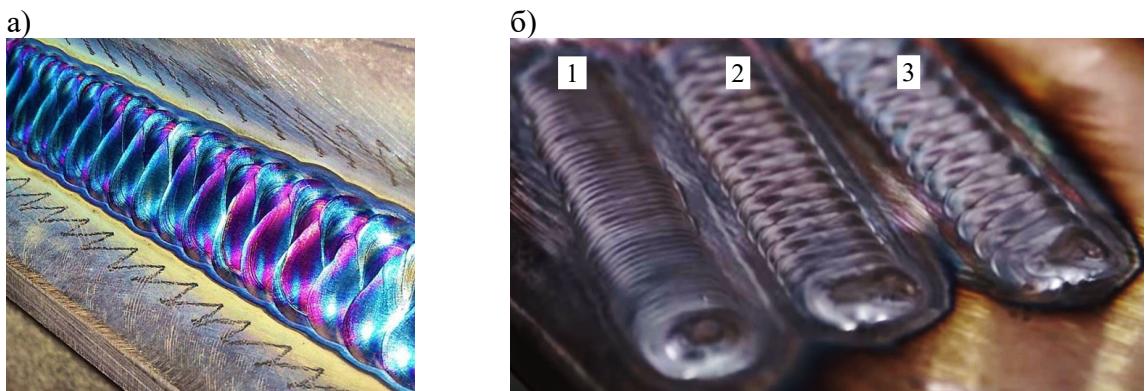


Рис. 2. Последовательность выполнения шва, формируемого при непрерывной подаче сварочной проволоки и колебательном поперечном движении дуги: а – крайнее правое положение дуги; б – крайнее левое положение дуги; в – возврат в крайнее правое положение дуги; г – повторное крайнее правое положение дуги



Рис. 3. Манипуляция положением горелки: а – крайнее левое; б – среднее; в – крайнее правое

Из рис. 4, *a* видны характерные следы, расположенные рядом со швом, оставляемые керамическим соплом. Размер чешуйки зависит от скорости манипулирования положением горелки – при медленном перемещении чешуйки крупнее, при весьма быстром – мельче (см. рис. 4, *b*).



1 – большая скорость; 2 – средняя скорость; 3 – низкая скорость

Рис. 4. Сварной шов, полученный методом «бабочка» (а)  
на различных скоростях манипулирования (б)

**Традиционный метод [1].** Сварочная горелка располагается под углом 60...80° к поверхности заготовки (движение горелки углом вперёд) и удерживается сварщиком на весу с обязательным контролем длины дуги 1...1,5 мм. Рабочий торец сварочной проволоки удерживается в фронтовой зоне сварочной ванны и по мере приближения дуги ею оплавляется. Угол ввода сварочной проволоки 30...45°. Горелка движется по стыку с постоянной скоростью, при этом возможны незначительные спиралевидные колебательные движения, в большей степени предназначенные для достижения ванной нужной ширины (см. рис. 5). При значительных амплитудах поперечных движений возможны подрезы.

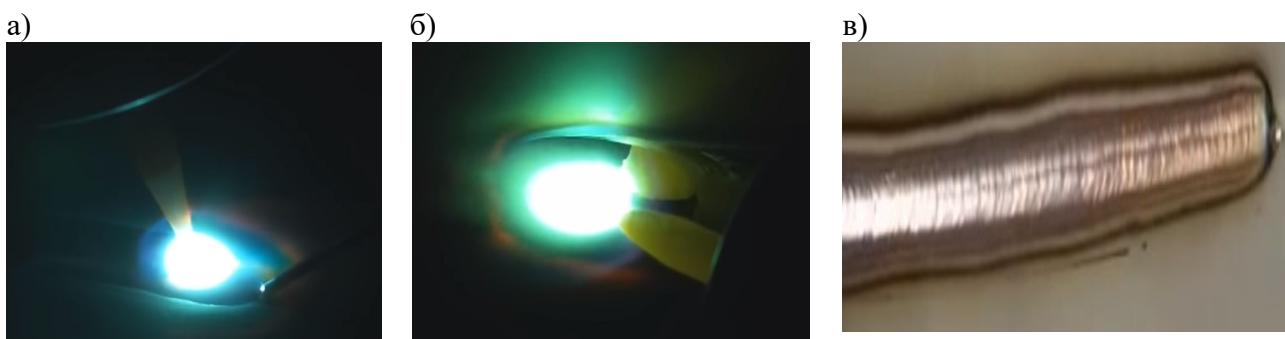


Рис. 5. Схема осуществления стыкового соединения (а), углового соединения (б) и шов, полученный по традиционному методу (угловое соединение) (в)

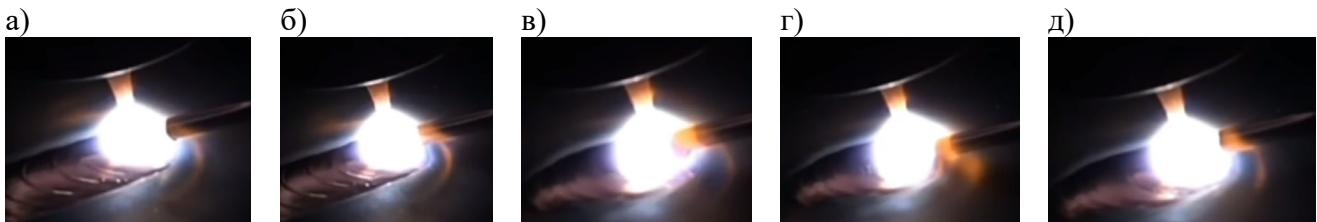


Рис. 6. Последовательность выполнения шва по методу «Капля в ванну»:  
а – перемещение дуги на позицию; б – прогрев сварочной проволоки; в – образование жидкой капли; г – сброс капли в ванну; д – переход дуги на следующую позицию

**Метод «Капля в ванну» [1].** Этот метод основан на точном и дозированном введении сварочной проволоки в виде жидкой капли в сварочную ванну при шаговом позиционировании перемещения дуги. При этом методе рабочий торец сварочной проволоки находится в непосредственной близости с дугой (горелка установлена под углом 75...90° к поверхности заготовки) и в нужный момент оплавляется ею. Упавшая в расплавленную ванну капля образует характерный буртик чешуйки, а сварочная ванна перемещается по стыку на следующую позицию (см. рис. 6). Внешний вид валика, сформированного по методу «Капля в ванну», показан на рис. 7.

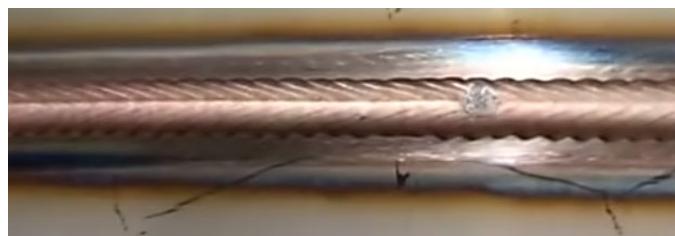


Рис. 7. Сформированный валик

**Метод «Чешуя» [1].** Метод нашёл применение при сварке тонкостенных нержавеющих конструкций и не гарантирует провара. Сварка ведётся на значительных скоростях и ампераже.

Метод заключается в образовании сварочной ванны путём прогрева металла соединяемых кромок дугой. При этом торец керамического сопла опирается на поверхность заготовки, а угол наклона неплавящегося электрода к поверхности детали составляет 35...45°. Далее следует перемещение дуги в фронтовую часть ванны и дозированная подача в расплавленную ванну сварочной проволоки (капля). Перемещение горелки осуществляется с отрывом (приподниманием на 1...2 мм) торца керамического сопла от поверхности заготовки. Через некоторое время (после прогрева для достижения ванной необходимой ширины) сварщик перемещает дугу на следующую позицию (см. рис. 8). Далее действия повторяются. Как видно из рис. 9, шов выглядит достаточно оригинально, имеет крупную концентрическую чешую.

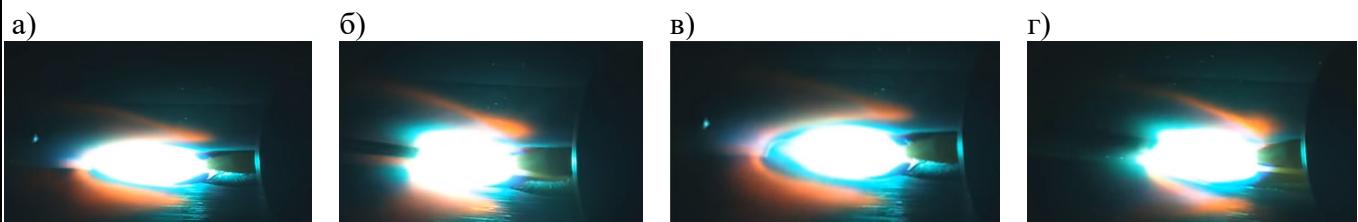


Рис. 8. Последовательность выполнения шва по методу «Чешуя»:  
а – образование сварочной ванны; б – введение сварочной проволоки; в – прогрев для достижения ванной необходимой ширины; г – перемещение дуги на следующую позицию

Вместе с тем в отечественной литературе приводятся данные по поперечным колебаниям электрода. Но в пояснении к их применимости даётся весьма скучная информация. Например,

поперечные колебания электрода по определённой траектории, совершаемые с постоянной частотой и амплитудой и совмещённые с перемещением вдоль шва, позволяют получить сварной шов требуемой ширины [2; 3]. Поперечные колебательные движения конца электрода определяются формой разделки, размерами и положением шва, свойствами свариваемого материала, навыком сварщика. Широкие швы ( $1,5\dots 5d$ ), получают с помощью поперечных колебаний, изображённых на рис. 10.

а)



б)



Рис. 9. Сформированный валик по методу «Чешуя»:  
а – стыковое соединение; б – угловое соединение

**Выводы.** На сегодняшний день в России отсутствует единый подход к выбору техники выполнения конкретного сварного соединения в виде одобренных технологических рекомендаций, производственных инструкций и государственных стандартов. Выбор метода манипуляции горелкой – вопрос профессионализма сварщика. Причём для удовлетворения требований нормативной документации в отношении формы и размеров сварного валика можно применять различные техники и большой диапазон параметров режима сварки (сварочный ток может быть задан в диапазоне до 100 А, а скорость сварки зачастую в технологических картах – величина справочная).

