

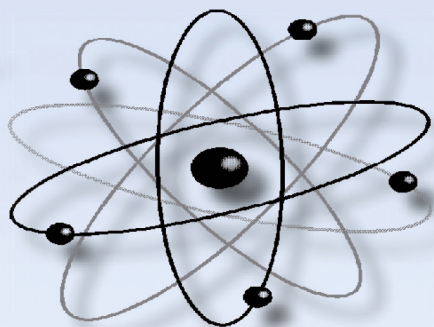
Учёные записки

ISSN 2076-4359

№ V (85)

2025

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



Науки о природе и технике

16+



Рукописи проходят обязательное рецензирование.

Отделы журнала «Управление», «Вычислительная техника и информатика», «Машиностроение», «Культурология и искусствоведение» включены в перечень 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 = Učēnye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta

Уважаемые авторы, пожалуйста, присылайте свои материалы на адрес электронной почты: journal@knastu.ru

Правила оформления материалов размещены на странице журнала «Учѐные записки КНАГУ», находящейся на сайте <https://uzknastu.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) 528-548

Адрес редакции: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Комсомольская, д. 50, ауд. 508

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 , доктор технических наук, профессор. E-mail: diss@knastu.ru
Заместитель главного редактора журнала:	Александр Витальевич Космынин , доктор технических наук, профессор. E-mail.ru: avkosm@knastu.ru
Выпускающий редактор серии «Науки о природе и технике»:	Евгения Павловна Иванкова , кандидат технических наук, доцент. E-mail: peit@knastu.ru
Выпускающий редактор серии «Науки о человеке, обществе и культуре»:	Галина Алексеевна Шушарина , кандидат филологических наук, доцента. E-mail: lmk@knastu.ru
Литературный редактор:	Татьяна Николаевна Карпова . E-mail: karpovat@list.ru
Технический редактор:	Татьяна Николаевна Карпова . E-mail: karpovat@list.ru
Перевод на английский язык:	Галина Алексеевна Шушарина , кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru
Дизайн и верстка:	Оксана Вадимовна Приходченко , кандидат технических наук. E-mail: cik@knastu.ru
Менеджер информационных ресурсов:	Татьяна Владимировна Степанова . E-mail: osnid@knastu.ru
Администратор сайта:	Оксана Вадимовна Приходченко , кандидат технических наук. E-mail: cik@knastu.ru

Серия: «Науки о природе и технике»

Ответственный секретарь серии «Науки о природе и технике»	Евгения Павловна Иванкова , кандидат технических наук, доцент. E-mail: peit@knastu.ru
---	---

Отделы:

1. Авиационная и ракетно-космическая техника (2.5.13 - Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов)	Сергей Иванович Феоктистов , доктор технических наук, профессор. E-mail: ssf@knastu.ru Сергей Борисович Марьин , доктор технических наук, доцент. E-mail: as@knastu.ru
2. Энергетика (2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы)	Константин Константинович Ким , доктор технических наук, профессор. E-mail: kimkk@inbox.ru Александр Владимирович Сериков , доктор технических наук, профессор. E-mail: em@knastu.ru Сергей Николаевич Иванов , доктор технических наук, доцент. E-mail: snivanov57@mail.ru
3. Управление (2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами)	Вячеслав Алексеевич Соловьев , доктор технических наук, профессор. E-mail: kepapu@knastu.ru Андрей Юрьевич Торгашов , доктор технических наук, доцент. E-mail: torgashov@iacp.dvo.ru
4. Вычислительная техника и информатика (1.2.2 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)	Валерий Иванович Одионов , доктор технических наук, профессор. E-mail.ru: osnid@knastu.ru Александр Витальевич Космынин , доктор технических наук, профессор. E-mail.ru: avkosm@knastu.ru
5. Машиностроение (2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки)	Борис Яковлевич Мокрицкий , доктор технических наук, профессор. E-mail: boris@knastu.ru Владимир Сергеевич Щетинин , доктор технических наук, доцент. E-mail: schetynin@mail.ru
6. Материаловедение и химические технологии (2.6.17 - Материаловедение)	Эдуард Анатольевич Дмитриев , доктор технических наук, профессор, E-mail: rector@knastu.ru Олег Викторович Башков , доктор технических наук, профессор, E-mail: bashkov_ov@mail.ru
7. Математика и механика (1.1.8 - Механика деформируемого твердого тела)	Анатолий Александрович Буренин , доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН. E-mail: burenin@iacp.dvo.ru Константин Сергеевич Бормотин , доктор физико-математических наук, доцент. E-mail: as@knastu.ru Олег Викторович Башков , доктор технических наук, профессор, E-mail: bashkov_ov@mail.ru Олег Евгеньевич Сысоев , доктор технических наук, профессор, E-mail: sia@knastu.ru

Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»

Ответственный секретарь серии «Науки о человеке, обществе и культуре»	Галина Алексеевна Шушарина , кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru
---	--

Отделы:

1. Культурология и искусствоведение (5.10.1 - Теория и история культуры, искусства)	Яна Станиславовна Крыжановская , доктор культурологии, доцент. E-mail: krijanowskaia.yana2012@yandex.ru Евгения Валерьевна Савелова , доктор философских наук, кандидат культурологии, доцент. Виктория Юрьевна Прокофьева , доктор филологических наук, профессор. Илья Игоревич Докучаев , доктор философских наук, профессор.
2. Психология и педагогика (5.8.1 - Общая педагогика, история педагогики и образования)	Татьяна Евгеньевна Наливайко , доктор педагогических наук, профессор. E-mail: tenal@knastu.ru
3. История (5.6.1 - Отечественная история)	Жанна Валерьяновна Петрунина , доктор исторических наук, профессор. E-mail: petrunina71@bk.ru, history@knastu.ru

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

Содержание

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Авдонин К. А.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛИРОВАНИЯ АЛМАЗОПОДОБНОГО PVD-ПОКРЫТИЯ КРАЦЕВАНИЕМ	4
--	---

Забродин А. В., Хонина О. И.

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ «УЗКИХ МЕСТ» В РАБОТЕ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ ПО ДАННЫМ ТЕПЛОВЫХ КАРТ	11
---	----

Сеченов П. А.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ РЕКИ АМУР	17
---	----

Фролов Д. О., Андрианов И. К.

ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА В КРИВОЛИНЕЙНОМ КАНАЛЕ НА ОСНОВАНИИ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ	24
---	----

Нигматуллин К. Р., Забродин А. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ РОБОТОВ И ЧАТ-БОТОВ КАК СРЕДСТВО РЕШЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ	28
--	----

Григорьев Я. Ю., Альхименко И. Н., Григорьева А. Л.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДЛЯ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЛАСТЕЙ	35
---	----

Петрова А. Н., Фролов Д. О.

ГИБРИДНЫЕ МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ И ОТКРЫТЫХ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ЭМБЕДДИНГОВ	41
--	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Бахматов П. В., Фролов А. В., Клешина О. Н.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ОДНОПРОХОДНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ТИТАНОВЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ВЫСОКИЕ ЗНАЧЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	46
--	----

Клешина О. Н., Плетнев Н. О., Кочнев Е. А.

ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ ТИТАНОВЫХ ЛОПАТОК ИМПЕЛЛЕРА	55
--	----

Григорьев В. В., Поправко Д. Г., Клешина О. Н.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ20, ВЫПОЛНЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ	61
--	----

Саблин П. А., Косачев К. Д.

ОПТИМИЗАЦИЯ СПОСОБА ПРИМЕНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ	74
--	----

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Бахматов П. В., Старцев Е. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКАНИЯ ПРЕССОВАННЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА В УСЛОВИЯХ АВТОВАКУУМА, ФОРМИРУЕМОГО ГЕТТЕРНОЙ СРЕДОЙ	79
---	----

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.

ПРЕДЕЛЬНЫЕ КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВСЕЛЕННОЙ	85
--	----

Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.

МОДЕЛЬ АТОМА И МЕХАНИЗМА СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНА	97
--	----

Авдонин К. А.
K. A. Avdonin

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛИРОВАНИЯ АЛМАЗОПОДОБНОГО PVD-ПОКРЫТИЯ КРАЦЕВАНИЕМ

ANALYSIS OF THE RESULTS OF MATHEMATICAL MODELING OF POLISHING DIAMOND-LIKE PVD COATING PROCESS BY SCRUBBERING

Авдонин Кирилл Андреевич – аспирант Саратовского государственного технического университета имени Ю. А. Гагарина (Россия, Саратов); 410054, Саратовская обл., г. Саратов, ул. Политехническая, 77. E-mail: kirill.avdonin@mail.ru.

Kirill A. Avdonin – Postgraduate Student, Saratov State Technical University named after Yu. A. Gagarin (Russia, Saratov); 410054, Saratov region, Saratov, St. Politekhnikeskaya, 77. E-mail: kirill.avdonin@mail.ru.

Аннотация. В статье представлен анализ результатов математического моделирования процесса полирования алмазоподобного PVD-покрытия методом крацевания. На основе математического моделирования разработана компьютерная модель процесса крацевания, которая позволила выполнить численный анализ и наглядно представить его в виде графических зависимостей. Показано, что наиболее значимыми факторами процесса полирования являются геометрические параметры металлических нитей инструмента, исходные параметры микрорельефа обрабатываемой поверхности, окружная скорость вращения инструмента и глубина взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью. Установлено, что зависимость шероховатости поверхности от времени носит асимптотический характер. Также показано, что при уменьшении высоты микронеровностей увеличивается радиус округления их вершин, что способствует повышению опорной способности поверхности покрытия.

Summary. The article presents the analysis of the results of mathematical modeling of polishing a diamond-like PVD coating process by the brushing method. Based on the mathematical modeling, a computer model of the brushing process has been developed, which made it possible to perform a numerical analysis and clearly present it in the form of graphical dependencies. It is shown that the most significant factors of the polishing process are the geometric parameters of the metal threads of the tool, the initial parameters of the microrelief of the treated surface, the peripheral speed of rotation of the tool and the depth of interaction of the tool with the treated surface. It has been established that the dependence of the surface roughness on time is asymptotic. It is also shown that with a decrease in the height of microroughness's, the radius of rounding of their vertices increases, which contributes to an increase in the supporting capacity of the coating surface.

Ключевые слова: алмазное покрытие, полирование, шероховатость поверхности, поликристаллический алмаз, PVD-покрытие.

Key words: diamond coating, polishing, surface roughness, polycrystalline diamond, PVD coating.

УДК 621.7.09

Введение. Нетривиальным решением проблемы полирования твёрдого алмазоподобного PVD-покрытия является использование крацевания для осуществления этого процесса [1–4]. Необычность данного процесса состоит в том, что при крацевании, в отличие от традиционных процессов обработки алмазоподобных покрытий инструментом высокой твёрдости, используется инструмент низкой твёрдости в виде гибких металлических нитей, не имеющих острых граней и режущих кромок. Чтобы понять и обосновать возможность применения процесса крацевания для полирования алмазоподобного покрытия, на основе ранее выполненного исследования в области теории удара [5–19], теории хрупкого разрушения твёрдых тел Гриффитса, теории локального контакта упругих тел Герца и закономерностей теории сопротивления материала была построена математическая модель этого процесса [20] и показана его высокая эффективность. Было установлено, что эффективность процесса крацевания обеспечивается тем, что при его применении удачно используется самое «слабое» свойство алмазоподобного покрытия, а именно его хрупкость.

Массовые удары металлических нитей с высокой скоростью о вершинки микронеровностей обрабатываемой поверхности осуществляют микроскопические сколы этих вершинок, в результате которых высота микронеровностей постепенно уменьшается, а радиус округления вершинок микронеровностей возрастает. Ниже приведён анализ этого процесса.

Результаты исследования. В результате микроскопических скалываний вершинок микронеровностей от ударов по ним металлических нитей получается рекуррентная зависимость шероховатости поверхности от числа таких ударов:

$$R_s(c_t) = R_{so} - \sum_{i=1}^{c_t} \delta_{vi}(R_{s(i-1)}),$$

где $R_s(c_t)$ – высота микронеровностей, получаемая после числа c_t ударов металлических нитей в течение времени t полирования о среднестатистическую микроскопическую вершину обрабатываемой поверхности, мм; R_{so} – исходная высота микронеровностей, мм; i – порядковый номер удара; $R_{s(i-1)}$ – текущее значение высоты микронеровностей, предшествующее i -му удару, мм; $\delta_{vi}(R_{s(i-1)})$ – величина микроскопического скалывания вершинки при i -м ударе, зависящая от текущего значения высоты микронеровности, мм.

Для осуществления компьютерного анализа использовались следующие значения параметров: диаметр инструмента $D = 150$ мм; частота вращения инструмента $n_k = 50 \dots 150$ с⁻¹; длина нитей инструмента $L_n = 20 \dots 40$ мм; диаметр нитей инструмента $d_n = 0,1 \dots 0,2$ мм; материал нитей – сталь 40; плотность их расположения на поверхности инструмента $\rho_n = 0,8$ шт./мм²; расстояние центра массы нити до точки удара $b = 0,5L_n$ мм; коэффициент трения скольжения нити по поверхности поликристаллического алмазного покрытия $f = 0,1$; коэффициент Пуассона $\mu_n = 0,31$ и модуль упругости материала нити $E_n = 19\,000$ МПа. Наружный диаметр детали $d = 10$ мм; частота её вращения $n_d = 1$ с⁻¹; плотность расположения микронеровностей на поверхности поликристаллического алмазного покрытия $\rho_d = 1000$ шт./мм²; средняя высота микронеровностей покрытия $R_{so} = 0,32$ мкм; коэффициент Пуассона $\mu_a = 0,42$, модуль упругости материала покрытия $E_a = 88\,254$ МПа.