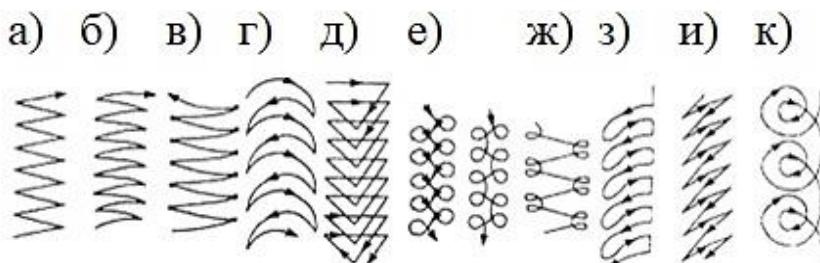


Рис. 10. Основные виды траекторий движений конца электрода  
при слабом прогреве (а, б, в, г), усиленном прогреве середины (д), свариваемых  
кромок (е, ж), усиленном прогреве одной кромки (з, и), прогреве корня шва (к)

Колебательные движения, естественно, снижают общую скорость сварки, увеличивают ширину зоны термического влияния 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.

Такая картина в судостроении, где сварка практически основной процесс в корпусостроении, скажется на точности окончательной сборки и трудоёмкости подгоночных операций при стапельной сборке. Поэтому глубокое изучение техники выполнения сварных швов при дуговой сварке является актуальной задачей современного сварочного производства.

## ЛИТЕРАТУРА

- Лысенко, Е. TIG сварка нержавееки: 4 способа сварки. К теории движений [Электронный ресурс] / YouTube. – Режим доступа: [https://www.youtube.com/watch?v=\\_UOyTlIYv-s](https://www.youtube.com/watch?v=_UOyTlIYv-s) (дата обращения: 12.10.2020).
- Овчинников, В. В. Оборудование, техника и технология сварки и резки металлов: учебник / В. В. Овчинников. – М.: КНОРУС, 2010. – 304 с.
- Овчинников, В. В. Технология электросварочных и газосварочных работ / В. В. Овчинников. – 7-е изд., стер. – М.: Академия, 2016. – 272 с.

**Красиков Н. А., Щелкунов Е. Б.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ  
В ПАКЕТАХ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Красиков Н. А., Щелкунов Е. Б.  
N. A. Krasikov, E. B. Shchelkunov**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ В ПАКЕТАХ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

### **RESEARCH OF PROCESSES OCCURRING WHEN HOLE DRILLING IN PACKAGES OF DIFFERENT MATERIALS**

**Красиков Николай Анатольевич** – студент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kolya.97-05@mail.ru.

**Nikolai A. Krasikov** – Student, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kolya.97-05@mail.ru.

**Щелкунов Евгений Борисович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktm@knastu.ru.

**Evgeny B. Shchelkunov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktm@knastu.ru.

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментального исследования процессов, происходящих в месте сочленения слоёв пакета разнородных материалов при сверлении в нём отверстий.

**Summary.** The paper presents the results of an experimental study of the processes occurring at the junction of the layers of a package of dissimilar materials when drilling holes in it.

**Ключевые слова:** сверление, отверстие, пакет разнородных материалов, стружка.

**Key words:** drilling, hole, package of dissimilar materials, chips.

УДК 621.9.05

**Введение.** В настоящее время в самолётостроении часто возникает необходимость обработки отверстий одновременно в двух и более деталях из разных по свойствам материалов, собранных в пакет. Данный способ обработки достаточно производителен и позволяет обеспечить точное совпадение осей отверстий. Однако обработка отверстий в пакетах разнородных материалов связана с технологическими сложностями, вызванными существенно различной обрабатываемостью материалов, составляющих пакет.

Целью работы является исследование процессов, происходящих при сверлении, в месте сопряжения слоёв пакета, составленного из существенно различных по обрабатываемости материалов.

**Методика исследования.** Для исследования были составлены пакеты, состоящие из существенно различных по обрабатываемости материалов: алюминиевого сплава марки Д16Т (пластина толщиной 5 мм) и титанового сплава марки BT22 (пластина толщиной 5 мм) в следующих сочетаниях:

1. Слой титанового сплава, слой алюминиевого сплава;
2. Слой титанового сплава, слой картона толщиной 2 мм, слой алюминиевого сплава.

Слои пакета скреплялись болтами через отверстия в углах пластин, составляющих слои. При этом добивались максимально плотного прилегания слоёв.

Исследование проводилось при сверлении отверстий в пакете свёрлами из твёрдого сплава НАМ 304/30-1081 диаметрами 5 и 10 мм на настольном вертикально-сверлильном станке модели 2М112.

Выбор скорости резания был обусловлен возможностями станка, режущего инструмента при обработке титановых сплавов и составлял от 7 до 30 м/мин [1; 2; 3]. Подача ручная.

Для исследования явлений, происходящих в месте сопряжения слоёв пакета при сверлении отверстий, были проведены следующие серии экспериментов (см. рис. 1).

Сверление отверстий выполнялось поочередно со стороны слоя из сплава ВТ23 и со стороны слоя из сплава Д16Т.

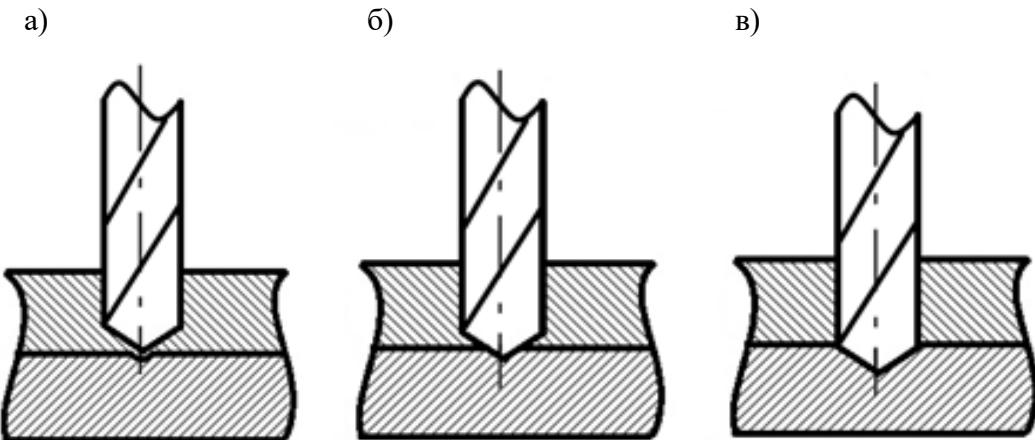


Рис. 1. Серии экспериментов: а – сверление отверстий в верхнем слое пакета до утончения донышка отверстия; б – сверление отверстий в верхнем слое пакета до прорыва донышка отверстия; в – сверление отверстий до полного выхода заборного конуса сверла из верхнего слоя пакета

В процессе эксперимента визуальным способом исследовались характер стружкообразования и деформационные процессы, происходящие в месте сопряжения слоёв пакета.

**Результаты исследования.** При сверлении слоя из титанового сплава образуется сильно деформированная сливная стружка, прилипающая к режущим кромкам сверла и накапливающаяся в стружкоотводящих канавках. При недостаточно плотном соединении слоёв пакета стружка попадает между слоями и раздвигает их, действуя как клин.

При сверлении слоя из алюминиевого сплава на указанных скоростях резания образуется суставчатая стружка, хорошо удаляемая из зоны резания.

В процессе сверления отверстия в пакете со стороны титанового сплава по мере утончения донышка отверстия под действием осевого усилия сверла деформируется (см. рис. 2, а), а затем прорывается. По мере выдавливания донышка отверстия оно вдавливается в ответную поверхность слоя из алюминиевого сплава, оставляя в нём вмятину (см. рис. 2, б).

В процессе сверления отверстия со стороны слоя из алюминиевого сплава донышко отверстия дополнительно деформируется об ответную поверхность слоя из сплава ВТ22, приобретая плоскую форму (см. рис. 2, в).

При использовании в пакете промежуточного слоя картона деформация донышка приобретает вытянутую коническую форму (см. рис. 2, г).

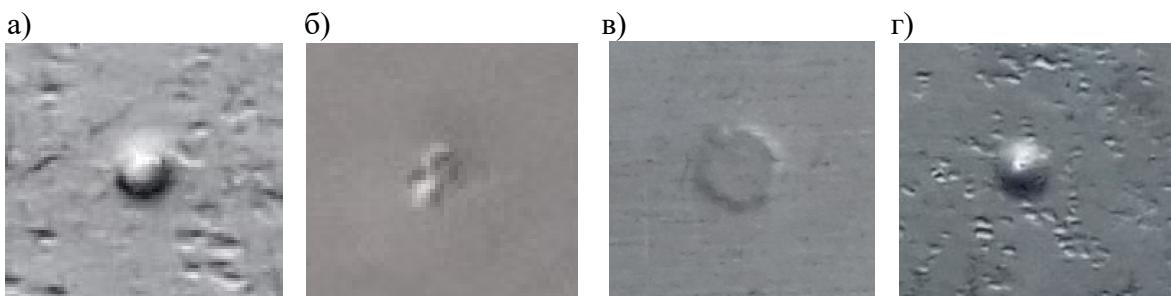


Рис. 2. Деформация на пластинах из титанового сплава (а, г) и из алюминиевого сплава (б, в)

Сверление отверстия со стороны слоя из титанового сплава происходит с ощутимым сопротивлением. По мере врезания сверла в нижний слой из алюминиевого сплава сопротивление резанию снижается. В процессе перехода сверла из верхнего слоя пакета в нижний по окружности отверстия в верхнем слое образуется заусенец, имеющий острую кромку, которая вдавливается в ответную поверхность слоя из алюминиевого сплава и расклинивает слои между собой (см. рис. 3, а).

При сверлении отверстия со стороны слоя из алюминиевого сплава сопротивление резанию невелико, однако в момент встречи сверла со слоем из титанового сплава сопротивление резко возрастает, что может вызвать выкрашивание режущих кромок либо поломку сверла. Образующийся по окружности отверстия заусенец деформируется об ответную поверхность слоя из титанового сплава (см. рис. 3, б).



Рис. 3. Заусенец, образовавшийся по окружности отверстия в слое из титанового сплава (а) и алюминиевого сплава (б)

**Заключение.** В работе представлены результаты экспериментального исследования процессов, происходящих в месте сочленения слоёв пакета разнородных материалов при сверлении в нём отверстий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, В. А. Морфология контактных поверхностей быстрорежущего инструмента при точении титанового сплава ВТ20 / В. А. Ким, Ф. Я. Якубов, Ч. Ф. Якубов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № II-1(26). – С. 56-63.
2. Асафьева, Е. В. Результаты высокопроизводительного фрезерования титановых сплавов ВТ20, ВТ22 / Е. В. Асафьева, А. Г. Серебренникова // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всерос. национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2019 г. В 4 ч. Ч. 1 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019. – С. 15-18.
3. Серебренникова, А. Г. Титановый сплав ВТ22: исследование зависимости выходных параметров токарной обработки от геометрии режущего инструмента / А. Г. Серебренникова, В. Б. Гурылев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. № 3 (152). – С. 548-560.



Попов А. В., Предеин В. В., Комаров О. Н.  
A. V. Popov, V. V. Predein, O. N. Komarov

## ВЛИЯНИЕ ПОДГОТОВКИ ШИХТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ОТЛИВОК, ПОЛУЧАЕМЫХ АЛЮМОТЕРМИЕЙ

### INFLUENCE OF CHARGE COMPOSITION PREPARATION ON FORMING CASTING PROPERTIES OBTAINED BY ALUMINOTHERMY

**Попов Артём Владимирович** – младший научный сотрудник Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: popov.av@imim.ru.

**Artyom V. Popov** – Junior Researcher, Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: popov.av@imim.ru.

**Предеин Валерий Викторович** – кандидат технических наук, научный сотрудник Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: predein.vv@imim.ru.

**Valery V. Predein** – PhD in Engineering, Researcher, Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: predein.vv@imim.ru.

**Комаров Олег Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

**Oleg N. Komarov** – PhD in Engineering, Leading Researcher, Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

**Аннотация.** Алюмотермия как метод получения литья в современных условиях дефицита шихтовых материалов и высокой стоимости энергетических ресурсов является перспективным направлением разработок, способствующим значительному сокращению энергозатрат, а также внедрению в производственный цикл и эффективной переработке доступных недорогих металлоотходов промышленного комплекса. Одной из важных задач при этом является обеспечение гарантированного соответствия химического состава получаемых сплавов требуемым диапазонам содержания элементов согласно действующим нормативным документам. Управление свойствами получаемых при алюмотермии отливок возможно варьированием различных факторов, в частности предварительной температуры термитных композиций. Исследованиями установлено, что содержание основных элементов в экспериментальных сплавах находится в следующих диапазонах: C = 1,32...1,66 %; Mn = 0,62...0,91 %; Si = 0,70...0,80 %; Al = 4,04...5,29 %. При этом структуры характеризуются наличием перлита, пластинчатого мартенсита, остаточного austenита, графита, а твёрдость исследуемых образцов изменяется в диапазоне 440...641 HBW.

**Summary.** Aluminothermy, as a method of casting producing, under current conditions of shortage of charge materials and high cost of energy resources, is a promising area of development that contributes to a significant reduction in energy costs, as well as the introduction of affordable low-cost metal waste from the industrial complex into the production cycle and efficient processing. One of the important tasks in this case is to ensure guaranteed compliance of the chemical composition of the obtained alloys with the required ranges of element content in accordance with current regulatory documents. The properties of castings obtained by aluminothermy can be controlled by varying different factors, in particular, by the preliminary temperature of the thermite compositions. The researches have found that the content of the main elements in the experimental alloys is in the following ranges: C = 1.32...1.66 %; Mn = 0.62...0.91 %; Si = 0.70...0.80 %; Al = 4.04...5.29 %. In this case, the structures are characterized by the occurrence of pearlite, lamellar martensite, residual austenite, graphite, and the hardness of the samples studied varies in the range of 440...641 HBW.

**Ключевые слова:** алюмотермия, физико-механические свойства, литьё, сталь, metallurgy.

**Key words:** aluminothermy, physical and mechanical properties, casting, steel, metallurgy.

Работа выполнена в рамках государственного задания ХФИЦ ДВО РАН.

Целью настоящей работы является изучение влияния операций предварительной подготовки термитной шихты на характеристики конечного продукта в виде отливки из термитного металла. Предварительная подготовка заключается в нагреве термитной шихты вместе с частью литейной оснастки, а именно реакционным тиглем, в лабораторной электропечи SNOL 12/1300 муфельного типа. Температурные режимы предварительного нагрева следующие: 25, 200, 400, 600 °C. При этом кокильная форма после просушки остужается до комнатной температуры и процедура разливки происходит без дополнительного нагрева формы. Термитная смесь состояла из алюминиевого порошка марки ПА-2 (ГОСТ 6058-73) и железной окалины, измельчённой до состояния порошка с размером фракции 0,2…1,5 мм. Химические составы компонентов следующие:

- алюминиевый порошок: Al = 98,627 %; Cu = 0,018 %; Si = 0,855 %; Mn = 0,019 %; Fe = 0,462 %; Cr = 0,016 %; Ni = 0,004 %;
- железная окалина: Fe = 71,500 %; O<sub>2</sub> = 22,639 %; Si = 2,960 %; Mn = 1,188 %; Al = 0,697 %; Cu = 0,444 %; Ni = 0,188 %; Cr = 0,173 %; C = 0,150 %; S = 0,030 %; P = 0,030 %.

Соотношение компонентов (восстановителя и оксидного комплекса) составило 25 и 75 % по массе соответственно. Дополнительные наполнители и/или модификаторы не вносились. В остальных аспектах методика проведения экспериментальных алюмотермитных плавок аналогична использованной в предшествующих исследованиях [1; 2].

На рис. 1 представлены изображения микроструктуры шлифов металлических отливок, полученных с разными температурными режимами предварительной подготовки термитной шихты.

Микроструктура металла отливки, полученного при температуре термитной шихты в 25 °C (т.е. без предварительного подогрева), состоит из пластинчатого перлита и локализованных участков пластинчатого мартенсита с остаточным аустенитом. При этом показатель твёрдости составляет 511 единиц по шкале HBW.

Предварительный нагрев термитной шихты до 200 °C приводит к формированию микроструктуры, состоящей из пластинчатого перлита с разноразмерными участками вторичного цементита. При этом показатель твёрдости составляет 440 единиц по шкале HBW.

При режиме предварительного нагрева термитной смеси до 400 °C образуется микроструктура из пластинчатого мартенсита с небольшим содержанием остаточного аустенита и наличием шаровидного графита во всём объёме образца. При этом твёрдость достигает значения 641 единицы по шкале HBW.

Нагрев смесей до 600 °C позволил сформировать в образце структуру пластинчатого мартенсита с большим, по сравнению с предыдущим образцом, содержанием остаточного аустенита. Шаровидный графит также присутствует в структуре отливки. При этом показатель твёрдости образца имеет значение в 593 единицы по шкале HBW.

В ходе данного исследования установлены следующие зависимости по основным химическим элементам, содержащимся в термитных сплавах.

Содержание углерода с изменением режима прогрева с 25 до 600 °C возрастает от 1,45 до 1,66 % соответственно. Однако при подогреве термитной шихты до 200 °C наблюдается падение содержания углерода до 1,32 %, вызванное общим увеличением выхода металлической фазы. Содержание углерода в получаемых продуктах превышает его содержание в исходных компонентах вплоть до 8,74 раз, что объясняется взаимодействием с литейной оснасткой, изготовленной из графитового материала.

Содержание алюминия в интервале режимов предварительного подготовки шихты от 25 до 400 °C непрерывно снижается с 5,29 до 4,04 %. Это объясняется увеличением средней температуры продуктов реакции, при котором повышается окисление алюминия, его угар и переход в шлаковую и газовую фазы. При температуре нагрева шихты 600 °C наблюдается повышение остаточного содержания алюминия до 4,33 %. К этому приводят следующие обстоятельства: снижение

выхода металлической фазы и рост концентрации алюминия; переход части оксидов  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в  $\text{FeO}$  при нагреве выше  $560^\circ\text{C}$ , что сдвигает стехиометрическое соотношение в сторону избыточного содержания восстановителя.

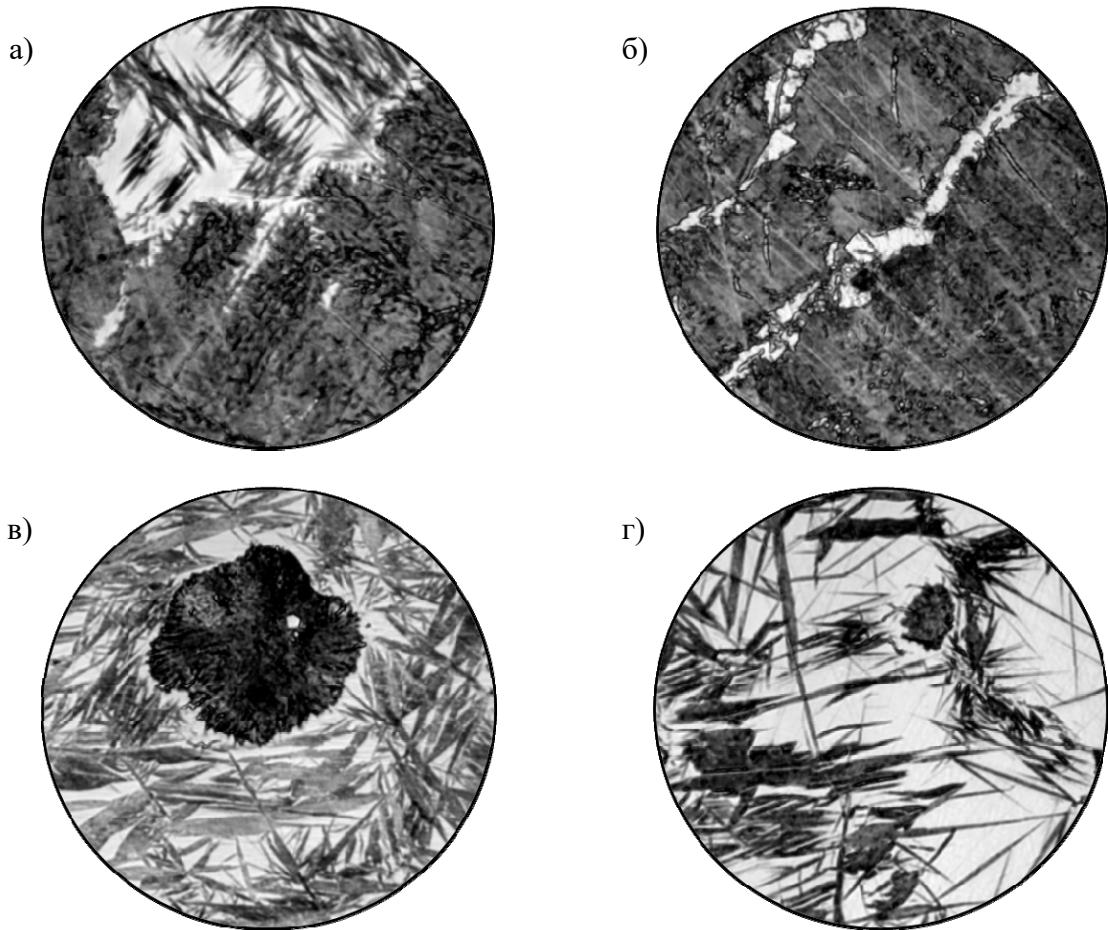


Рис. 1. Примеры микроструктуры образцов, получаемых при различных начальных температурах термитных композиций ( $\times 1000$ ): а –  $25^\circ\text{C}$ ; б –  $200^\circ\text{C}$ ; в –  $400^\circ\text{C}$ ; г –  $600^\circ\text{C}$

Содержание марганца в зависимости от режима предварительной подготовки уменьшается на всём диапазоне температур нагрева шихт с 0,91 до 0,62 %. При этом существенное снижение содержания марганца наблюдается в интервале от 400 до  $600^\circ\text{C}$  и составляет 0,22 %. Такое поведение марганца в расплаве объясняется высоким парциальным давлением его паров при достаточно низких температурах, при которых происходит переход в газовую фазу.