На рис. 1 представлена зависимость радиуса округления вершин микронеровностей $r_v(R_s, \rho_d)$ от высоты микронеровностей R_s , образуемых в ходе полирования и плотности расположения вершин микронеровностей ρ_d на поверхности поликристаллического алмазного покрытия.

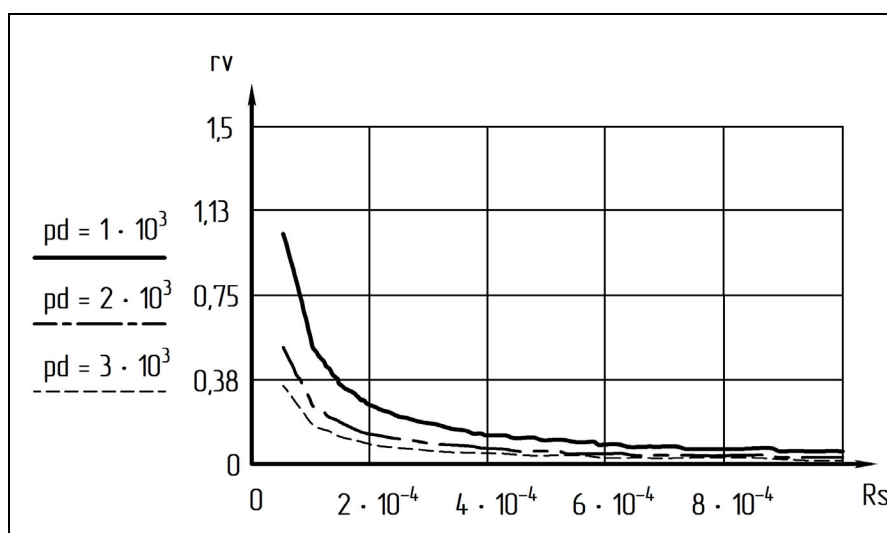


Рис. 1. Зависимость радиуса округления вершин микронеровностей $r_v(R_s, \rho_d)$, мм, алмазного покрытия от высоты микронеровностей R_s , мм, обрабатываемой поверхности при различной плотности расположения вершин микронеровностей ρ_d , шт./мм²

Как видно из рис. 1, в процессе полирования по мере снижения высоты микронеровностей радиус округления их вершинок существенно возрастает. Это увеличивает несущую способность поверхности, т. к. снижает контактные напряжения между контактирующими поверхностями сопрягаемых деталей в процессе их эксплуатации под рабочей нагрузкой.

Из рис. 1 также следует, что с возрастанием плотности расположения вершин микронеровностей радиус округления их вершин уменьшается. Обычно поликристаллическое алмазное покрытие имеет высокую плотность расположения вершин микронеровностей, и поэтому после полирования обладает высокой несущей способностью.

На рис. 2 представлена зависимость величины скола вершинок микронеровностей $\delta v(R_s, d_n)$, мм, от высоты микронеровностей получаемой поверхности R_s , мм, и диаметра нитей инструмента d_n , мм. Как видно из рис. 2, от ударов нитей инструмента с вершинок микронеровностей скалываются наночастицы, что и приводит к постепенному снижению высоты микронеровностей. Сами вершины микронеровностей тоже имеют микронеровности второго порядка малости, которые и подвергаются скалыванию в процессе полирования металлической щёткой.

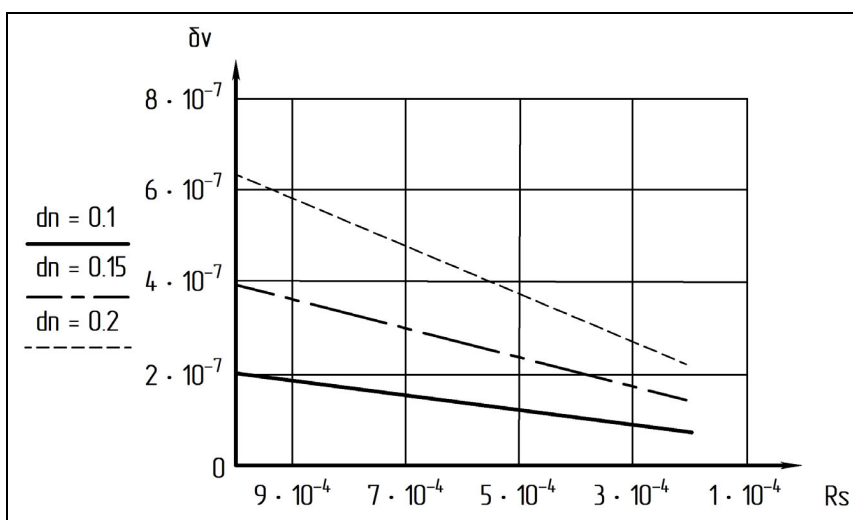


Рис. 2. Зависимость величины скола вершинок микронеровностей $\delta v(R_s, d_n)$, мм, от высоты микронеровностей получаемой поверхности R_s , мм, и диаметра нитей инструмента d_n , мм

Но при большом числе ударов, несмотря на малую величину скалывающихся частиц, суммарная величина скалывания становится соизмеримой с высотой микронеровностей, что и способствует снижению шероховатости.

Из рис. 2 видно, что с уменьшением высоты микронеровностей в процессе полирования интенсивность скалывания микронеровностей снижается. Это объясняется тем, что, как было показано выше, с уменьшением высоты микронеровностей увеличивается радиус округления их вершин, что снижает контактные напряжения в процессе удара, а следовательно, и степень разрушения вершинки в процессе удара.

Весьма существенно величина скалывания вершинок зависит от диаметра нитей инструмента. Объясняется это тем, что с возрастанием диаметра нитей увеличивается действие сразу двух факторов, а именно их массы и жёсткости. С возрастанием массы увеличивается сила удара, а с увеличением жёсткости уменьшается время удара, уменьшается разница между начальной и конечной скоростью удара, что повышает ударный импульс. Суммарное действие этих двух факторов оказывает значительное влияние на величину скалывания микронеровностей.

На рис. 3 показана зависимость величины скалывания вершин микронеровностей от их высоты и длины нитей инструмента. Как видно из графика, с уменьшением высоты микронеровно-

стей величина скалывания микроскопических вершин снижается, но с уменьшением длины нитей инструмента она становится значительно выше.

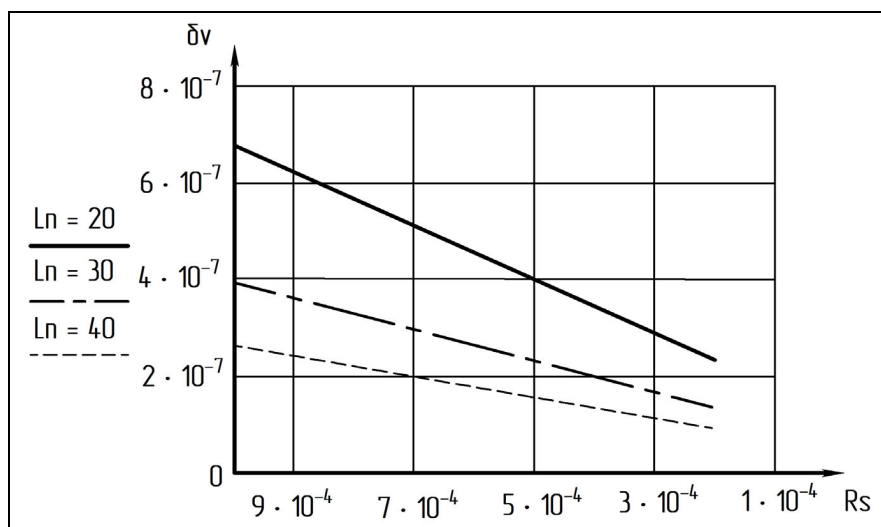


Рис. 3. Зависимость величины скалывания вершин микронеровностей $\delta v(R_s, L_n)$, мм, от высоты вершин R_s , мм, и длины нитей L_n , мм, рабочего инструмента

Объясняется это тем, что с уменьшением длины нитей инструмента увеличивается их жёсткость, а следовательно, возрастает время удара и разница между начальной и конечной скоростями удара. Хотя с уменьшением длины нитей снижается их масса, что влечёт за собой снижение величины ударного импульса, но фактор жёсткости оказывается более значимым. Поэтому с уменьшением длины нитей величина скалывания вершин микронеровностей возрастает.

На рис. 4 представлена зависимость среднего арифметического отклонения микроскопического профиля обрабатываемой поверхности от времени обработки при различных значениях длины нитей инструмента.

Как и следовало ожидать, с возрастанием времени обработки шероховатость поверхности поликристаллического алмазного покрытия уменьшается. Причём с уменьшением длины нитей инструмента снижение шероховатости поверхности покрытия получается более значительным.

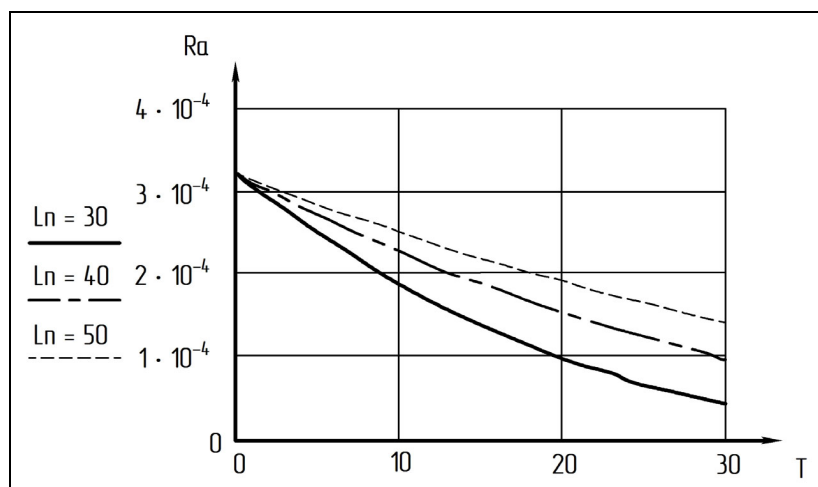


Рис. 4. Зависимость среднего арифметического отклонения микроскопического профиля обрабатываемой поверхности $Ra(\tau, L_n)$, мм, от времени обработки τ , с, при различных значениях длины нитей инструмента L_n , мм

Объясняется это тем, что с возрастанием времени обработки увеличивается суммарная величина скалывания микроскопических вершин от ударов нитей инструмента.

С уменьшением длины нитей инструмента, как показано выше, величина скалывания микроскопических вершин возрастает. Это и приводит к более значительному снижению исходной шероховатости обрабатываемой поверхности.

На рис. 5 представлена зависимость шероховатости поверхности от времени обработки при различных значениях диаметра нитей инструмента.

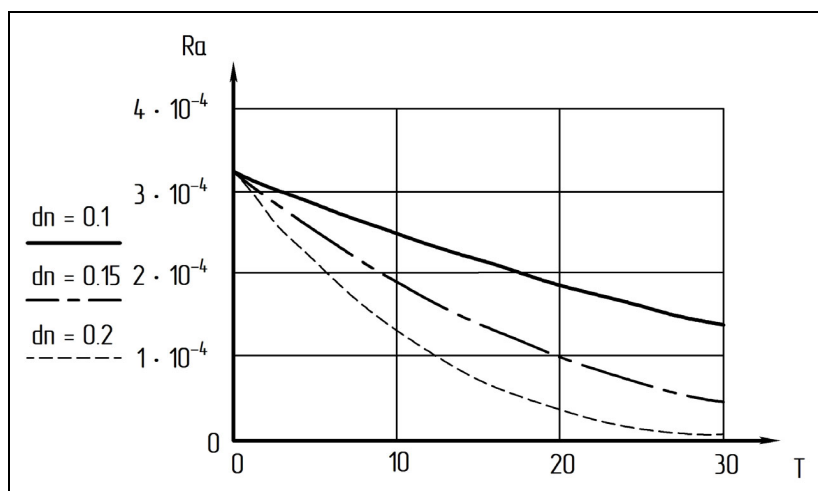


Рис. 5. Зависимость среднего арифметического отклонения микроскопического профиля обрабатываемой поверхности $Ra(\tau, d_n)$, мм, от времени обработки τ , с, при различных значениях диаметра нитей инструмента d_n , мм

Как видно из рис. 5, с возрастанием времени обработки шероховатость поверхности снижается, но с повышением диаметра нитей инструмента это изменение получается более значительным. Объясняется это тем, что с увеличением диаметра нитей инструмента повышается их жёсткость и возрастает масса, что приводит к возрастанию величины сколов микронеровностей обрабатываемой поверхности под действием ударов нитей. Это и обеспечивает более интенсивное уменьшение шероховатости поверхности в процессе обработки.

К числу наиболее существенных факторов, влияющих на шероховатость полированной поверхности, относится также окружная скорость инструмента. На рис. 6 представлена зависимость шероховатости обработанной поверхности от времени обработки при различной окружной скорости вращения инструмента.

Из рис. 6 следует, что при больших значениях окружной скорости инструмента интенсивность снижения шероховатости обрабатываемой поверхности существенно повышается. Это следует из теории удара, в соответствии с которой увеличение скорости удара при неизменном соотношении между начальной и конечной скоростями удара приводит к возрастанию ударного импульса. Но с возрастанием начальной скорости удара, как правило, увеличивается и величина её отношения к конечной скорости удара, что также способствует возрастанию величины скола вершин микронеровностей. Эти факторы приводят к значительному влиянию окружной скорости инструмента на шероховатость полированной поверхности поликристаллического алмазного покрытия деталей.

Таким образом, предложенная математическая модель позволяет глубже понять сложный механизм процесса скалывания вершин микронеровностей в процессе полирования алмазного покрытия металлической щёткой, выявить новые закономерности этого процесса и выполнить анализ влияния различных факторов на шероховатость полированной поверхности.

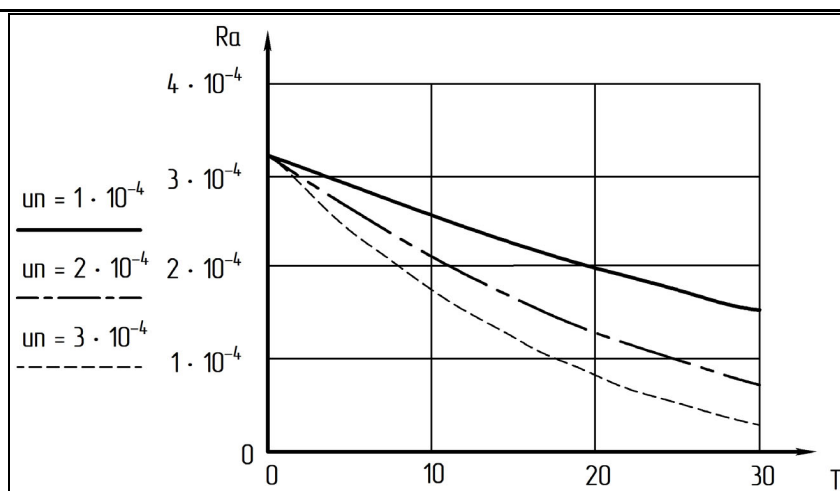


Рис. 6. Зависимость среднего арифметического отклонения микроскопического профиля обрабатываемой поверхности $Ra(\tau, u_n)$, мм, от времени обработки τ , с, при различных значениях окружной скорости инструмента u_n , мм/с

Заключение. Выполненный анализ влияния технологических факторов на шероховатость поверхности алмазоподобного покрытия показал, что наиболее значимыми факторами процесса полирования являются геометрические параметры металлических нитей инструмента, исходные параметры микрорельефа обрабатываемой поверхности, окружная скорость вращения инструмента и глубина взаимодействия инструмента и обрабатываемой поверхности детали. Установлено также, что зависимость от времени получаемой при полировании шероховатости поверхности носит асимптотический характер. В первое время обработки шероховатость значительно снижается, а затем скорость изменения её значений уменьшается. Показано также, что с уменьшением высоты микронеровностей увеличивается радиус округления их вершин, что повышает опорную способность поверхности покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Королев, А. В. Технология полирования тонкоплёночного алмазного покрытия хрупким разрушением микронеровностей / А. В. Королев, И. В. Синева, Д. Н. Охлупин // Учёные записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2020. – № 1 (67). – С. 274-279.
2. Результаты дискретного полирования поликристаллического алмазного покрытия инструментов / А. В. Королев, Д. Н. Охлупин, И. В. Синева, К. А. Авдонин // Учёные записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2022. – № 3 (77). – С. 156-162.
3. Полирование деталей с алмазным покрытием различными режимами обработки / А. В. Королев, Д. Н. Охлупин, И. В. Синева, К. А. Авдонин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – Вып. 9. – С. 569-574.
4. Влияние режимов полирования на шероховатость деталей с алмазным покрытием / А. В. Королев, Д. Н. Охлупин, И. В. Синева, К. А. Авдонин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2023. – № 1 (272). – С. 22-25.
5. Аппель, П. Теоретическая механика. Т. 2 / П. Аппель. – М.: Физматгиз, 1960. – 487 с.
6. Виттенбург, И. Динамика системы твёрдых тел / И. Виттенбург. – М.: Мир, 1980. – 292 с.
7. Гольдсмит, В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел / В. Гольдсмит. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1965. – 448 с.
8. Иванов, А. П. Динамика систем с механическими соударениями / А. П. Иванов. – М.: Международная программа образования, 1997. – 336 с.
9. Кобринский, А. Е. Виброударные системы (динамика и устойчивость) / А. Е. Кобринский, А. А. Кобринский. – М.: Наука, 1973. – 592 с.
10. Нагаев, Р. Ф. Механические процессы с повторными затухающими соударениями / Р. Ф. Нагаев. – М.: Наука, 1985. – 200 с.



11. Ньютон, И. Математические основы натурфилософии / И. Ньютон // Собр. тр. акад. А. Н. Крылова. Т. 7. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1936. – С. 1-676.
12. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механического удара / Я. Г. Пановко. – М.: Наука, 1977. – 232 с.
13. Раус, Э. Дж. Динамика системы твёрдых тел. Т. 1 / Э. Дж. Раус. – М.: Наука, 1983. – 463 с.
14. H. Hertz, Über die Berührung fester elastischer Körper, Journal für die reine und angewandte. Mathematik 92, 156-171 (1881).
15. Hunt K. H., Crossley F. R. E. Coefficient of Restitution Interpreted as Damping in Vibroimpact. ASME Journal of applied mechanics, 1975, № 6, pp. 440-445.
16. Poisson S. D. Traete de mecanique. Bruxeller, Naumann, 1838, 447 p.
17. Дягель, Р. В. О нелинейной вязкоупругой модели коллинеарного удара Ханта-Кроссли / Р. В. Дягель, В. В. Лапшин // Известия РАН. Механика твёрдого тела. – 2011. – № 5. – С. 164-173.
18. Плявниекс, В. Ю. Расчёт косоугольного удара о препятствие. Вопросы динамики и прочности / В. Ю. Плявниекс. – Рига: Зинатне, 1969. – С. 87-109.
19. Лапшин, В. В. Удар тела о препятствие / В. В. Лапшин // Наука и инновации: инженерный журнал. – 2013. – URL: <http://engjournal.ru/catalog-eng-teormech-1134.html> (дата обращения: 10.05.2023). – Текст: электронный.
20. Исследование модели удара металлической нити о вершину микронеровности алмазного покрытия / А. В. Королев, Д. Н. Охлупин, И. В. Синев, К. А. Авдонин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 12. – С. 225-230.

Забродин А. В., Хонина О. И.
АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ
«УЗКИХ МЕСТ» В РАБОТЕ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ ПО ДАННЫМ ТЕПЛОВЫХ КАРТ

Забродин А. В., Хонина О. И.
A. V. Zabrodin, O. I. Khonina

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ «УЗКИХ МЕСТ» В РАБОТЕ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ ПО ДАННЫМ ТЕПЛОВЫХ КАРТ

AN ALGORITHMIC SOLUTION FOR AUTOMATED BOTTLENECK DIAGNOSTICS IN STORAGE SYSTEMS BASED ON HEAT MAP DATA

Забродин Андрей Владимирович – кандидат исторических наук, доцент кафедры «Информатика и вычислительная техника» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9. E-mail: zabrodin@pgups.ru.

Andrej V. Zabrodin – PhD in History, Associate Professor, Computer Science and Computer Engineering Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Saint-Petersburg); 190031, Russia, Saint Petersburg, 9, Moskovsky Ave. E-mail: zabrodin@pgups.ru.

Хонина Ольга Игоревна – студент 4-го курса Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9. E-mail: olga.khonina.0311@mail.ru.

Olga I. Khonina – 4rd Year Student, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Saint-Petersburg); 190031, Russia, Saint Petersburg, 9, Moskovsky Ave. E-mail: olga.khonina.0311@mail.ru.

Аннотация. Современные системы хранения данных (СХД) требуют оперативных средств диагностики сбоев, особенно при высокой сетевой нагрузке. Цель данного исследования – разработка алгоритма автоматизированного анализа тепловых карт, получаемых в ходе мониторинга СХД. Основная гипотеза заключается в возможности построения математической модели, способной выявлять и классифицировать аномалии на основе плотности распределения событий и их частоты. В рамках исследования решены следующие задачи: построение картограмм с применением бинарных масок для подавления шумов, разработка модели анализа контуров плотности и формализация критериев оценки состояния системы. Предложенная методология основана на алгоритмах фильтрации, выделении зон повышенной активности и математическом анализе графиков. Экспериментальные результаты подтвердили эффективность подхода для обнаружения узких мест в работе СХД, что делает разработку перспективной для систем автоматизированного мониторинга серверной инфраструктуры.

Summary. Modern storage systems require rapid fault diagnosis tools, especially under high network load. The aim of this study is to develop an algorithm for the automated analysis of heat maps obtained during storage systems monitoring. The central hypothesis is that it is possible to construct a mathematical model capable of detecting and classifying anomalies based on the density and frequency of event distribution. The research addresses the following tasks: construction of cartograms using binary masks for noise suppression; development of a density contour analysis model and formalization of system state assessment criteria. The proposed methodology is based on filtering algorithms, identification of high-activity zones, and mathematical analysis of graphical data. Experimental results confirmed the effectiveness of the approach for detecting bottlenecks in storage systems operation, making the solution promising for use in automated server infrastructure monitoring systems.

Ключевые слова: сервер, СХД, тепловая карта, маска, контур, момент, собственный вектор, визуализация данных.

Key words: server, storage system, heat map, mask, contour, moment, eigenvector, data visualization.

УДК 004.4:0004.22

Введение. У заказчиков с развитой IT-инфраструктурой для хранения и обработки информации зачастую используются масштабируемые системы хранения данных (СХД), взаимодействующие с вычислительными узлами через общие сетевые ресурсы. При интенсивной нагрузке

на такие системы могут возникать «узкие места» (bottleneck), особенно в процессе чтения данных. Основные причины: рассогласование скоростей передачи данных на разных участках сети, «конкуренция» за ресурсы ввода-вывода или нестабильность общего сетевого взаимодействия. В результате наблюдаются задержки доступа к данным, ухудшение производительности и, как следствие, снижение устойчивости всей системы. Своевременное выявление подобных аномалий требует разработки специализированных инструментов визуального анализа и автоматизированной диагностики на основе данных мониторинга. Одним из таких инструментов являются тепловые карты, отражающие пространственно-временные закономерности в работе компонентов СХД. В исследуемом случае используются показания по скорости (KB/s, ось X), времени отклика (Svt (ms), ось Y) и количеству событий с подобными характеристиками, зафиксированными в ходе мониторинга. На тепловых картах мониторинга СХД нормальным считается распределение событий, характеризующееся равномерным увеличением плотности от левого нижнего угла к правому верхнему. Допускаются также случаи с отсутствием выраженного роста. Любые случаи, когда распределение событий выстраивается в вертикальные линии или направлено из левого верхнего в правый нижний угол может свидетельствовать о наличии узких мест работы системы.

Целью настоящего исследования является разработка алгоритмического решения для автоматизированного анализа тепловых карт и выделения зон потенциальных перегрузок на основе математических признаков и метрик плотности событий.

Методология решения задачи. Тепловая карта (heat map) – это способ визуализации данных, при котором числовые значения отображаются с использованием цветовой шкалы, отражающей их интенсивность или частоту [1].

Для автоматизации построения и анализа тепловых карт используется программный модуль, реализованный на языке Python.

Входные данные для анализа представлены в формате CSV-файлов, содержащих сведения о числе зафиксированных событий (Count), соответствующих определённым значениям скорости передачи данных (ось X) и времени отклика массива (ось Y).

Визуальное представление данных. Для визуализации картограммы используется функция scatter() из библиотеки matplotlib, где каждая точка на графике соответствует одной записи в исходном CSV-файле. Для визуализации используется логарифмическая шкала, необходимая для корректного отображения распределения данных на графике: линейная шкала в таких условиях «сжимает» значимые детали, делая большинство точек практически неразличимыми. Логарифмическая шкала позволяет отобразить как малые, так и большие значения (X и Y) с достаточной детализацией, улучшая читаемость карты и обеспечивая точную локализацию зон с потенциальными аномалиями.

Цветовая карта (colormap) – это способ отображения числовых значений с помощью градаций цвета. Визуализируя данные, она позволяет воспринимать различия в плотности событий, распределённых по координатам X и Y . В тепловой карте каждый цвет отражает определённый диапазон значений, задавая визуальную «интенсивность» той или иной области. Каждому значению Count сопоставляется определённый цвет. Чем больше значение, тем темнее или насыщеннее цвет в выбранной палитре. В реализации данного программного обеспечения используется собственная цветовая карта, в которой значения распределяются по диапазонам, основанным на степенях двойки. На рис. 1 представлена теплокарта, основанная на исходных данных.

На этапе визуализации тепловой карты формируется серия изображений, каждое из которых представляет собой отдельный слой, отражающий плотность распределения событий в области. Для каждого слоя применяется бинарная маска – двумерная матрица, в которой каждому пикселю исходного изображения соответствует значение 1 или 0 в зависимости от выполнения заданного условия [2]. Значение 1 присваивается пикселям, удовлетворяющим критериям плотности, а 0 – всем остальным. Результатом становится бинарное (чёрно-белое) изображение, где белые пиксели обозначают релевантные зоны, а чёрные – остальную часть. Использование бинарных масок позволяет выделить значимые участки изображения и подавлять фоновые шумы, упрощая последующую обработку данных.