Содержание кремния в сплавах при предварительном нагреве шихты в интервале температур от 25 до  $400^\circ\text{C}$  возрастает с 0,72 до 0,80 %. Это объясняется наличием таких температурных условий, при которых кремний более эффективно восстанавливается и переходит в металлическую фазу. При температурном режиме  $600^\circ\text{C}$  содержание кремния в сплавах падает до минимальных 0,7 %. Такое низкое содержание кремния связано с его интенсивным кипением, окислением и переходом в газовую и шлаковую фазы в процессе протекания термитной реакции.

Таким образом, применение нагрева термитной шихты в качестве операции предварительной подготовки позволяет управлять химическим составом и микроструктурой получаемых в процессе алюмотермитного переплава отливок. Содержание основных химических элементов в термитных сплавах изменяется в приведённых диапазонах: С = 1,32...1,66 %; Mn = 0,62...0,91 %; Si = 0,70...0,80 %; Al = 4,04...5,29 %. При этом изменение некоторых элементов обладает нели-

**Попов А. В., Предеин В. В., Комаров О. Н.**

**ВЛИЯНИЕ ПОДГОТОВКИ ШИХТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ  
СВОЙСТВ ОТЛИВОК, ПОЛУЧАЕМЫХ АЛЮМОТЕРМИЕЙ**

нейным характером и определяется выходом металлической фазы, температурой продуктов реакции и свойствами элементов. В образцах наблюдаются структурные составляющие, характерные для литого состояния. При режимах с низкими температурами воздействия на шихту (25 и 200 °C) в структуре образцов присутствует перлит благодаря меньшей скорости охлаждения отливки в форме, что обеспечивает переход из аустенита. Повышение температур подогрева до 400...600 °C приводит к формированию большого градиента между температурами расплава и кокильной формы. Данный градиент приводит к повышению скорости охлаждения отливки в форме, а следовательно, и к образованию закалочных образований (пластиначатого мартенсита) в микроструктуре изделия. При этом высокая скорость охлаждения также приводит к наличию остаточного аустенита, не прошедшего превращения. Остаточный аустенит снижает показатели твёрдости термитного сплава. Также высокая скорость приводит к появлению колоний нерастворённого шаровидного графита. Твёрдость исследуемых образцов изменяется в диапазоне от 440 до 641 единиц по шкале HBW.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. M. Kallio. Use of the aluminothermic reaction in the treatment of steel industry by-products / M. Kallio, P. Ruuskanen, J. Maki, E. Poylio, S. Lahteenmaki // Journal of Materials Synthesis and Processing. 2000. T. 8, № 2. P. 87-92.
2. M. Kh. Ziatdinov. Metallurgical SHS Processes as a Route to Industrial-Scale Implementation: An Autoreview // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. 2018. T. 27, № 1. P. 1-13.
3. Mukasyan A. S., Shuck C. E. Kinetics of SHS Reactions: A Review // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. 2017. T. 26, № 3. P. 145-165.
4. Sarang B., Sarangi A., Ray H. S. Kinetics of Aluminothermic reduction of MnO<sub>2</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: A thermoanalytical investigation // ISIJ International. 1996. T. 36, № 9. P. 1135-1141.
5. Popov A. V. Structure formation on constructional aluminothermic cast elements under conditions of changing process parameters / A. V. Popov, O. N. Komarov, V. V. Predein, S. G. Zhilin // AIP Conference Proceedings. 2019. № 2176.
6. Komarov O. N. Control of the properties of metal alloys obtained by aluminothermy / O. N. Komarov, S. G. Zhilin, V. V. Predein and A. V. Popov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 709.
7. Zhengning Li. Enhancing Ductility of 1045 Nanoeutectic Steel Prepared by Aluminothermic Reaction through Annealing at 873K / Zhengning Li, Fuan Wei, Peiqing La, Hongding Wang, Yupeng Wei // Advances in Materials Science and Engineering. 2017. № 5392073.



Попов А. В., Предеин В. В., Комаров О. Н., Барсукова Н. В.  
A. V. Popov, V. V. Predein, O. N. Komarov, N. V. Barsukova

## ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ АЛЮМОТЕРМИЕЙ С ДОБАВЛЕНИЕМ В СОСТАВ ТЕРМИТНОЙ СМЕСИ ШЕЕЛИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА

## INCREASING THE MECHANICAL STRENGTH OF IRON-CARBON ALLOYS OBTAINED BY ALUMO THERMAL WITH THE ADDITION OF SHELITE CONCENTRATE TO THE THERMITE MIXTURE

**Попов Артём Владимирович** – младший научный сотрудник Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: popov.av@imim.ru.

**Artyom V. Popov** – Junior Researcher, Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: popov.av@imim.ru.

**Предеин Валерий Викторович** – кандидат технических наук, научный сотрудник Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: predein.vv@imim.ru.

**Valery V. Predein** – PhD in Engineering, Researcher, Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: predein.vv@imim.ru.

**Комаров Олег Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

**Oleg N. Komarov** – PhD in Engineering, Leading Researcher, Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

**Барсукова Нина Валерьевна** – аспирант Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Nina V. Barsukova** – a Post-Graduate Student, Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** В работе представлен энергоэффективный способ, получения железоуглеродистых сплавов методом алюмотермитного переплава, позволяющий увеличить их прочностные характеристики. Рассмотрены материалы оснастки и компоненты, входящие в состав экзотермических смесей. Исследовано влияние содержания шеелитового концентрата в составе алюмотермитной смеси на физико-механические свойства получаемого сплава.

**Summary.** The paper presents an energy-efficient method for obtaining iron-carbon alloys by the method of aluminothermic remelting, which allows increasing their strength characteristics. The materials of the tooling and components that make up the exothermic mixtures are considered. The influence of the content of scheelite concentrate in the composition of the aluminothermite mixture on the physical and mechanical properties of the resulting alloy was investigated.

**Ключевые слова:** шеелитовый концентрат, алюмотермитная смесь, физико-механические свойства сплавов, отливка, литьё, сталь, metallurgy.

**Key words:** scheelite concentrate, aluminothermite mixture, physical and mechanical properties of alloys, casting, steel, metallurgy.

**Попов А. В., Предеин В. В., Комаров О. Н., Барсукова Н. В.**  
ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ,  
ПОЛУЧЕННЫХ АЛЮМОТЕРМИЕЙ С ДОБАВЛЕНИЕМ В СОСТАВ ТЕРМИТНОЙ  
СМЕСИ ШЕЕЛИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА

УДК 669.094.2-926.62

Работа выполнена в рамках государственного задания ХФИЦ ДВО РАН.

Важнейшей задачей для металлургии и машиностроения в условиях жёсткой конкуренции становится исследование возможности получения новых металлургических сплавов и готовых изделий. Технология их получения, по возможности, должна обеспечивать повторное вовлечение используемых материалов в технологический цикл, снизить временные и финансовые затраты на получение готовой продукции. Отдельные детали и механизмы в целом, полученные данным способом из экспериментальных сплавов, должны обладать необходимым комплексом химических и физико-механических свойств и соответствовать требованиям, предъявляемым к материалам, предназначенным для работы в сложных условиях, без критической потери геометрических параметров и функциональности в течение всего периода эксплуатации изделия.

Для достижения поставленной цели предлагается использовать алюмотермитную переработку материалов [1], которая позволяет получать железоуглеродистые сплавы не только из химически чистых веществ, но и из различных отходов предприятий машиностроительного комплекса, т.к. основой термитных смесей является порошок железной окалины и стружка алюминиевых сплавов [2]. Для изменения химического состава и физико-механических свойств сплавов, образующихся в результате реакции, в состав шихты вводятся различные наполнители: металлическая стружка, metallurgический скрап, концентраты с отвалов очистных сооружений, ферросплавы, металлические и неметаллические соединения химических элементов, карбонизаторы, модификаторы, оксиды металлов. В процессе термитной реакции выделяется большое количество тепла (температура превышает 2700 °C), поэтому форму и реактор необходимо изготавливать из огнеупорного материала, в качестве которого возможно использование электродного графита – отхода традиционного процесса электродугового переплава [3]. Для увеличения скорости прохождения реакции и более полного усвоения тугоплавких элементов, входящих в состав термитной смеси, используют предварительный нагрев шихты и углеродной оснастки.

Химический состав шеелитового концентрата:  $WO_3 = 53\ldots50\%$ ,  $P = 1,7\ldots2,0\%$ ,  $Mo = 0,021\%$ ,  $S = 0,25\ldots0,3\%$ ,  $As \leq 0,005\%$ ,  $SiO = 2\ldots4,6\%$ ,  $CaO = 29\%$ . Шеелитовый концентрат в виде порошка добавляют в исходный состав термитной смеси, инициируют экзотермическую реакцию, после которой образуются жидкие фазы металла и шлака. Далее металл сливают в углеродную форму. Полученный таким образом экспериментальный сплав содержит в своём составе большое количество не только соединений вольфрама, но и его карбидов, что положительным образом сказывается на повышении твёрдости, упругости и износостойкости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Новохацкий, В. А. Малоотходная технология производства стальных отливок с экзотермическими прибылями / В. А. Новохацкий, А. А. Жуков, Ю. И. Макарычев. – М.: Машиностроение, 1986. – 64 с.
2. Технология получения заготовок из кипящей стали для прокатного производства / О. Н. Комаров, С. Г. Жилин, В. В. Предеин, Е. Е. Абашкин, А. В. Попов // Девятая Всероссийская конференция молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России»: сборник докладов / Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – С. 189-191.
3. Влияние начальных температур шихты и формы на структуру и физико-механические свойства литых заготовок, получаемых при алюмотермитном переплаве / А. В. Попов, В. В. Предеин, О. Н. Комаров, С. Г. Жилин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2017. – Т. 19, № 4. – С. 24-40.