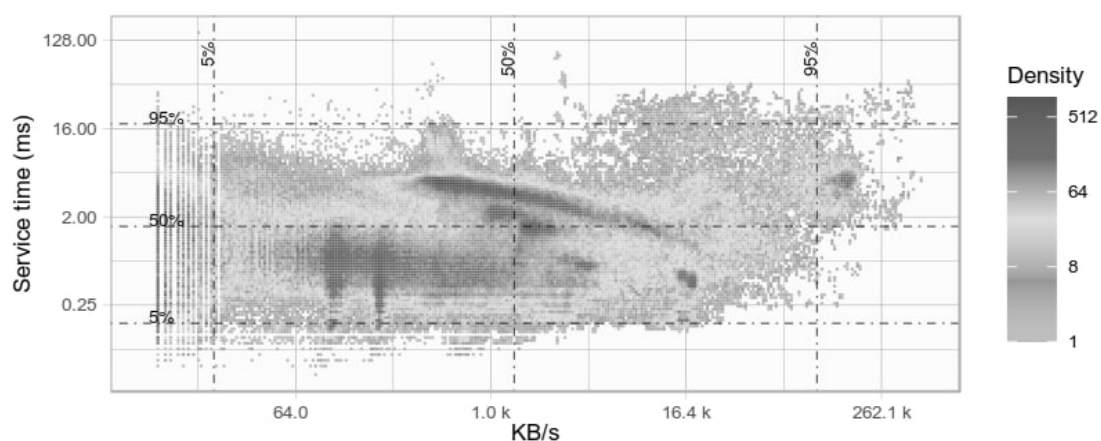


Рис. 1. Теплокарта мониторинга СХД

Поиск контуров. Контурирование изображения – это процесс обнаружения и извлечения границ или контуров объектов, присутствующих на изображении. Контурирование изображения включает в себя определение точек схожей интенсивности или цвета, которые образуют непрерывную кривую, тем самым очерчивая форму объектов [3]. Использование бинарной маски в данном случае значительно упрощает данный процесс: маска выделяет области с помощью чётких значений, позволяя обнаруживать контуры с высокой точностью и минимальной вычислительной затратой.

Для программной реализации обнаружения и предварительной обработки контуров на картограмме используется библиотека OpenCV. Исходное изображение преобразуется из цветового пространства RGB в HSV, что позволяет более точно выделить области с низкой насыщенностью и яркостью, характерные для плотных участков на тепловой карте. Далее задаются нижняя и верхняя границы для фильтрации пикселей: создаётся бинарная маска, в которой пиксели внутри заданных порогов получают значение 255 (белый), а остальные – 0 (чёрный). После к маске последовательно применяются морфологические операции (замыкание и открытие) с использованием квадратного ядра 3×3 . Эти операции позволяют устранить мелкие шумы, заполнить разрывы и сделать выделенные области более однородными и пригодными для анализа. Из обработанной маски извлекаются контуры с помощью функции `findContours`, площадь которых превышает порог `min_area`, что позволяет исключить незначительные фрагменты. На следующем этапе создаётся пустая маска (`clean_mask`), на которую наносятся только отфильтрованные контуры. После повторно вызывается `findContours`, чтобы извлечь контуры уже из «очищенной» маски, после чего они добавляются в общий список для дальнейшего анализа. На рис. 2 представлена теплокарта с визуализацией контуров.

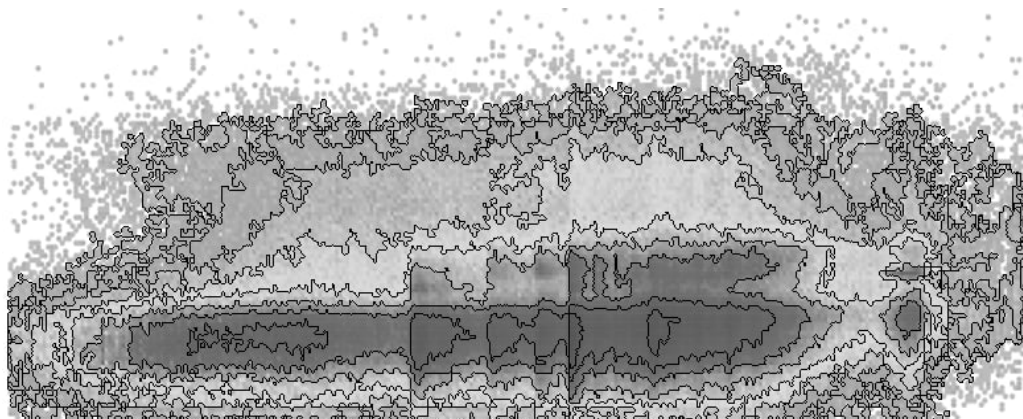


Рис. 2. Отображение контуров на картограмме

Анализ контуров. Первым шагом в процессе анализа является определение моментов контура. Моменты представляют собой числовые характеристики, которые описывают форму и пространственное распределение точек контура [4].

Момент 0-й степени для бинарного изображения – это сумма белых пикселей, которая определяется по формуле

$$M_{00} = \sum_x \sum_y I(x, y),$$

где $I(x, y)$ – интенсивность пикселя.

Моменты 1-й степени используются для вычисления центра масс (центроида) объекта. Они учитывают координаты пикселей и их интенсивность. Они описываются формулами

$$M_{10} = \sum_x \sum_y x * I(x, y),$$

$$M_{01} = \sum_x \sum_y y * I(x, y),$$

где x, y – координаты пикселя.

Моменты 2-й степени описывают распределение массы объекта относительно его центра масс. Они используются для анализа формы объекта: вытянутости, ориентации и других геометрических характеристик – и определяются следующими формулами:

$$M_{20} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^2 * I(x, y),$$

$$M_{02} = \sum_x \sum_y (y - \bar{y})^2 * I(x, y),$$

$$M_{11} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})(y - \bar{y}) * I(x, y),$$

где \bar{x}, \bar{y} – координаты центроида.

В программной реализации моменты вычисляются с помощью функции `cv2.moments()` из библиотеки `OpenCV`. Данная функция возвращает набор моментов, среди которых можно получить координаты центроида контура по формулам

$$c_x = \frac{M_{10}}{M_{00}},$$

$$c_y = \frac{M_{01}}{M_{00}}.$$

На основе моментов контура строится ковариационная матрица. Ковариационная матрица – это матрица, составленная из попарных ковариаций элементов одного или двух случайных векторов, описывается формулой [5]

$$X = \begin{bmatrix} D(X) & cov(x, y) \\ cov(x, y) & D(Y) \end{bmatrix},$$

где $D(X)$ – дисперсия (разброс) по оси X ; $D(Y)$ – дисперсия (разброс) по оси Y ; $cov(x, y)$ – ковариация, показывающая зависимость x от y .

В контексте моментов контура ковариационная матрица принимает следующий вид:

$$X = \begin{bmatrix} M_{20} & M_{11} \\ M_{11} & M_{02} \end{bmatrix},$$

где M_{20} – центральный момент второго порядка по оси X ; M_{02} – центральный момент второго порядка по оси Y ; M_{11} – смешанный центральный момент (корреляция между осями X и Y).

На основе ковариационной матрицы вычисляются собственный вектор и собственное значение. Собственный вектор линейного преобразования $A: L \rightarrow L$, где L – линейное пространство над полем K , называется такой ненулевой вектор $x \in K$, что для некоторого $\lambda \in K$ имеет место [6]

$$A * x = \lambda * x.$$

Собственным значением линейного преобразования A называется такое число $\lambda \in K$, для которого существует собственный вектор, т. е. уравнение $A * x = \lambda * x$ имеет ненулевое решение $x \in L$.

Таким образом, вычисление собственного вектора для контура позволяет определить преобладающее направление распределения плотности точек на тепловой карте, которое отражает основную тенденцию смещения аномалий или перегрузок (см. рис. 3).

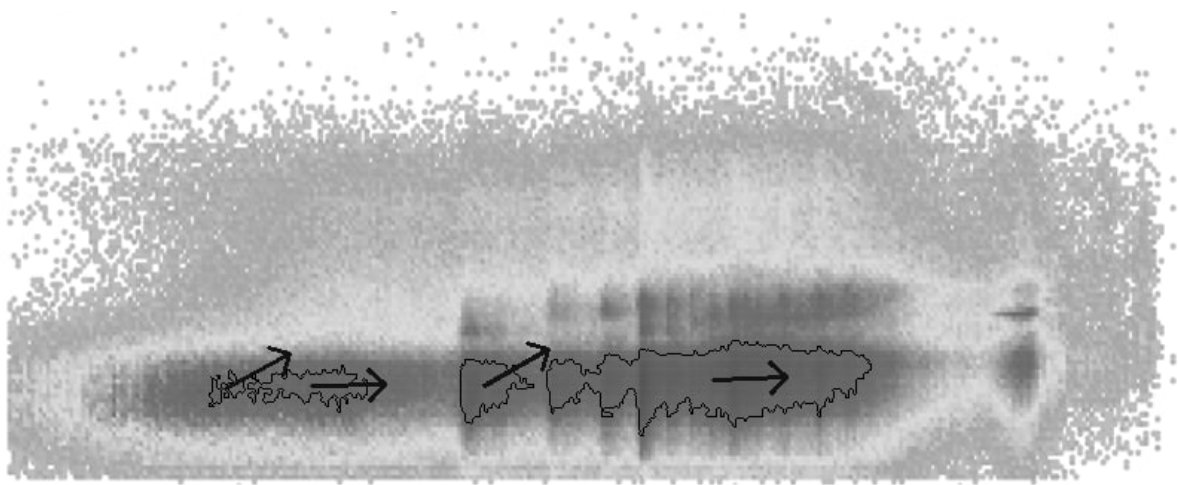


Рис. 3. Визуальное представление собственных векторов на картограмме

Для анализа изменений формы контура требуется определить его среднюю линию – кривую, проходящую через центральную часть объекта и отражающую его характерную геометрию.

Построение средней линии осуществляется следующим образом: для каждой координаты на оси X находится точка на оси Y , расположенная на одинаковом расстоянии от верхней и нижней границ контура. Такая точка считается средней. Последовательное соединение всех найденных средних точек формирует центральную ось объекта, позволяя визуализировать его форму и выявлять асимметрии или отклонения. Визуальное представление средней линии показано на рис. 4.

Результаты исследования: теоретическая и практическая значимость. По завершении работы программы все полученные данные сохраняются в log-файл, который используется в качестве основы для последующего анализа состояния картограммы. Оценка осуществляется на основе процентного соотношения выявленных аномалий ко всем зафиксированным случаям функционирования сервера за рассматриваемый период времени.

Если аномалии обнаруживаются в менее 5 % таких случаев, результат считается хорошим, что указывает на отсутствие существенных проблем в работе сервера. Если процент аномалий составляет 5-20 %, результат оценивается как удовлетворительный, что может свидетельствовать о стабильной, но не оптимальной работе системы. Наконец, если аномалии составляют более 20 % случаев работы сервера, это говорит о плохом результате работы СХД.

По сравнению с традиционным анализом, данный подход имеет несколько ключевых преимуществ. Во-первых, система обеспечивает мгновенный анализ больших объёмов данных, что недоступно при традиционной обработке. Она автоматически формирует отчёты, включающие все выявленные нарушения в работе сервера, и предоставляет их визуализацию.

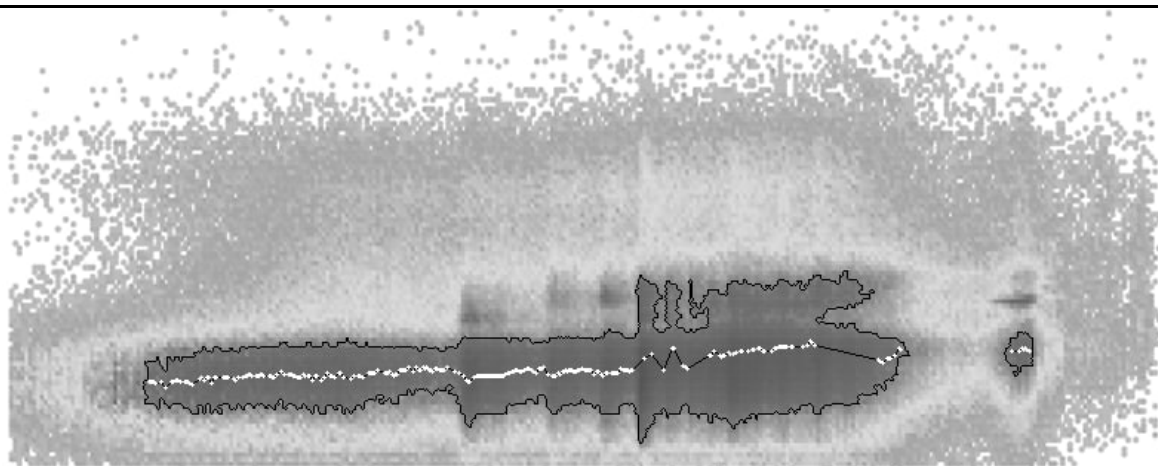


Рис. 4. Визуальное представление средней линии на картограмме

Заключение. В ходе проведённого анализа автоматизированной системы диагностики «узких мест» в работе СХД по тепловым картам был проведён анализ более 100 случаев мониторинга. Результаты показали, что алгоритм демонстрирует высокую точность, корректно идентифицируя аномалии в 82 % случаев. Это свидетельствует о его эффективности и пригодности для использования в рамках аналитических отчётов, где требуется обработка большого объёма данных без участия оператора.

Тем не менее оставшиеся 18 % случаев, в которых алгоритм не смог правильно интерпретировать данные, указывают на необходимость дальнейшего совершенствования системы. Основными причинами ошибок являются сложные или нетипичные формы распределения данных. Для повышения точности и надёжности системы в будущем планируется внедрять методы машинного обучения. Использование обучаемых моделей, способных адаптироваться к разнообразным наборам данных, может улучшить качество анализа.

Таким образом, несмотря на уже достигнутые высокие показатели точности, система имеет потенциал для дальнейшего развития и совершенствования, что позволит повысить её эффективность и расширить область применения в анализе картограмм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тепловая карта // GROZD: сайт. – URL: <https://drozd.red/glossary/teplovaya-karta/> (дата обращения: 24.05.2025). – Текст: электронный.
2. Robert Laganier OpenCV 3 Computer Vision Application Programming Cookbook / Robert Laganier – Third Edition. – Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2017. – 573 p.
3. Timothy Malche What is Image Contouring? / Timothy Malche // roboflow: сайт. – URL: <https://blog.roboflow.com/image-contouring/#:~:text=In%20computer%20vision%20and%20image,an%20object%20in%20an%20image> (дата обращения: 21.05.2025). – Текст: электронный.
4. Матвеев, А. И. Цифровая обработка изображений в OpenCv. Практикум: учеб. пособие для вузов / А. И. Матвеев. – СПб.: Лань, 2022. – 104 с.
5. Платонов, А. К. Методы обработки измерений: учеб. пособие / А. К. Платонов, Д. С. Иванов. – М.: МФТИ, 2013. – 107 с.
6. Долгополов, Д. В. Методы нахождения собственных значений и собственных векторов матриц: методические указания / Д. В. Долгополов. – СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2005. – 39 с.

Сеченов П. А.
P. A. Sechenov

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЁТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ T-UNOCALPH

DEVELOPMENT OF A PROGRAM FOR CALCULATION OF THERMODYNAMIC PARAMETERS OF ONE-COMPONENT SYSTEMS T-UNOCALPH

Сеченов Павел Александрович – доцент кафедры прикладных информационных технологий и программирования Сибирского государственного индустриального университета (Россия, Новокузнецк). E-mail: sechenov_pa@sibsiu.ru.

Pavel A. Sechenov – Associate Professor, Department of Applied Information Technologies and Programming, Siberian State Industrial University (Russia, Novokuznetsk). E-mail: sechenov_pa@sibsiu.ru.

Аннотация. Сформулирована задача разработки программы для расчёта термодинамических параметров (энергии Гиббса, энтальпии, энтропии, удельной теплоёмкости) для однокомпонентных систем. Для решения задачи выбраны математические модели методологии построения фазовых диаграмм CALPHAD. Модели позволяют рассчитать термодинамические функции для заданной температуры и выбранной кристаллической решётки. Для ферромагнетиков при этом учитывается магнитная составляющая. В качестве термодинамической базы данных интерметаллидов выбрана база данных COST 507R, которая содержит однокомпонентные, двухкомпонентные и трёхкомпонентные системы. В качестве прототипа программы выбрано свободно распространяемое программное обеспечение OpenCalphad, которое, в отличие от коммерческих продуктов, не ограничено в выборе химических элементов. Разработана программа, и представлен алгоритм чтения информации из базы данных формата TDB. Представлены удовлетворительные результаты сравнения вычисленных в разработанной программе T-UnoCalph значений энергий Гиббса с программой OpenCalphad. Правильно рассчитанные термодинамические функции однокомпонентных систем позволят рассчитать термодинамические функции двухкомпонентных систем.

Summary. The problem of developing a program for calculating thermodynamic parameters (Gibbs energy, enthalpy, entropy, specific heat capacity) for one-component systems is formulated. To solve the problem, mathematical models of the CALPHAD phase diagram construction methodology are selected. The models allow calculating thermodynamic functions for a given temperature and selected crystal lattice; for ferromagnets, the magnetic component is taken into account. The COST 507R database, which contains one-component, two-component and three-component systems, is selected as a thermodynamic database of intermetallics. The freely distributed OpenCalphad software, which, unlike commercial products, is not limited in the choice of chemical elements, is selected as a prototype of the program. The program is developed and an algorithm for reading information from a TDB database is presented. Satisfactory results of comparing the Gibbs energy values calculated in the developed T-UnoCalph program with the OpenCalphad program are presented. Correctly calculated thermodynamic functions of one-component systems will allow calculating the thermodynamic functions of two-component systems.

Ключевые слова: программа, алгоритм, методология Calphad, термодинамика, база данных.

Key words: program, algorithm, Calphad methodology, thermodynamics, database.

УДК 004.942

Введение. Термодинамическое моделирование играет значительную роль в математическом описании процессов, осуществляемых в металлургических системах [3].

Для расчётов, связанных с металлическими сплавами, удобнее использовать энергию Гиббса, которая в условиях равновесия стремится к минимуму:

$$G(P, T, \bar{n}) \rightarrow \min ,$$

$$dG = 0; \quad d^2G \geq 0,$$

где P – давление, Па; T – температура, К; n – количество вещества, моль.

Для прогнозирования состава многокомпонентных сплавов применяют расчёты методом CALPHAD, который разрабатывался с 70-х годов прошлого века и к настоящему времени стал одной из основ повышения эффективности разработки новых металлических материалов [3].

Существуют коммерческие программные продукты, позволяющие получить значения энергии Гиббса однокомпонентных систем, а затем и равновесный состав многокомпонентной системы. Программный продукт для термодинамических расчётов FactSage был представлен в 2001 году и включает в себя базы данных и модули для термодинамических расчётов. Основная возможность данного программного модуля состоит в расчёте равновесного состава сложных многокомпонентных систем и проведения моделирования на его основе [3].

Другим программным продуктом является Thermo-Calc [10], который также позволяет рассчитывать равновесный состав многокомпонентной системы, в основу которого положена методология CALPHAD. У программного комплекса Thermo-Calc есть демонстрационная версия, которая позволяет проводить термодинамические расчёты для ограниченного числа компонентов.

Удобным для обучения является программный комплекс OpenCalphad, который позволяет изучить методологию CALPHAD [8] на основе базы данных 20 однокомпонентных систем. Программа является бесплатной, а база данных COST 507R включает не все последние данные по соединениям интерметаллидов по сравнению с коммерческими программами FactSage [9], Thermo-Calc и Pandat [13]. Данные для коммерческих программных продуктов верифицируются, анализируются из разных источников, в том числе и из одноимённого с методологией журнала CALPHAD. Таким образом, в текущей статье будут рассмотрены основные методы и модели, применяемые для расчёта однокомпонентных систем, а также алгоритмы и сравнение результатов расчётов в разработанной автором программе T-UnoCalph [6] со свободно распространяемой программой OpenCalphad.

Модели и методы. Для того чтобы спрогнозировать состав многокомпонентных систем, необходимо рассчитать значение энергии Гиббса для однокомпонентных систем.

Одним из вариантов расчёта термодинамических функций индивидуальных веществ является методология CALPHAD, в основе которой лежит принцип нахождения минимума энергии Гиббса, которую можно представить в виде некоторой полиномиальной функции [12]:

$$G_{m[T]} - H_m^{SER} = G_i^{ref} = a + bT + cT \ln(T) + \sum_2^n d_n T^n. \quad (1)$$

Левая часть уравнения определяется как энергия Гиббса относительно стандартного состояния (SER), где H_m^{SER} – энтальпия вещества при температуре 298,15 К; a, b, c, d – коэффициенты, а n представляет собой набор целых чисел, обычно принимающих значения 2, 3, –1. Первая и вторая производная величины G_i^{ref} относительно температуры связаны с абсолютной энтропией и теплоёмкостью соединения при одной и той же температуре.

Из уравнения (1) могут быть получены другие термодинамические функции вещества (энтропия, энтальпия, удельная теплоёмкость):

$$S = -b - c - c \ln(T) - \sum n d_n T^{n-1}; \quad (2)$$

$$H = a - cT - \sum (n-1) d_n T^n; \quad (3)$$

$$C_p = -c - \sum n(n-1) d_n T^{n-1}. \quad (4)$$

Уравнение (1) является функцией температуры, но в это уравнение можно добавить дополнительные составляющие, связанные с влиянием давления или магнетизма.

В отличие от базы данных ИВТАНТЕРМО [1, 7] и базы данных JANAF [2], где энергия Гиббса рассчитывается также в виде полинома, аналогичного формуле (1), в методологии CALPHAD учитывается магнитный вклад для ферромагнетиков для определённых кристаллических структур.

Для веществ, на которые влияет магнитное упорядочение, Cr, Fe, Ni и Mn необходимо учитывать парамагнитное состояние. Магнитный вклад в этом случае рассматривается в явном виде. Таким образом, к уравнению энергии Гиббса (1) добавляется дополнительный член, связанный с эффектом парамагнетизма:

$$G^{mag} = RT \ln(\beta + 1) f(\tau), \quad (5)$$

где β – средний магнитный момент, Дж/Тл; τ – это отношение T/T^k , здесь T^k – критическая температура магнитного упорядочивания (температура Кюри T_c [4] для ферромагнитных материалов или температура Нееля T_N для антиферромагнитных материалов).

Функция $f(\tau)$ для объёмно-центрированной кристаллической решётки [5] BCC-A2 вычисляется по формулам

$$\begin{aligned} \tau < 1: f(\tau) &= 1 - 0,905299383\tau^{-1} - 0,153008346\tau^3 - 0,00680037095\tau^9 - 0,00153008346\tau^{15}, \\ \tau > 1: f(\tau) &= -0,0641731208\tau^{-5} - 0,00203724193\tau^{-15} - 4,27820805E-04\tau^{-25}. \end{aligned} \quad (6)$$

Функция $f(\tau)$ для кристаллических решёток CBCC-A12, FCC-A1 и HCP-A3 определяется соотношениями

$$\begin{aligned} \tau < 1: f(\tau) &= 1 - 0,860338755\tau^{-1} - 0,1744912\tau^3 - 0,00775516624\tau^9 - 0,0017449124\tau^{15}, \\ \tau > 1: f(\tau) &= -0,0426902268\tau^{-5} - 0,0013552453\tau^{-15} - 2,84601512E-04\tau^{-25}. \end{aligned} \quad (7)$$

Также функция $f(\tau)$ для представленных выше кристаллических решёток определяется в общем виде следующим образом:

$$\begin{aligned} \tau < 1: f(\tau) &= 1 - \left(\frac{79\tau^{-1}}{140p} + \left(\frac{474}{497} \right) / \left(\frac{1}{p} - 1 \right) \left(\frac{\tau^3}{6} + \frac{\tau^9}{135} + \frac{\tau^{15}}{600} \right) \right) / A, \\ \tau > 1: f(\tau) &= - \left(\frac{\tau^{-5}}{10} + \frac{\tau^{-15}}{315} + \frac{\tau^{-25}}{1500} \right) / A, \end{aligned} \quad (8)$$

где A вычисляется по формуле

$$A = \frac{518}{1125} + \frac{11692}{15975} \cdot \left(\frac{1}{p} - 1 \right). \quad (9)$$

Эти уравнения были получены М. Хиллертом [11] из выражения для магнитной теплоёмкости, предложенного Г. Инденом.

Значение p в выражениях (8) и (9) зависит от структуры кристаллической решётки вещества. Например, p равен 0,28 для металлов с кристаллической структурой FCC (гранцентрированная кубическая решётка) и HCP (гексогональная плотнейшая упаковка) и равен 0,4 для BCC (объёмно-центрированная кубическая решётка) металлов.

В качестве базы данных для моделирования интерметаллидов была выбрана COST 507R, содержащая сведения о 20 простых элементах и их возможных состояниях. Также эта база данных содержит несколько десятков бинарных соединений, а также тройные соединения. Для базы данных характерен формат термодинамических баз данных TDB. Поэтому для расчёта однокомпонентных систем необходимо было разобраться с форматом данных, а затем по формулам (1) – (9) рассчитать энергию Гиббса для выбранного химического элемента при заданной температуре.

Рассмотрим структуры базы данных формата TDB на примере элемента алюминий (Al) и одной из его фаз – жидкой (Liquid).

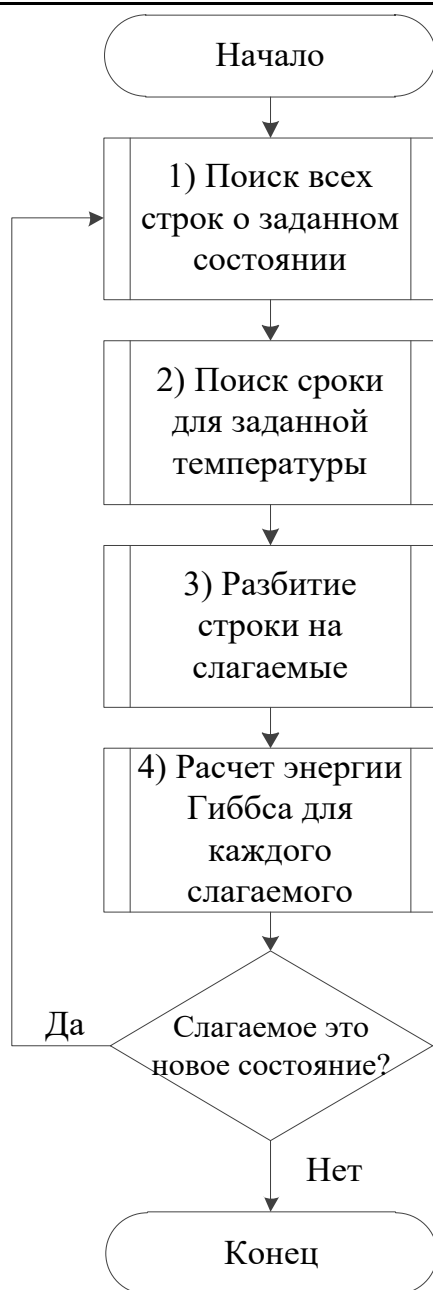


Рис. 1. Алгоритм расчёта энергии Гиббса в файле формата TDB

В отличие от других баз данных ИВТАНТЕРМО или JANAF, где хранятся только коэффициенты полинома, в данной базе данных хранятся степенные полиномы для расчёта функции в виде строки, поэтому в программе TUnoCalphad осуществляется парсинг исходной строки на более простые элементы (см. рис. 1).

Алгоритм расчёта энергии Гиббса для заданного однокомпонентного вещества следующий. Из базы данных, содержащей 3500 строк, ищутся необходимый элемент и его фаза. Например, задано вещество Al с кристаллической решёткой LIQUD при температуре 600 K.

Шаги на i -й итерации:

Шаг 1. Поиск всех строк для расчёта заданного состояния.

Шаг 2. Метод F_calcS, поиск строки для расчёта энергии Гиббса при заданной температуре.