Саблин П. А., Щетинин В. С.  
P. A. Sablin, V. S. Shchetinin

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МЕХАНООБРАБОТКИ С ПОМОЩЬЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕСКОНТАКТНЫХ ОПОР

### INCREASING THE ACCURACY OF MACHINING WITH THE USE OF CONTACTLESS SUPPORTS

**Саблин Павел Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

**Pavel A. Sablin** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

**Щетинин Владимир Сергеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: schetynin@mail.ru.

**Vladimir S. Shchetinin** – Doctor of Engineering, Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: schetynin@mail.ru.

**Аннотация.** Рассмотрено применение бесконтактных опор в шпиндельных узлах металлорежущих станков при высокоскоростной обработке. Приводятся результаты точности и качества обработки деталей на станках с газостатическими и газомагнитными опорами.

**Summary.** The use of contactless supports in the spindle units of metal-cutting machines at high-speed processing is considered. The results of accuracy and quality of parts processing on machine tools with gas-static and gas-magnetic bearings are presented.

**Ключевые слова:** качество обработки резанием, бесконтактные опоры, высокоскоростная обработка, газомагнитные опоры, шпиндельный узел.

**Key words:** cutting quality, non-contact bearings, high-speed machining, gas magnetic bearings, spindle assembly.

УДК 621.9044

В современном автоматизированном производстве, где количество безлюдных технологий неумолимо растёт, роль контроля за каким-либо процессом или результатом повышается в разы. В этой связи вопрос обеспечения высокой точности изготовления деталей в условиях автоматизированного производства, которым занимаются ведущие научные школы страны и мира, а также ведущие предприятия, остаётся актуальным и по сей день.

Качество обработки поверхности является как составным параметром точности обработки, так и самостоятельным параметром. Например, если обеспечить высокую точность линейного размера, то высокое качество обработанной поверхности обеспечивается автоматически (по умолчанию). Но в то же время данное правило никак не действует в «обратном направлении»: если обеспечить высокое качество обработанной поверхности, нельзя однозначно говорить о том, что мы обеспечили высокую точность.

Развитие промышленности постоянно предъявляет требования к повышению качества и точности обработки деталей. Повышению качества и точности металлообработки уделяется постоянное внимание [1–3]. Если качество обработки в большей степени зависит от процессов, происходящих в зоне резания, и динамических колебаний инструмента и заготовки друг относительно

друга, то точность обработки зависит в большей степени от жёсткости технологической системы. Если учесть, что жёсткость станка, приспособлений, инструмента и деталей регламентирована, то для снижения упругих деформаций приходится снижать режимы обработки уменьшением подачи и глубины резания, позволяющих уменьшить силы резания [6]. При этом падает производительность обработки, компенсировать которую можно повышенными скоростями вращения шпиндельных узлов.

**Цель работы** – показать преимущество шпиндельных узлов станков для высокоскоростной обработки материалов резанием, установленных на бесконтактные газомагнитные опоры.

#### Задачи работы:

1. Провести анализ факторов, влияющих на точность обработки.
2. Провести сравнительный анализ виброустойчивости шпинделей на различных подшипниках.

Известно, что шпиндельные узлы на опорах качения ограничены по быстроходности. Поэтому для высоких скоростей вращения применяют шпиндельные узлы на бесконтактных опорах. В качестве бесконтактных опор используют газовые, магнитные, а также комбинированные газомагнитные опоры. Применение гидростатических и гидродинамических бесконтактных опор ограничено из-за сложности периферийного оборудования и высокого гидравлического сопротивления в опорах, ограничивавшего их скоростной параметр.

В общей иерархии факторов, влияющих на точность обработки (см. рис. 1), в обеспечении жёсткости бесконтактная газомагнитная опора выступает как нагружочное компенсационное звено, позволяющее управлять жёсткостью всей системы, а также демпфирующим звеном, позволяющим гасить динамические вибровозмущения, идущие от различных узлов через шпиндельный узел в деталь и, соответственно, в зону резания. Это позволяет получить и более высокое качество поверхности обрабатываемой заготовки.



Рис. 1. Факторы, влияющие на точность обработки резанием

На рис. 2 показано, как влияет применение управления жёсткостью с помощью изменения магнитных сил, действующих на шпиндель, установленный на бесконтактных газомагнитных опорах. На данном рисунке показаны результаты экспериментальной оценки точности вращения шпинделя с включённым и выключенным электромагнитом газомагнитной опоры. Из рисунка видно, что при вращении шпинделя с включённым магнитным подвесом уменьшается амплитуда колебаний оси шпинделя. Это позволяет повысить точность вращения по сравнению с установкой шпинделя на газостатические опоры.

Следует отметить, что увеличение магнитной составляющей несущей способности опоры, а также нагрузки на консоли шпинделя уменьшает величину эллипса траектории оси шпинделя.

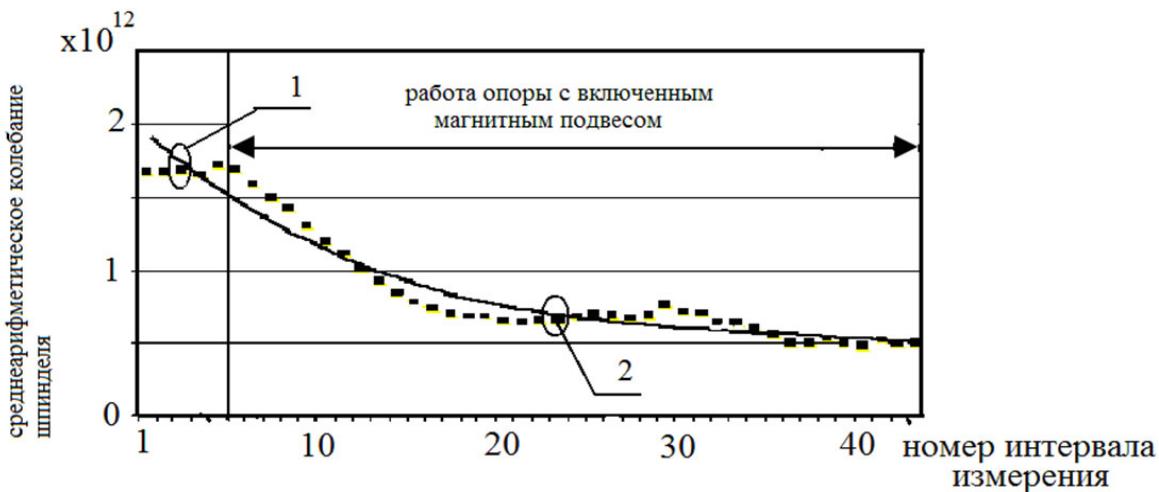


Рис. 2. Уровень вибрации корпуса шпинделя: 1 – уровень вибрации шпинделя на бесконтактных газостатических опорах; 2 – уровень вибрации шпинделя на газомагнитных опорах с управлением магнитной силой ( $n = 25\ 000\ \text{мин}^{-1}$ )

В работах [4; 5] доказано, что применение шпиндельных узлов на газостатических опорах позволяет получить точность обработки до 0,4 мкм, а на газомагнитных опорах – до 0,2 мкм, а также качество обработанной поверхности  $Ra = 0,03$  мкм за счёт возможности управления жёсткостью таких опор с помощью электромагнитных сил.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Результаты контроля массы и длины сменных металлорежущих пластин для повышения эффективности технологического процесса обработки / Б. Я. Мокрицкий, Д. А. Савин, Я. В. Конюхова [и др.] // Металлообработка. – 2020. – № 2 (116). – С. 3-11.
2. Ким, В. А. Анализ плоскости сдвига при стружкообразовании в процессе резания / В. А. Ким, Б. Я. Мокрицкий, Ч. Ф. Якубов // Металлообработка. – 2019. – № 1 (109). – С. 9-14.
3. Изменение профиля поверхности деталей при различных вариациях ряда факторов токарной обработки / А. И. Пронин, В. В. Мыльников, И. И. Рожков [и др.] // Механические свойства современных конструкционных материалов: материалы конференции. – Москва: ИМЕТ РАН, 2018. – С. 123.
4. Космынин, А. В. Совершенствование характеристик газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов металлообрабатывающего оборудования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Космынин Александр Витальевич. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2004. – 350 с.
5. Щетинин, В. С. Научное обоснование создания и разработка высокоскоростных шпиндельных узлов на газомагнитных опорах металлорежущих станков: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Щетинин Владимир Сергеевич. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2011. – 311 с.
6. Отряскина, Т. А. Исследование термодинамических процессов при стружкообразовании / Т. А. Отряскина, Е. Г. Кравченко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1(47). – С. 85-89.

**Старцев Е. А., Бахматов П. В., Михайлов К. А., Соболев Б. М.**  
ВЛИЯНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ ПОРОШКОВОЙ  
СВАРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ НА ПРОЦЕСС ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

**Старцев Е. А., Бахматов П. В., Михайлов К. А., Соболев Б. М.**  
**E. A. Startsev, P. V. Bakhmatov, K. A. Mikhailov, B. M. Sobolev**

## **ВЛИЯНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ ПОРОШКОВОЙ СВАРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ НА ПРОЦЕСС ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ**

### **INFLUENCE OF AN EXPERIMENTAL FILLER FOR POWDER WELDING WIRE ON THE ARC WORKING PROCESS**

**Старцев Егор Андреевич** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: egorstarts@inbox.ru.

**Egor A. Startsev** – Post-Graduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: egorstarts@inbox.ru.

**Бахматов Павел Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии сварочного и металлургического производства Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mim@knastu.ru.

**Pavel V. Bakhmatov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Technology of Welding and Metallurgical Production, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mim@knastu.ru.

**Михайлов Кирилл Александрович** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mim@knastu.ru.

**Kirill A. Mikhailov** – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mim@knastu.ru.

**Соболев Борис Михайлович** – кандидат технических наук, профессор Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sobolev-bris@rambler.ru.