Шаг 3. Метод res_M, разбитие строки, полученной в предыдущем методе, на подстроки по символам «+» и «-».

Шаг 4. Метод F_resVal, который возвращает значение энергии Гиббса в виде суммы слагаемых по формуле (1).

Если на 3-м шаге в качестве слагаемого встречается новая функция, то шаги с 1-го по 4-й повторяются. В табл. 1 показаны результаты поиска работы алгоритма, представленного на рис. 1 для заданного элемента.

Таким образом работает алгоритм расчёта однокомпонентных веществ. Если заданное однокомпонентное вещество является также ферромагнетиком, а это вещества Cr, Fe, Ni и Mn, то к полученному значению добавляется значение функции, рассчитанной по формулам (5) – (7) в зависимости от кристаллической решётки.

Другие термодинамические функции: энтальпия, энтропия и удельная теплоёмкость – рассчитываются по формулам (2) – (4), а коэффициенты полинома a , b , c , d_n были записаны на этапе расчёта энергии Гиббса.

Графический интерфейс программы представлен на рис. 2.

Тестирование и результаты. Для тестирования были рассмотрены элементы, представленные в базе данных COST 507R: AL, B, C, CE, CR, CU, FE, LI, MG, MN, N, ND, NI, SI, SN, TI, V, Y, ZN, ZR. Для этих элементов были протестированы следующие кристаллические решётки: BCC_A2, BCC_B2,

FCC_A1, HCP_A3, LIQUID, CBCC_A12, CUB_A13.

После отладки и тестирования результаты программ T-UnoCalph совпали с результатами свободной программы OpenCalphad.

В табл. 2 приведены результаты сравнения значений энергии Гиббса в фазах в разработанной программе T-UnoCalph с программой OpenCalphad.

Как видно из табл. 2, максимальная абсолютная ошибка не превышает 0,49 Дж, в то время как относительная ошибка не превышает 0,009873 %.

Таблица 1

Результаты расчёта энергии Гиббса для элемента Al в состоянии LIQUID при температуре 600 K
в программе T-UnoCalph

Итерация	Поиск	Шаг	Результат
I	LIQUID, AL;	1	PARAMETER G (LIQUID, AL; 0) 2.98150E+02 GLIQAL; 6000 N REF1 !
		2	2.98150E+02 GLIQAL;
		3	GLIQAL
		4	Вызов функции FUNCT GLIQAL
II	FUNCT GLIQAL	1	FUNCT GLIQAL 298.15 +11005.029- 11.841867*T+7.934E-20*T**7+GHSERAL; 933.47 Y +10482.382-11.253974*T+ 1.231E+28*T**(-9)+GHSERAL; 6000.00 N REF0!
		2	298.15 +11005.029-11.841867*T+7.934E-20*T**7 +GHSERAL;
		3	+11005.029 -11.841867*T +7.934E-20*T**7 +GHSERAL
		4	Расчёт значения энергии Гиббса и вызов функции GHSERAL
III	GHSERAL	1	FUNCTION GHSERAL 2.98150E+02 -7976.15 +137.093038*T-24.3671976*T*LN(T) -.001884662*T**2-8.77664E-07*T**3 +74092*T**(-1); 7.00000E+02 Y -11276.24+223.048446*T-38.5844296*T*LN(T) +.018531982*T**2-5.764227E-06*T**3 +74092*T**(-1); 9.33470E+02 Y -11278.378+188.684153*T-31.748192*T*LN(T) - 1.230524E+28*T**(-9); 2.90000E+03 N !
		2	2.98150E+02 -7976.15+137.093038*T- 24.3671976*T*LN(T) -.001884662*T**2 -8.77664E-07*T**3+74092*T**(-1);
		3	-7976.15 +137.093038*T -24.3671976*T*LN(T) -.001884662*T**2- 8.77664E-07*T**3 +74092*T**(-1)
		4	Расчёт значения энергии Гиббса для функции GHSERAL . Сложение с результатом функции GLIQAL.

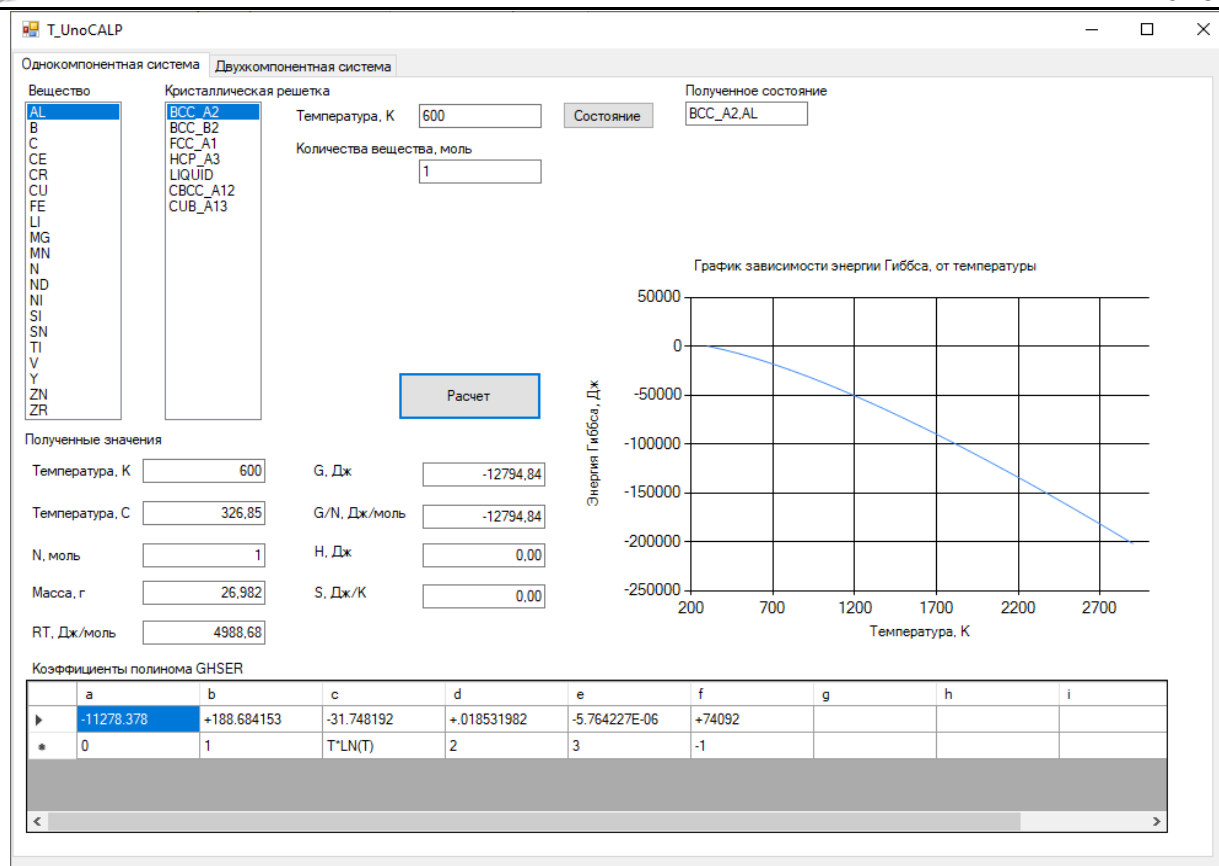


Рис. 2. Интерфейс программы для расчёта однокомпонентных систем

Таблица 2
Абсолютная ошибка между программами T-Unocalph (расчёт) и OpenCalphad (эталон)

Вещество	Температура, К	Абсолютная ошибка энергии Гиббса в фазах, Дж						
		BCC_A2	BCC_B2	FCC_A1	HCP_A3	LIQUID	CBCC_A12	CUB_A13
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Al	300	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,46	0,00	0,36
B	300			0,04		0,01		
	3000			0,31		0,12		
C	300					0,26		
	3000					0,04		
CE	300	0,01		0,05	0,05	0,01		
	3000	0,30		0,39	0,39	0,36		
CR	300	0,00		0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
	3000	0,14		0,16	0,16	0,17	0,34	0,34
CU	300	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
	3000	0,03	0,03	0,03	0,03	0,46		
FE	300	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3000	0,00	0,00	0,02	0,09	0,45	0,49	0,49
LI	300	0,00		0,00	0,00	0,00		
	3000	0,31		0,31	0,31	0,06		

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
MG	300	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	
	3000	0,13		0,13	0,13	0,29	0,27	
MN	300	0,00		0,00	0,00	0,00	0,06	0,00
	3000	0,10		0,27	0,27	0,17	0,14	0,41

Заключение. Разработанная программа позволяет определить основные термодинамические функции для однокомпонентных систем базы данных COST 507R. Результаты работы программы удовлетворительные и совпадают с результатами программы OpenCalphad, относительная ошибка не превышает 0,009873 %. В дальнейшем планируется разработать версию программы для двухкомпонентных систем, расчёт которых будет основываться на однокомпонентных элементах. После этого можно будет обновить базу данных новыми данными (добавление новых элементов, уточнение расчётных данных, увеличение количества фаз для элементов) из журнала CALPHAD.

ЛИТЕРАТУРА

- Белов, Г. В. Расчёт равновесного состава сложных термодинамических систем с использованием языка Julia и библиотеки Ipropt / Г. В. Белов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Приборостроение. – 2021. – № 3 (136). – С. 24-45.
- Квантово-химическое моделирование термодинамических свойств молекул высокоэнергетических тетразинов / В. М. Волохов, Е. С. Амосова, А. В. Волохов [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2021. – Т. 10. – № 2. – С. 82-96.
- Казаков, А. А. Основы металлургической экспертизы. Численное моделирование фазовых превращений в жидкой и затвердевающей стали: учеб. пособие / А. А. Казаков, С. В. Рябошук. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 110 с.
- О возможности использования метода акустической эмиссии для оценки структурных изменений в процессе термической обработки конструкционных материалов / В. И. Муравьев, В. А. Ким, Э. А. Дмитриев [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № I-1 (1). – С. 110-117.
- Николайчук, П. А. Термодинамическая оценка химической и электрохимической устойчивости системы Cr-Si / П. А. Николайчук // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № IV-1 (40). – С. 88-103.
- Программа для расчёта термодинамических параметров однокомпонентных систем T-UnoCalph: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025614848 Российская Федерация / П. А. Сеченов; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»: зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.02.2025: опублик. 26.02.2025.
- Сеченов, П. А. Численный метод и математическая модель нахождения равновесного состава термодинамической системы программно-математического комплекса T-Energy / П. А. Сеченов, И. А. Рыбенко // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2022. – Т. 49. – № 4. – С. 104-112.
- Calphad, сайт. – URL: <http://calphad.org/> (дата обращения: 28.04.2025). – Текст: электронный.
- Fedorov M., Wróbel Ja. S., Chromiński W. and etc. Composition stability of single FCC phase in CR-FE-MN-NI alloys: first-principles prediction and experimental validation // Acta Materialia. 2023, Vol. 255. – P. 119047.
- Ikhmayies S. J. Using Thermo-Calc software to produce the phase diagram of Zn-Te system // Journal of Energy Systems. 2020, Vol. 4, Iss. 3. – P. 88-95.
- Hillert M. Phase Equilibria, Phase Diagrams and Phase Transformations. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. – P. 510.
- Jendrzeczyk-Handzlik D. Thermodynamic Study and Re-optimization of the Au-Ga Binary System // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. 2017, Vol. 38, Iss. 3. – P. 305-318.
- Li Zh., Li Yu., Jiang Sh. and etc. Calculation and experimental verification of ZN-AL-MG phase diagram // Coatings. 2024, Vol. 14, Iss. 4. – P. 468.



Фролов Д. О., Андрианов И. К.
D. O. Frolov, I. K. Andrianov

ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА В КРИВОЛИНЕЙНОМ КАНАЛЕ НА ОСНОВАНИИ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

METHOD OF PREDICTING THE THERMAL STATE OF A GAS FLOW IN A CURVILINEAR CHANNEL BASED ON NEURAL NETWORK MODELS

Фролов Дмитрий Олегович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: optcompanys@mail.ru.

Dmitriy O. Frolov – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: optcompanys@mail.ru.

Андрианов Иван Константинович – кандидат технических наук, доцент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 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); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave., 27. E-mail: ivan_andrianov_90@mail.ru.

Аннотация. В настоящем исследовании рассматривается задача численного предсказания температурного распределения в газовой среде, протекающей по двумерному криволинейному каналу с фиксированными тепловыми условиями на границах. Для её решения предложен комбинированный методологический подход, сочетающий традиционные методы численного моделирования с нейросетевой аппроксимацией. Целью работы является разработка нейросетевого подхода, способного с высокой точностью воспроизводить тепловое поле в рассматриваемой области при варьируемых входных параметрах потока.

Summary. This study addresses the problem of numerically predicting the temperature distribution in a gaseous medium flowing through a 2-dimensional curved channel with fixed thermal boundary conditions. A combined methodological approach is proposed, integrating conventional numerical modeling techniques with neural network approximation. The aim of the work is to develop a neural network approach capable of reproducing with high accuracy the thermal field in the considered area with variable input flow parameters.

Ключевые слова: теплообмен, криволинейный канал, газовая среда, граничные условия, нейросеть, температурное поле.

Key words: heat transfer, curved channel, gaseous medium, boundary conditions, neural network, temperature field.

Исследование выполнено за счёт гранта РФФИ №22-79-10114» (<https://rscf.ru/project/22-79-10114/>).