**Boris M. Sobolev** – PhD in Engineering, Professor, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sobolev-bris@rambler.ru.

**Аннотация.** В работе описывается опыт создания и применения экспериментальной порошковой проволоки, наполнителем которой является дроблённый металлургический шлак. Показано влияние металлургического шлака как наполнителя для порошковой проволоки на процесс наплавки.

**Summary.** The paper describes the experience of creating and applying an experimental powder wire with crushed metallurgical slag as the filler. The influence of metallurgical slag as a filler for cored wire on the surfacing process is shown.

**Ключевые слова:** сварочные материалы, порошковая проволока, дуговая наплавка, металлургический шлак.

**Key words:** welding materials, cored wire, arc surfacing, metallurgical slag.

УДК 621.791.92

**Введение.** Целью настоящей работы является апробация экспериментальной сварочной проволоки, полученной с применением техногенных отходов металлургических производств.

Разработанная порошковая проволока (см. рис. 1) представляет собой стальную оболочку, наполненную запрессованным в ней порошком дроблённого металлургического шлака [1], средний химический состав которого приведён в табл. 1.

Дробление шлака производили с помощью шаровой мельницы МШ-60. Изготовление порошковой проволоки осуществляли на волочильном стане НИИМ-ЛПП-4/350 с образованием простого сечения с двумя продольными щелями. В качестве оболочки использовалась металлическая

полоса из стали 08kp толщиной 0,5 мм и шириной 15 мм. Диаметр полученной волочением порошковой проволоки 3,7 мм.

Таблица 1

Средний химический состав металлургического шлака

в процентах

CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe/FeO	MnO
15,4...21,03	2,33...3,81	8,7...14,94	4,87	48,24...66,05	5,56...5,98

а)



б)

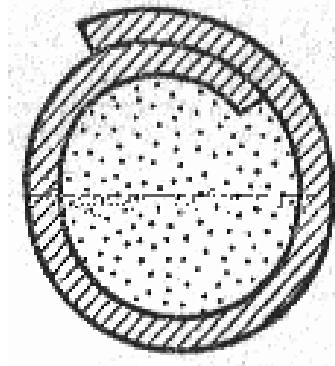


Рис. 1. Полученная сварочная проволока (а) и вид её сечения (б)

В ходе изготовления порошковой проволоки лента пропускается через профилирующие устройства и заполняется шихтой. При протягивании через фильтры лента сворачивается в трубку и обжимает находящуюся в ней шихту. Проволока проходит последовательно через несколько фильтров, постепенно уменьшается в диаметре до необходимого размера, а заполняющий её порошок уплотняется [2].

Для определения коэффициента заполнения [3] экспериментальной порошковой проволоки был произведён расчёт по формуле

$$K_3 = \frac{P - P_{об}}{P} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $P$  – масса образца проволоки, г;  $P_{об}$  – масса оболочки, г.

При решении уравнения (1) коэффициент заполнения равен

$$K_3 = \frac{3,680 - 3,062}{3,680} \cdot 100 = 16,793 \%,$$

что свидетельствует о нормальном распределении компонентов шихты по внутренней полости проволоки.

Поверхность полученной порошковой проволоки не имеет вмятин, надрывов, следов коррозии, масла и других загрязнений.

Ручную дуговую наплавку выполняли короткими отрезками проволоки (250...300 мм), закрепляемыми в электрододержатель, на пластины толщиной 6 мм из стали Ст3сп с применением сварочного аппарата СВАРОГ МИГ 3500 на постоянном токе прямой и обратной полярности 80...90 А.

При контактном поджигании дуги на режиме 80...90 А отмечается хорошее её формирование, но горение дуги нестабильное, вероятно, из-за негомогенного состава шихты. Увеличение силы тока до 100...120 А интенсифицирует плавление проволоки и делает невозможной ручную

наплавку. Снижение тока до 50...70 А повышает коэффициент наплавки, но снижает стабильность горения дуги, приводя к залипанию проволоки.

Внешний вид наплавленных валиков на прямой и обратной полярности постоянного тока на режиме 80 А приведён на рис. 2. Как видно из рисунка, плавление сварочной проволоки сопровождается прохождением различных реакций и конденсацией их продуктов в прилегающей к шву плоскости. Вместе с этим отмечается высокий уровень мелкодисперсного разбрзгивания (см. рис. 3).



Рис. 2. Наплавленные валики на режиме 80 А на постоянном токе:  
а – прямая полярность; б – обратная полярность

После наплавки были выявлены следующие недостатки: трудная отделимость шлаковой корки, порообразование в начале и в конце наплавленного валика (см. рис. 2).



Рис. 3. Мелкодисперсное разбрзгивание при сварке

Несмотря на выявленные недостатки, при стабилизации грануляции и химического состава можно будет добиться применения отходов металлургических предприятий в качестве наполнителя для порошковой проволоки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Переработка шлаков и безотходная технология в металлургии / М. И. Панфилов [и др.]. – М.: Металлургия, 1987. – 238 с.
2. Рыбаков, В. М. Сварка и резка металлов / В. М. Рыбаков. – 2-е изд., исправ. – М.: Высшая школа, 1979. – 214 с.
3. ГОСТ 26271-84. Проволока порошковая для дуговой сварки углеродистых и низколегированных сталей [Электронный ресурс] / Библиотека ГОСТов. – Режим доступа: <http://vsegost.com/Catalog/20/20771.shtml> (дата обращения 18.11.2020).



Ткачева А. В., Абашкин Е. Е.  
A. V. Tkacheva, E. E. Abashkin

## ВЛИЯНИЕ СОВМЕЩЁННОГО ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ В НЕРАЗЪЁМНОМ СОЕДИНЕНИИ ИЗ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

### INFLUENCE OF THE COMBINED LOCAL THERMAL EXPOSURE ON MECHANICAL PARAMETERS IN A FIXED CONNECTION CARBON STEEL

**Ткачева Анастасия Валерьевна** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: 4nansi4@mail.ru.

**Anastasiya V. Tkacheva** – PhD in Physics and Mathematics, Researcher, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: 4nansi4@mail.ru.

**Абашкин Евгений Евгеньевич** – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: abashkine@mail.ru.

**Evgeny E. Abashkin** – PhD in Engineering, Junior Researcher, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: abashkine@mail.ru.

**Аннотация.** В работе рассматривается метод решения проблем, возникающих при электродуговой сварке углеродистых сталей. Образование закалочных структур в зоне термического влияния сварочного шва приводит к изменению свойств в неразъёмных соединениях металлоконструкций. Для решения поставленной задачи применяем метод электродуговой автоматической сварки под слоем флюса порошковой проволокой с алюмотермитным наполнителем. Особенностью применения такой проволоки является совмещение электродугового и алюмотермического процесса. В результате экспериментального исследования были получены неразъёмные соединения из углеродистой стали, а также представлены значения отклонений геометрической точности и физико-механических свойств.

**Summary.** The paper considers a method for solving problems arising during electric arc welding of carbon steels. The formation of hardening structures in the heat-affected zone of the weld leads to a change in properties in permanent joints of metal structures. To solve this problem, we use the method of automatic electric arc welding under a layer of flux with a flux-cored wire with aluminothermic filler. A feature of the use of such a wire is the combination of the electric arc and aluminothermal process. As a result of the experimental study, permanent joints of carbon steel were obtained, and the values of deviations of geometric accuracy and physical and mechanical properties were also presented.

**Ключевые слова:** алюмотермитный наполнитель, порошковая проволока, зона термического влияния, сварка.

**Key words:** aluminothermic filler, flux-cored wire, heat-affected zone, welding.

УДК 621.791

Работа выполнена в рамках государственно задания Хабаровского федерального научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Целью исследований является определение оптимального режима теплового воздействия на сварную зону деталей из углеродистой стали, получаемого при помощи объединения электродугового и алюмотермического процесса в ходе электродуговой сварки, и его влияния на формирова-

ние геометрии изделия и свойства в зоне термического воздействия по сравнению с традиционной технологией получения неразъёмных соединений.

Экспериментальная отработка режимов теплового воздействия осуществлялась свариванием пластин с разделкой кромки по типу С21 ГОСТ 8713-79 «Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры» толщиной 10 мм, шириной 150 мм и длиной 550 мм, без предварительной очистки поверхности и подогрева зоны соединения. Процесс наплавки осуществляется при помощи агрегата АДФ-1000.

После завершения процесса сварки и охлаждения зоны соединения регистрировали изменение параметров геометрии полученных конструкций для определения деформационных отклонений. Установлено, что при экспериментальном способе получения неразъёмных соединений значение амплитуды максимальных отклонений на 5 % меньше, чем при традиционном способе сварки [1].

Исследование свойств полученных неразъёмных соединений показало, что увеличение тепловой энергии дуги приводит к росту значения твёрдости сварного шва неразъёмного соединения и может достигать HRA = 50 ед. Метод электродуговой автоматической сварки под слоем флюса порошковой проволокой с алюмотермитным наполнителем позволяет увеличить значение предела прочности на 6 %, и предела текучести на 17 % по сравнению со значениями, получаемыми при сварке проволокой сплошного сечения.

Установлено, что совмещение электродугового и алюмотермического процесса при получении неразъёмного соединения позволяет замедлить теплоотведение от участка стыка соединяемых пластин, что создаёт условия для снижения уровня остаточных напряжений без потерь прочности металла, находящегося в зоне термического влияния [2; 3].

В работе доказана эффективность совмещённого теплового процесса получения неразъёмного соединения из углеродистой стали. Требуемые характеристики металла шва и зоны термического влияния достигаются при использовании значения тепловой мощности дуги  $q = 9,7 \text{ кДж/с}$  и скорости перемещения электрода  $V = 25 \text{ м/ч}$ . Прочностные характеристики материала шва  $\sigma_{\text{в}} = 582 \text{ МПа}$  и  $\sigma_{\text{т}} = 410 \text{ МПа}$ . Представленный экспериментальный способ позволяет уменьшить негативное влияние локального перегрева на свойства зоны соединения и повысить геометрическую точность металлоконструкции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абашкин, Е. Е. Влияние упаковки компонентов термитного наполнителя порошковой проволоки на процессы электродугового переплава / Е. Е. Абашкин, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № I-1 (33). – С. 96-104.
2. Моделирование распределения остаточных напряжений в сварном соединении / Е. Е. Абашкин, А. А. Буренин, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, А. В. Ткачева // Физика и механика материалов. – 2019. – Т. 42, № 5. – С. 671-689.
3. Попов, А. В. Влияние режимов термообработки на структуру и свойства стальных заготовок, полученных методом алюмотермии / А. В. Попов, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2020. – № 1 (42). – С. 24-35.