УДК 517.95

Развитие современного турбомашиностроения, сопряжённое с постоянным повышением температур рабочего тела, внедрением новых конструктивных решений, всё чаще требует изыскания новых эффективных методов теплового анализа. В инженерной практике нередко возникает необходимость исследования тепловых процессов в каналах с нестандартной геометрией, включая изогнутые и криволинейные конфигурации. Такие задачи характерны, в частности, для расчётов температурных режимов в элементах охлаждающих систем турбин, в конструкциях теплообменного оборудования, а также в других технических системах с ограниченным пространством и сложным внутренним контуром. Традиционный подход к моделированию теплопереноса в подобных условиях опирается на численное решение системы уравнений движения вязкой жидкости и теплопроводности, что требует значительных вычислительных ресурсов. Особенно высокая

нагрузка возникает при необходимости проведения серии расчётов, например, в рамках оптимизационных процедур или при параметрических исследованиях.

Современные достижения в области машинного обучения, в частности в развитии нейросетевых алгоритмов, открыли новые возможности для моделирования сложных физических явлений посредством аппроксимации на основе предварительно рассчитанных численных данных. Такой подход позволяет существенно сократить временные издержки при получении приближённых решений, при этом сохраняя высокую степень точности. Это обстоятельство делает нейросетевые методы особенно привлекательными в инженерной практике, например, при проектировании и параметрическом анализе теплотехнических устройств, где оперативность расчётов играет ключевую роль.

Целью данной работы является разработка подхода для прогнозирования теплового состояния газового потока, протекающего в криволинейном канале, при заданных граничных условиях на основании нейросетевой модели. В работе предложен гибридный подход, сочетающий численное моделирование и нейросетевую аппроксимацию, что позволяет существенно сократить время расчёта и повысить точность при многократных моделях.

В качестве объекта моделирования рассматривалась задача течения газовой среды в двумерном криволинейном канале, образованном двумя непараллельными контурами. Геометрическая конфигурация канала описывалась посредством внутренних и внешних радиусов кривизны, при этом ширина канала оставалась постоянной по всей длине. На границах, соответствующих внешней и внутренней стенкам, устанавливались неизменные температурные условия, а физико-технические характеристики соответствовали параметрам воздушной среды при стандартных температуре и давлении. Граничные условия на входе в канал включали в себя фиксированное значение температуры и скорости газового потока.

Необходимо определить:

1. как изменяется температура газа вдоль канала;
2. как изменяются температуры на границах вблизи выходной части канала;
3. возможность использования нейросетевой модели для прогноза температурного распределения в зависимости от параметров входного потока и геометрии канала.

Для формирования обучающей выборки нейросетевой модели предлагается реализовать серию численных расчётов, воспроизводящих поведение газового потока в криволинейной канальной структуре; рассмотреть двумерный сценарий теплообмена, в рамках которого газ поступает в канал, ограниченный двумя изогнутыми несоосными границами. В расчётной постановке требуется учесть как процессы переноса тепла за счёт теплопроводности, так и эффекты конвекции. Математическая модель включает в себя систему уравнений Навье – Стокса, описывающую движение вязкой несжимаемой среды, и уравнение теплопереноса, определяющее распределение температуры в объёме течения.

Расчёты требуется выполнять для широкого диапазона входных параметров, включая вариации температуры и скорости поступающего газа, а также модификации геометрических характеристик канала. Конфигурация моделируемой области предусматривает строго фиксированную форму: криволинейный канал с заданными внутренним и внешним радиусами кривизны, при этом толщина зазора между стенками остаётся постоянной по длине канала.

Для описания течения газа в канале использовались следующие уравнения:

– уравнение движения для газа (уравнение Навье – Стокса):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u = - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u + f;$$

– уравнение теплопереноса для газа:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\kappa \nabla T),$$

где u – скорость потока газа; ρ – плотность газа; ν – кинематическая вязкость; p – давление газа; T – температура газа; c – удельная теплоёмкость; κ – коэффициент теплопроводности; f – массовая сила.

Для решения этих уравнений могут быть использованы стандартные численные методы решения дифференциальных уравнений, включая метод конечных элементов. Моделирование должно проводиться для различных значений входной температуры, скорости газа и геометрии канала, что позволит получить разнообразные распределения температур вдоль канала, которые затем будут использованы для обучения нейросетевой модели.

Для каждого численного эксперимента результаты моделирования представляют собой массивы данных (x, y, T) , где x и y – координаты точек в канале, T – температура газа в этих точках канала. Эти данные используются как обучающие примеры для нейросети. В частности, входными параметрами для нейросети были:

- координаты точки канала (x, y) ;
- температура и скорость газа на входе T_{in}, u_{in} ;
- температуры на внешней и внутренней стенках канала T_1 и T_2 .

Выходным параметром нейросети будет являться температура $T(x, y)$ в точке (x, y) канала, предсказанная моделью.

Для решения задачи прогноза температурного поля газа в криволинейном канале была выбрана архитектура нейросети типа **Fully Connected Feedforward Neural Network (FNN)**. Модель состоит из четырёх скрытых слоёв по 128 нейронов в каждом и функции активации **ReLU**. Этот выбор был обусловлен потребностью в достаточно мощной модели, способной аппроксимировать сложные нелинейные зависимости между входными параметрами и температурой газа в канале.

Обучение нейросети предлагается проводить с использованием 80 % данных для тренировки и 20 % данных для валидации. Алгоритм оптимизации, используемый для обучения, – **Adam**, который является одним из самых эффективных и часто используемых методов для тренировки глубоких нейронных сетей.

В качестве метрики для оценки качества модели используется среднеквадратичная ошибка (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{pred}(x_i, y_i) - T_{true}(x_i, y_i))^2},$$

где N – количество точек в тестовой выборке; T_{pred} – предсказанная моделью температура; T_{true} – истинная температура (из численного моделирования).

После завершения обучения нейросеть должна быть протестирована на независимой выборке данных, не использовавшихся в процессе обучения. Для повышения точности прогноза в областях с резкими изменениями температурных градиентов предлагается использовать стратегию увеличения плотности обучающих данных в этих областях. Это позволит нейросети лучше обрабатывать сложные участки канала. Кроме того, для улучшения качества модели в этих зонах можно рассмотреть возможность применения более сложных архитектур, таких как свёрточные нейронные сети (CNN) или графовые нейросети (GNN), которые могут более эффективно учитывать пространственные зависимости и сложные геометрии.

Таким образом, разработанная методика оценки теплового состояния газового потока в криволинейном канале на основании нейросетевой модели может быть использована в задачах прогнозирования и аппроксимации температурных полей для газов, протекающих в каналах со сложной геометрией. Предложенный нейросетевой подход может рассматриваться как перспективный инструмент для инженерных приложений, где требуется оперативный термогидравлический анализ и быстрая параметрическая оптимизация. В дальнейшем предполагается совершенствование модели за счёт внедрения более сложных архитектур глубинного обучения и включения

дополнительных физических эффектов, таких как теплопередача через стенки канала, наличие внутренних тепловых источников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Andrianov, I. K. Optimizing Crack Detection in Gas Turbine Blades Using Implanted Capsules of Ionizing Gas in Nonsteady Operation at Nonuniform Temperature / I. K. Andrianov, E. K. Chepurnova // Russian Engineering Research. – 2023. – Vol. 43, No. 11. – P. 1361-1366. – DOI 10.3103/s1068798x23110035.
2. Андрианов, И. К. Оценка предельного давления и геометрии капсул в системе обнаружения трещин лопаток газотурбинного двигателя в условиях нестационарности и температурной неравномерности / И. К. Андрианов, Е. К. Чепурнова // Вестник машиностроения. – 2023. – Т. 102. – № 9. – С. 725-730.
3. Andrianov, I. K. Optimal distribution of capsules with active substance for the crack detection system in a turbine blade body / I. K. Andrianov, E. K. Chepurnova // CIS Iron and Steel Review. – 2023. – Vol. 26. – P. 98-104. – DOI 10.17580/cisistr.2023.02.16.
4. Bejan A. (2013). Convection Heat Transfer. Wiley.
5. Kline M. Kay, R. (2020). «Deep Learning Applications in Engineering: A Survey». Engineering Computations, 37(4), 1205-1234.
6. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. (2016). Deep Learning. MIT Press.
7. Patankar S. V. (1980). Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Publishing Corporation.
8. Smith R. J., Brown D. L. (2018). «Neural Networks for Predicting Material Properties in High-Temperature Environments». Journal of Computational Physics, 356, 124-137.
9. Kingma D. P., Ba J., (2014). «Adam: A Method for Stochastic Optimization».
10. Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J. (1986). «Learning Representations by Back-Propagating Errors». Nature, 323, 533-536.
11. Zhou J., et al. (2021). «Physics-informed Machine Learning for Thermal Field Prediction in Aerospace Applications». Applied Thermal Engineering, 183, 116149.
12. Chakraborty S., Goswami S. (2019). «Finite Element Modeling and Neural Networks for Structural Health Monitoring». Structural Control and Health Monitoring, 26(8), e2384.
13. He K., Zhang X., Ren S., Sun J., (2015). «Delving Deep into Rectifiers: Surpassing Human-Level Performance on ImageNet Classification».
14. Петрова, А. Н. Анализ методов сглаживания для повышения точности информационного поиска в системах больших данных / А. Н. Петрова, Д. О. Фролов, Т. Л. Дмитриева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № I (81). – С. 45-49.
15. Петрова, А. Н. Использование нейронных сетей для системы прогнозирования, использующей релевантный поиск в системах больших данных / А. Н. Петрова, Д. О. Фролов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № I (73). – С. 96-99.
16. Петрова, А. Н. Разработка модели для ранжирования объектов в системах больших данных / А. Н. Петрова, Д. О. Фролов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № III (75). – С. 43-47.



Нигматуллин К. Р., Забродин А. В.
K. R. Nigmatullin, A. V. Zabrodin

ИССЛЕДОВАНИЕ РОБОТОВ И ЧАТ-БОТОВ КАК СРЕДСТВО РЕШЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

RESEARCH OF ROBOTS AND CHATBOTS AS A SOLUTION TO BUSINESS PROCESS AUTOMATION

Нигматуллин Кирилл Рамилевич – технолог 1-й категории ОАО РЖД СПб ИВЦ отдела сопровождения информационных систем управления перевозочным процессом (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: morenoded@gmail.com.

Kirill R. Nigmatullin – 1st Category Technologist, JSC Russian Railways St. Petersburg, Information Technology Center, Department of Support of Information Systems for Transportation Process Management (Russia, St. Petersburg). E-mail: morenoded@gmail.com.

Забродин Андрей Владимирович – кандидат исторических наук, доцент кафедры «Информационные и вычислительные системы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: zabrodi@pgups.ru.

Andrey V. Zabrodin – PhD in History, Associate Professor, Department of Information and Computing Systems, St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I (Russia, St. Petersburg). E-mail: zabrodi@pgups.ru.

Аннотация. Статья посвящена анализу программных роботов и чат-ботов как инструментов автоматизации бизнес-процессов в условиях цифровой трансформации предприятий. Целью настоящего исследования является сравнительный анализ роботов и чат-ботов как средств автоматизации типовых операций на уровне предприятия. Основная гипотеза заключается в том, что разграничение сфер применения программных роботов и чат-ботов позволяет повысить эффективность автоматизации за счёт учёта особенностей взаимодействия с пользователем и интеграции в информационную инфраструктуру. В рамках работы были выделены ключевые признаки, определяющие области рационального применения указанных инструментов. Проведён анализ практических решений на основе платформ Robin Studio и ChatNavigator, позволивший обосновать выбор технологии в зависимости от характера бизнес-процесса. Методология исследования опирается на функциональный анализ, оценку удобства интеграции и сценарное моделирование. Полученные результаты подтверждают целесообразность комбинированного использования роботов и чат-ботов для повышения производительности, снижения нагрузки на персонал и стандартизации рутинных операций.

Summary. The article is devoted to the analysis of software robots and chatbots as tools for automating business processes in the context of digital transformation of enterprises. The purpose of this study is a comparative analysis of robots and chatbots as automation tools for typical operations at the enterprise level. The main hypothesis is that delineating the fields of application of software robots and chatbots makes it possible to increase automation efficiency by taking into account the specifics of user interaction and integration into the information infrastructure. As part of the work, the key features defining the areas of rational use of these tools were identified. An analysis of practical solutions based on the Robin Studio and ChatNavigator platforms was carried out, which made it possible to justify the choice of technology depending on the nature of the business process. The research methodology is based on functional analysis, assessment of integration convenience and scenario modeling. The results obtained confirm the feasibility of the combined use of robots and chatbots to increase productivity, reduce staff workload and standardize routine operations.

Ключевые слова: информационные технологии; чат-бот; робот; цифровые технологии; автоматизация; интеграция.

Key words: information technology; chatbot; robot; digital technology; automation; integration.

УДК 004.896

Введение. Современные предприятия активно внедряют цифровые технологии для автоматизации рутинных операций, из наиболее востребованных решений выделяются программные роботы и чат-боты, которые, несмотря на общую направленность на повышение эффективности бизнес-процессов, существенно различаются по своему функционалу, сфере применения и технической реализации.

Программные роботы (RPA-системы) преимущественно применяются для выполнения строго регламентированных операций, предполагающих последовательность однотипных действий, таких как обработка документов, передача данных между информационными системами и генерация отчётности. В своей работе они взаимодействуют с пользовательскими интерфейсами и прикладными программными интерфейсами (API), обеспечивая высокую точность и скорость выполнения операций. Чат-боты, в свою очередь, ориентированы на взаимодействие с пользователями в формате естественного языка и предназначены для обработки запросов, консультирования или сбора информации в диалоговой форме.

Настоящее исследование направлено на проведение сравнительного анализа возможностей программных роботов и чат-ботов в контексте автоматизации бизнес-процессов. В ходе анализа рассматриваются функциональные и технические характеристики указанных решений, их преимущества и ограничения, а также определяются оптимальные сценарии применения каждого из решений. Особое внимание уделяется гибридным подходам, где комбинация этих технологий позволяет достичь максимального эффекта от автоматизации, что даёт возможность существенно расширить спектр автоматизируемых задач и повысить эффективность внедряемых решений.