**Хабибов М. М., Рубан К. Е., Бахматов П. В.**  
**M. M. Khabibov, K. E. Ruban, P. V. Bakhmatov**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОЙ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

## RESEARCH OF THE PROCESS OF AUTOMATIC DIMENSIONAL ARC SURFACE

**Хабибов Мухаммаджон Махмадиевич** – магистрант кафедры технологии сварочного и металлургического производства Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: mim@knastu.ru.

**Mukhammadzhon M. Khabibov** – Master's Degree Student, Welding and Metallurgical Production Technology Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave., 27. E-mail: mim@knastu.ru.

**Рубан Ксения Евгеньевна** – магистрант кафедры технологии сварочного и металлургического производства Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. 8(914)177-73-24. E-mail: krauzer\_sams96@list.ru.

**Ksenia E. Ruban** – Master's Degree Student, Welding and Metallurgical Production Technology Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin str., 27; tel. 8(914)177-73-24. E-mail: krauzer\_sams96@list.ru.

**Бахматов Павел Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии сварочного и металлургического производства Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

**Pavel V. Bakhmatov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Welding and Metallurgical Production Technology, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

**Аннотация.** Приведены результаты исследования автоматической дуговой наплавки в среде защитного газа на адаптированном 3D-портальном станке плазменной резки. Управление колебаниями сварочной горелки осуществлялось G-кодами. Проанализированы микроструктура и микротвёрдость наплавленных валиков.

**Summary.** The results of the study of automatic argon-arc surfacing in a protective gas environment on an adapted 3D portal plasma cutting machine are presented. The welding torch oscillation was controlled by G-codes. The microstructure and microhardness of the deposited rollers are analyzed.

**Ключевые слова:** аддитивная технология, наплавка, защитный газ, колебательные движения, микроструктура, микротвёрдость.

**Key words:** additive technology, surfacing, protective gas, oscillatory movements, microstructure, microhardness.

УДК 621.791.927.5

Сварочное производство является одной из ведущих областей машиностроения. В производстве широко применяют высокопроизводительные и экономически эффективные технологические процессы сварки, наплавки [1], пайки, термической резки, позволяющие успешно обрабатывать почти все конструкционные материалы большого диапазона толщин.

Применение аддитивных технологий – один из ярких примеров того, как новые разработки и оборудование могут существенно улучшать традиционное производство, позволяя изготавливать любое изделие послойно на базе 3D-модели.

### **Методика экспериментального исследования**

Наплавку валиков производили сварочным инвертором MIG 3500 (J93), оснащённым горелкой MS 36. Для крепления горелки к 3D-позиционеру разработали специальный кронштейн, поддерживающий её перпендикулярно к оси шва. Для наплавки использовали омеднённую стальную проволоку марки Св-08ГА-О диаметром 1,2 мм. Наплавку проводили в нижнем положении, непрерывно, по замкнутому прямоугольному контуру на стальную подкладку толщиной 10 мм. В табл. 1 представлены входные параметры сварки.

Таблица 1  
Режимы сварки

№ образца	Ток сварки, А	Напряжение, В	Скорость сварки, мм/мин
1			
2	215...250	23	1500
3			

Колебательные движения горелки осуществляли согласно техникам, представленным на рис. 1.

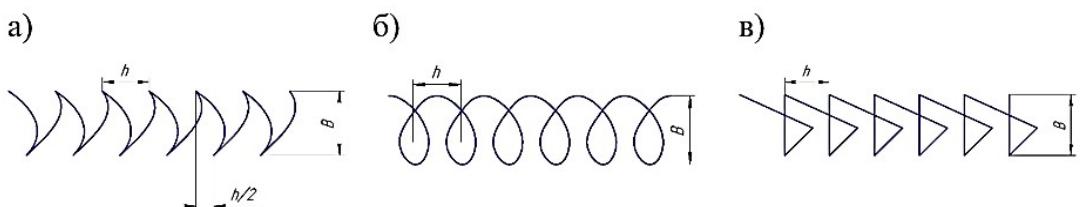


Рис. 1. Траектория колебательных движений при наплавке:  
а – образец № 1, б – образец № 2, в – образец № 3

Внешний вид наплавленных образцов представлен на рис. 2.

Заливка образцов поперечных сечений валиков осуществлялась эпоксидной смолой в обоймы диаметром 40 мм. Изготовление пробоподготовки образцов для исследования микроструктуры выполняли на шлифовально-полировальном станке EcoMet 250 Pro. После полировки образцы подвергались травлению в 5%-м спиртовом растворе азотной кислоты в течение 2 с и обезвоживанию в спирте до проявления структуры наплавленных валиков. Исследование микроструктуры и микротвёрдости проводили последовательно. Исследование микроструктуры проводили на металлографическом микроскопе Nikon MA200 при увеличении x100 и x400. Для обработки снимков применили программу Kolor Autopano Giga. Исследование микротвёрдости проводили в поперечном сечении валиков на микротвёрдомере SHIMADZU HMV-2.

### **Результаты исследования**

На рис. 3 представлены микроструктуры поперечных сечений наплавленных валиков. В центре рисунков расположены образцы при увеличении x100, вокруг которых расположены участки с увеличением x400. В ходе исследования было определено наличие в микроструктуре образцов трёх структурных составляющих в различных формах и сочетаниях. Наиболее пластичными и вязкими являются образцы с большой долей зёрен феррита.

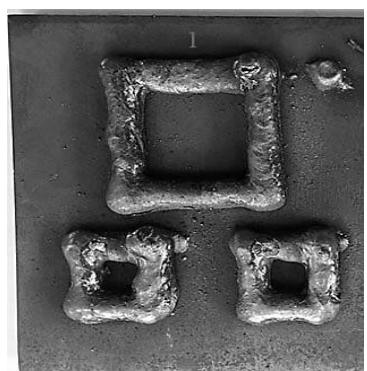


Рис. 2. Внешний вид наплавленных валиков

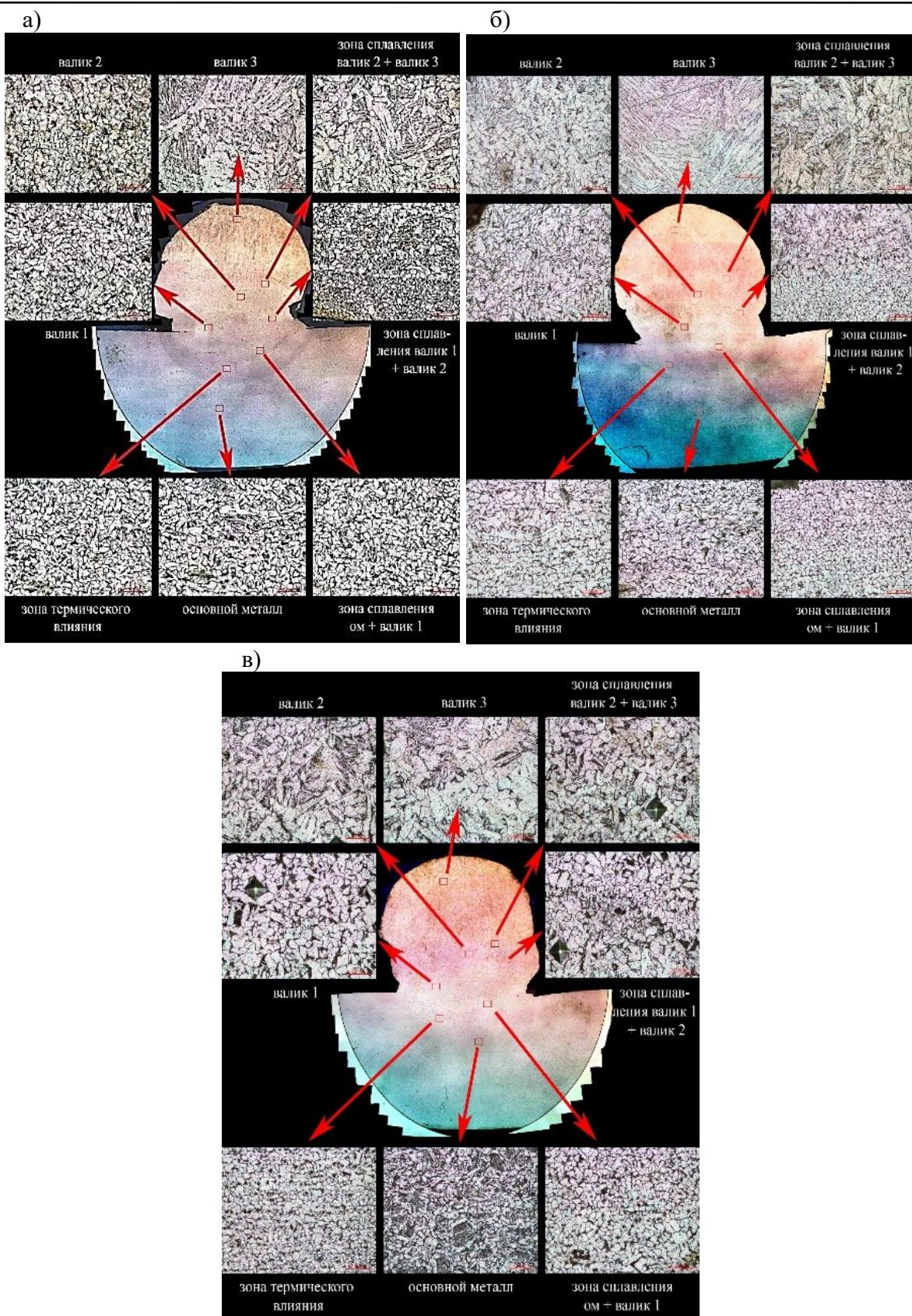


Рис. 3. Микроструктура образцов № 1 (а), № 2 (б) и № 3 (в)

Также было выявлено, что траектория колебательных движений при наплавке влияет на время термического воздействия на предыдущие наплавленные валики и на изменение структуры металла.

Установлено, что по всему сечению образцов микроструктура различна: верхний валик имеет большую величину зёрен в сравнении с предыдущими наплавленными валиками, что ведёт к упрочнению и повышению хрупкости образцов от нижнего слоя к верхнему.

В результате измерения микротвёрдости в поперечном сечении образцов построены графики (см. рис. 4) с возможностью визуализации зон изменения значений.

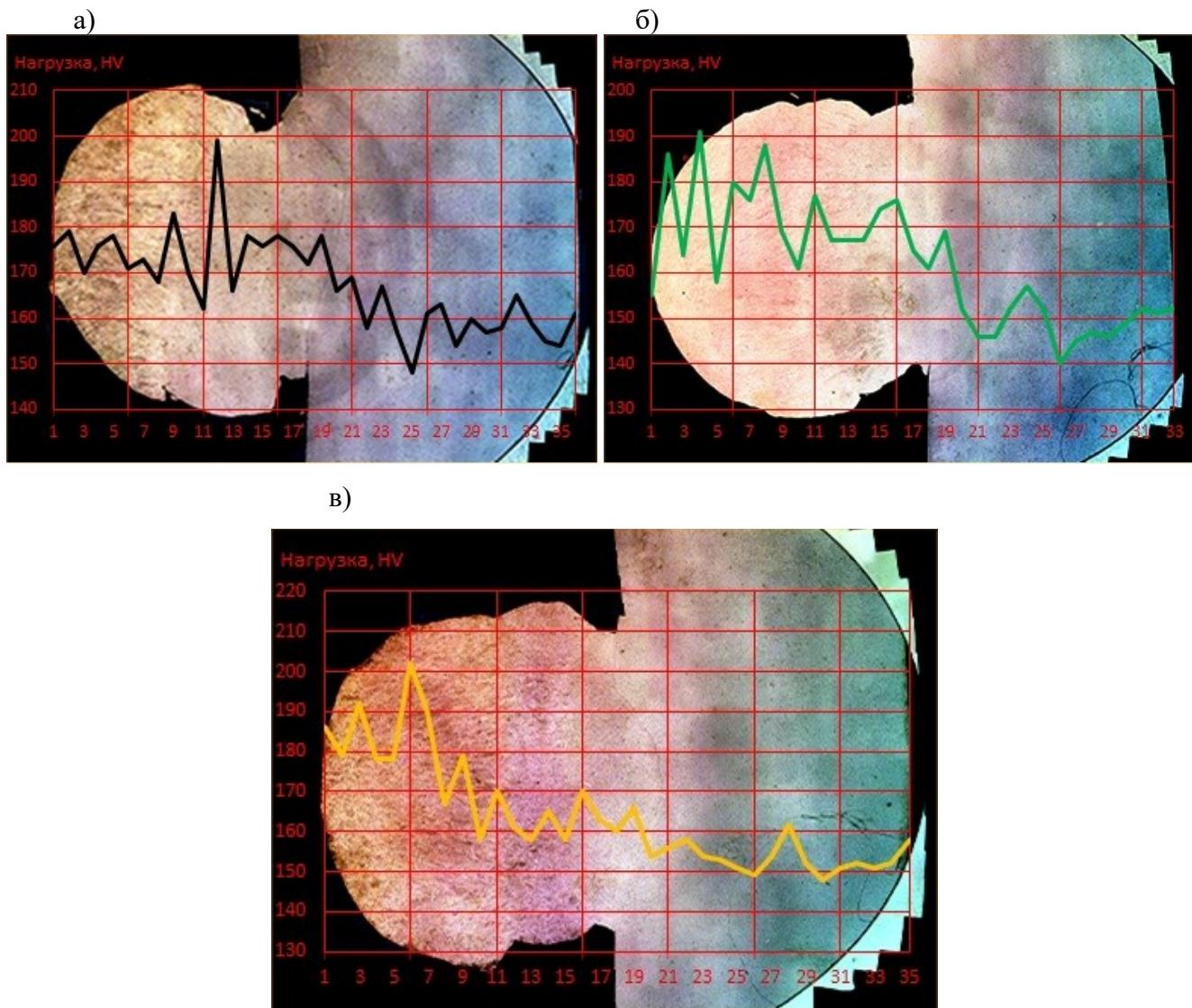


Рис. 4. Распределение микротвёрдости в поперечном сечении образцов № 1 (а), № 2 (б) и № 3 (в)

Согласно полученным графикам выявлено, что распределение микротвёрдости по сечению увеличивается от нижних слоёв к верхним, что можно объяснить изменением времени термического воздействия на разные слои наплавки. При изготовлении заготовок следует учитывать увеличение зон термического влияния в зависимости от техники наплавки и заметное изменение структуры металла по сечению детали, а также усложнение механической обработки конечной детали.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Велесевич, Е. В. Исследование свойств покрытий, полученных наплавочными электродами на основе минерального сырья дальневосточного региона / Е. В. Велесевич, Е. А. Лихачев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № I-1 (29). – С. 42-48.
2. Математическое моделирование процессов, протекающих во взаимодействующих друг с другом средах / В. И. Одиноков, А. М. Шпилев, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев, А. В. Свиридов // Прикладная механика и техническая физика. – 2017. – № 8. – С. 23.
3. Evstigneev A. I. Theoretical prediction of crack formation in axisymmetric multilayer shell molds / A. I. Evstigneev, A. V. Sviridov, E. A. Dmitriev, V. V. Petrov, V. I. Odinokov // Materials Science Forum. 2016. T. 857. P. 573-577.
4. Zhang Y. M. Automated system for welding-based rapid prototyping / Y. M. Zhang, P. Li, Y. Chen, A. T. Male // Mechatronics. 2002. № 12(1). P. 37-53.

# Содержание

## УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Александров С. Ю.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ КРИСТАЛЛИЗатора  
УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ ПРИ СВОБОДНО ВРАЩАЮЩЕМСЯ  
ПОГРУЖНОМ СТАКАНЕ.....4

Амосова Е. В., Кикелин Д. С.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗОН ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВЗВЕСЬЮ  
И ДРУГИМИ ПРИМЕСЯМИ.....8

Андранинов И. К.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ  
ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОВОГО И СИЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ.....14

Боровик К. Г., Леонтьев Д. В., Харитонов Д. И.

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ЧИСЛЕННОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ПОРИСТЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ.....21

Вейна В. С., Морковин А. В.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ТИПА МНОГОСЛОЙНЫЙ ПЕРСЕПТРОН  
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ФУНКЦИИ ПРОГИБАБАЛКИ  
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ НАГРУЗКИ .....

Иванов С. Н., Ким К. К., Просолович А. А., Хисматулин М. И.

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ  
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ .....

Канашин И. В., Григорьева А. Л., Хромов А. И., Григорьев Я. Ю., Машевский В. А.

РАСТЯЖЕНИЕ СЖИМАЕМОЙ ПОЛОСЫ С НЕПРЕРЫВНЫМ ПОЛЕМ СКОРОСТЕЙ  
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ .....

Кузьмичев Е. Н., Николенко С. В., Власенко В. Д., Дроздов Е. А

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА  
ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПЕРЕПЛАВЕ .....

Младова Т. А., Муллер Н. В.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ СВАИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ  
НАКЛОННОЙ ВЫДЕРГИВАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ .....

Рубан К. Е., Бахматов П. В.

РАСЧЁТ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ ЗАВИСИМОСТЬ  
ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНЫХ ШВОВ СПЛАВА АМг5 .....

Соснин А. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА  
ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЁННОЙ ПОКОВКИ В УСТРОЙСТВЕ ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА .....

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

Бабко А. П., Муравьев В. И.

ЗАВИСИМОСТЬ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО СВАРОЧНОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ И КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ СВАРНОГО ШВА ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА .....

Белан Б. Р., Богданова Н. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н.

НОВЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОКСИДНОГО СЛОЯ  
ПРОТЯЖЁННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБНЫХ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ.....

Богданова Н. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н.

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЁННОЙ ПРЕССОВКИ ИЗ ВОСКООБРАЗНОГО  
МАТЕРИАЛА ПРИ ЭКСТРУЗИОННОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ПОРОШКОВОГО ТЕЛА .....

Гостевская А. Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ  
НА ЗОНУ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ РЕЛЬСОВ МАРКИ Э76ХФ .....

Григорьев В. В., Муравьев В. И., Бахматов П. В.

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ НЕРАЗЪЁМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ  
ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ  
СИЛОВЫХ ТИТАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ,  
ВЫПОЛНЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ .....

Иванкова Е. П.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ  
И СТРУКТУРЫ МНОГОСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ.....85

Бахматов П. В., Фролов А. В., Кравченко А. С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНИКИ МАНИПУЛИРОВАНИЯ РАБОЧИМ ТОРЦОМ  
ЭЛЕКТРОДА ПРИ TIG СВАРКЕ НА КАЧЕСТВО ФОРМИРОВАНИЯ ШВА.....90

Красиков Н. А., Щелкунов Е. Б.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ  
В ПАКЕТАХ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....95

Попов А. В., Предеин В. В., Комаров О. Н.

ВЛИЯНИЕ ПОДГОТОВКИ ШИХТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ  
СВОЙСТВ ОЛИВОК, ПОЛУЧАЕМЫХ АЛЮМОТЕРМИЕЙ.....98

Попов А. В., Предеин В. В., Комаров О. Н., Барсукова Н. В.

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ,  
ПОЛУЧЕННЫХ АЛЮМОТЕРМИЕЙ С ДОБАВЛЕНИЕМ В СОСТАВ ТЕРМИТНОЙ  
СМЕСИ ШЕЕЛИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА .....

Саблин П. А., Щетинин В. С.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МЕХАНООБРАБОТКИ С ПОМОЩЬЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
БЕСКОНТАКТНЫХ ОПОР .....

Старцев Е. А., Бахматов П. В., Михайлов К. А., Соболев Б. М.

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ ПОРОШКОВОЙ  
СВАРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ НА ПРОЦЕСС ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ.....107

Ткачева А. В., Абашкин Е. Е.

ВЛИЯНИЕ СОВМЕЩЁННОГО ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ В НЕРАЗЪЁМНОМ СОЕДИНЕНИИ ИЗ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ .....

Хабибов М. М., Рубан К. Е., Бахматов П. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОЙ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ.....112

Научное издание

Учёные записки КнАГТУ

2021 № III (51)

Науки о природе и технике

Выпускающий редактор

С. Н. Иванов

Подписано в печать 15.06.2021

Дата выхода в свет 18.06.2021

Формат А4.

Бумага офисная 80 г/м<sup>2</sup>.

Усл. печ. л. 13,63.

Уч.-изд. л. 17,18.

Тираж 200. Заказ 30355.

Отпечатано в типографии

КнАГУ

681013,

г. Комсомольск-на-Амуре,

пр. Ленина, д. 27.