Актуальность проводимого исследования определяется растущим спросом на цифровые инструменты, способные не только сократить издержки, но и улучшить качество обслуживания клиентов. Данная статья может способствовать лучшему пониманию разницы между роботами и чат-ботами с учётом специфики их задач и доступных ресурсов, а также помочь осознанному выбору для дальнейшего использования с учётом требуемых функций.

Полученные результаты могут быть использованы для формирования обоснованных рекомендаций по выбору и внедрению средств автоматизации в зависимости от специфики бизнес-задач, доступных ресурсов и предполагаемой нагрузки.

В контексте автоматизации бизнес-процессов принципиально важно различать два класса решений: роботов и чат-ботов, – каждый из которых обладает уникальными характеристиками и областью применения.

Роботы, которые ещё обозначаются как RPA-роботы (Robotic Process Automation), представляют собой программных агентов, способных имитировать действия человека при работе с компьютерными системами. Они выполняют структурированные повторяющиеся задачи по строго заданным правилам, взаимодействуя с пользовательскими интерфейсами приложений или через API. Типичные примеры использования включают обработку транзакций, перенос данных между системами и автоматическое заполнение форм [1].

Чат-боты, в отличие от роботов, ориентированы на коммуникационную составляющую бизнес-процессов. Это программные решения, основанные на технологиях машинного обучения, которые дают компьютерам возможность интерпретировать, манипулировать и понимать человеческий язык, т. е. NLP (Natural Language Processing), предназначенные для взаимодействия с пользователями через текстовые или голосовые интерфейсы. Современные чат-боты можно разделить на два типа: основанные на жёстких правилах и использующие искусственный интеллект. Первые работают по заранее определённым сценариям, тогда как вторые способны обучаться и адаптироваться к изменяющимся условиям [2].

Функциональное разграничение программных роботов и чат-ботов определяется их целевым назначением в контексте бизнес-процессов.

Ключевое различие между этими технологиями заключается в их целевом назначении. Роботы преимущественно применяются для автоматизации внутренних процессов предприятия, та-

ких как бухгалтерский учёт, управление цепочками поставок или обработка документов. Чат-боты, напротив, используются во внешних коммуникациях: для обслуживания клиентов, приёма заказов или технической поддержки. Однако граница между этими решениями постепенно стирается с появлением гибридных систем, сочетающих возможности обоих подходов.

Критерии сравнения. При выборе между роботами и чат-ботами для автоматизации бизнес-процессов необходимо учитывать несколько ключевых аспектов, определяющих эффективность их применения.

Характер решаемых задач выступает первым и наиболее важным критерием. RPA-роботы демонстрируют максимальную эффективность при работе с чётко структурированными, повторяющимися операциями, такими как обработка стандартизированных документов или перенос данных между системами. Чат-боты, напротив, лучше справляются с задачами, требующими взаимодействия с пользователями, включая обработку запросов, консультации или сбор первичной информации.

Степень интеграции с существующей ИТ-инфраструктурой предприятия представляет собой второй значимый критерий. RPA-решения обладают широкими возможностями подключения к различным корпоративным системам через API или прямое взаимодействие с пользовательскими интерфейсами. Чат-боты в этом отношении более ограничены и преимущественно работают с коммуникационными платформами, хотя современные решения постепенно расширяют свои интеграционные возможности.

Скорость внедрения и стоимость владения существенно различаются для рассматриваемых технологий. Чат-боты, особенно основанные на готовых платформах, могут быть развернуты в относительно короткие сроки и с меньшими затратами. RPA-проекты требуют более тщательной подготовки, включая анализ процессов и разработку сложных сценариев, что увеличивает как временные, так и финансовые инвестиции на начальном этапе.

Гибкость и адаптивность к изменениям бизнес-процессов также заслуживают внимания при сравнении. RPA-роботы, будучи высокоэффективными в стабильных условиях, требуют значительных усилий по перенастройке при изменении рабочих процессов. Интеллектуальные чат-боты с элементами машинного обучения обладают большей адаптивностью, способны обрабатывать вариативные запросы и постепенно улучшать качество обслуживания.

Масштабируемость решений представляет собой отдельный важный критерий. RPA-платформы позволяют одновременно запускать множество роботов для обработки большого объёма операций, тогда как чат-боты эффективно справляются с массовым обслуживанием пользователей, распределяя нагрузку между различными каналами коммуникации.

Следует также учитывать требования к безопасности и соответствию корпоративным стандартам. RPA-решения обычно предусматривают более строгие механизмы контроля доступа и аудита действий, что особенно важно при работе с конфиденциальными данными. Чат-боты в этом отношении могут представлять определённые риски, особенно при обработке персональных данных клиентов.

Для наглядного представления полученных критериев целесообразно использовать метод взвешенных оценок (см. табл. 1). Его суть заключается в распределении фиксированной общей величины (например, 1 или 100 %) между ключевыми параметрами в зависимости от их значимости. Каждому критерию присваивается весовой коэффициент, отражающий его вклад в итоговую оценку. Сумма всех весовых коэффициентов должна быть равна единице или ста процентам, что обеспечивает сопоставимость результатов. Затем по каждому параметру выставляется балльная оценка, как правило, в диапазоне от 0 до 1 или от 0 до 100 %, где максимальное значение соответствует идеальному соответствию требованиям. Расчёт итогового показателя производится путём умножения оценки по каждому критерию на его весовой коэффициент с последующим суммированием полученных значений. Такой подход позволяет нивелировать субъективность отдельных оценок за счёт учёта их значимости и получить комплексный количественный показатель, отражающий общий уровень соответствия анализируемого объекта поставленным требованиям [3].

Таблица 1

Критерии сравнения роботов и чат-ботов

Критерий	Вес (доля)	Роботы	Чат-боты	Итог роботов	Итог чат-ботов
Характер решаемых задач	0.25	0.9 (структурированные)	0.7 (неформализованные)	0.225	0.175
Степень интеграции	0.20	0.8 (GUI/API)	0.6 (мессенджеры/CRM)	0.16	0.12
Скорость и стоимость внедрения	0.15	0.5 (долго/дорого)	0.9 (быстро/дешевле)	0.075	0.135
Гибкость и адаптивность	0.15	0.4 (жесткие правила)	0.8 (обучаемость/NLP)	0.06	0.12
Масштабируемость решений	0.10	0.7 (линейная)	0.9 (высокая)	0.07	0.09
Требования к безопасности	0.15	0.9 (строгий контроль)	0.6 (риски NLP)	0.135	0.09
Итого	1.00			0.725	0.73

Проведённый анализ показал, что роботы лидируют в задачах, где требуется соблюдать чёткие правила с понятной структурой, но при этом проигрывают в стоимости и скорости внедрения, и, как следствие, в возможности гибко и быстро адаптироваться. Чат-бот же, напротив, более гибок, легче настраивается и проще внедряется, но сложнее работает с другими системами, кроме этого, могут быть риски в информационной безопасности. При этом разница в итоговой эффективности между роботами и чат-ботами не является принципиальной, однако наибольшие преимущества достигаются при их совместном использовании. Комбинированный подход, сочетающий возможности обеих технологий, позволяет реализовать более устойчивые, масштабируемые и адаптивные решения для автоматизации бизнес-процессов.

Примеры применения. Практическое применение роботов и чат-ботов в различных отраслях наглядно демонстрирует их сильные стороны и области эффективного использования. В финансовом секторе роботы успешно автоматизируют процессы обработки платежей и банковских выписок, где требуется высокая точность и соблюдение строгих регламентов. Например, в компании Energie SaarLorLux внедрение RPA позволило достигнуть 95 % автоматизации в обслуживании клиентов, что привело к увеличению их удовлетворённости [4].

Чат-боты нашли широкое применение в сфере клиентского обслуживания, где они выполняют роль первой линии поддержки. Огромное количество компаний смогло сократить нагрузку на call-центры после внедрения интеллектуального чат-бота, способного самостоятельно решать большинство типовых запросов, таких как проверка баланса, подключение услуг или устранение простых неисправностей. Особенно эффективно такие решения работают в сочетании с системами распознавания речи, позволяя клиентам получать помощь через голосовые каналы. Примеров достаточно много, стоит позвонить в любой из банков, как звонок начинается с общения с голосовым консультантом [5].

В логистике и управлении цепочками поставок RPA-роботы демонстрируют свою эффективность при обработке накладных и таможенных документов. Continental Automotive Holding Co в Шанхае и 4flow внедрили RPA для автоматизации процессов, таких как уведомления, бронирование, назначение, заказ, планирование и создание отчётов, что в итоге привело к увеличению скорости обработки задач, снижению ошибок и освобождению сотрудников от рутинных задач [6].

Розничная торговля и производство активно используют автоматизированные решения, где чат-боты взаимодействуют с клиентами, а роботы обрабатывают их заказы. Компания HRSflow внедрила RPA для автоматизации выпуска производственных заказов через приложения PLM и



ERP. За 20 дней команда разработала автоматизированный процесс, объединяющий две различные программные системы, что привело к значительной экономии и повышению точности [7].

Государственные учреждения также начинают внедрять эти технологии. В одном из ведомств чат-бот помогает гражданам заполнять заявления на получение услуг, а RPA-робот проверяет комплектность документов и передаёт их на обработку в соответствующие отделы.

Эти примеры показывают актуальность и востребованность обеих систем в различных областях. В то время как RPA оптимален для внутренних операций с чёткими правилами, чат-боты лучше подходят для клиентоориентированных процессов, требующих гибкости и способности работать с естественным языком. Наиболее впечатляющих результатов удаётся достичь при комбинировании этих технологий в рамках единой системы автоматизации.

Плюсы и минусы. При внедрении автоматизированных решений важно учитывать преимущества и ограничения как роботов, так и чат-ботов. RPA-технологии демонстрируют исключительную эффективность при обработке структурированных данных, достигая точности выполнения операций на очень высоком уровне. Это становится возможным благодаря строгому следованию заданным алгоритмам и отсутствию необходимости интерпретировать неоднозначные входные данные. Однако такая жёсткая детерминированность одновременно является и слабым местом – при изменении форматов данных или интерфейсов подключённых систем роботы требуют трудоёмкой перенастройки, что увеличивает стоимость владения [8].

Чат-боты обладают принципиально иными характеристиками. Их главное преимущество заключается в способности обрабатывать неструктурированные запросы на естественном языке, что делает их незаменимыми при взаимодействии с клиентами. Современные решения на основе искусственного интеллекта демонстрируют впечатляющую адаптивность, постепенно улучшая качество обслуживания за счёт машинного обучения. Но эта гибкость имеет свою цену – точность распознавания запросов даже в лучших реализациях редко превышает 90 %, что требует продуманной системы эскалации сложных случаев к человеку-оператору.

Скорость развёртывания существенно различается у рассматриваемых технологий. Чат-боты на базе готовых платформ могут быть внедрены за несколько недель, тогда как полноценная RPA-система обычно занимает месяцы кропотливой работы по анализу процессов и разработке сценариев. Однако это различие нивелируется в долгосрочной перспективе: если чат-боты требуют постоянного контроля и дообучения, то правильно настроенные RPA-решения способны годами работать автономно при стабильных бизнес-процессах.

Затраты на внедрение также распределяются неравномерно. Первоначальные инвестиции в RPA заметно выше из-за необходимости глубокой интеграции с корпоративными системами. Чат-боты же позволяют получить быстрый возврат инвестиций за счёт сокращения нагрузки на персонал, но их совокупная стоимость владения может оказаться выше из-за постоянных расходов на поддержку и развитие NLP-моделей.

Важным фактором выступает масштабируемость. Роботы демонстрируют линейную масштабируемость – увеличение объёма обработки требует пропорционального роста количества роботизированных рабочих мест. Чат-боты же легко справляются с пиковыми нагрузками, распределяя запросы между виртуальными агентами, но их производительность напрямую зависит от сложности обрабатываемых запросов.

Безопасность и соответствие регуляторным требованиям также реализуются по-разному. RPA-платформы обычно предлагают развитые механизмы контроля доступа, детального аудита и соответствия отраслевым стандартам. Чат-боты, особенно работающие с персональными данными клиентов, требуют дополнительных инвестиций в защиту информации и могут столкнуться с ограничениями при обработке конфиденциальных данных.

Что выбрать. Принятие решения о внедрении роботов или чат-ботов требует тщательного анализа конкретных бизнес-потребностей и операционных характеристик процессов. Выбор должен основываться не на технологической привлекательности того или иного решения, а на его способности эффективно решать поставленные задачи с учётом существующей ИТ-инфраструктуры и стратегических целей организации.

Для задач, связанных с обработкой структурированных данных и выполнением повторяющихся операций по жёстким алгоритмам, безусловным лидером являются RPA-решения. Они идеально подходят для автоматизации таких процессов, как массовый ввод данных, обработка транзакций, формирование отчётности или интеграция унаследованных систем. В этих сценариях роботы обеспечивают беспрецедентную точность и производительность, работая в режиме 24/7 без снижения качества выполнения операций.

Чат-боты демонстрируют свою максимальную эффективность в сферах, требующих взаимодействия с людьми. При организации клиентской поддержки, обработке первичных запросов, предварительной сортировке обращений или сборе информации эти решения позволяют значительно сократить нагрузку на персонал и улучшить качество обслуживания. Особенно ценны их способности работать с естественным языком и адаптироваться к изменяющимся запросам пользователей.

В современных условиях наиболее перспективным подходом часто оказывается комбинирование этих технологий. Гибридные системы позволяют использовать сильные стороны каждого решения: чат-боты выступают удобным интерфейсом для взаимодействия с пользователями, а роботы обеспечивают надёжное выполнение операций вне поля зрения пользователей. Например, в банковском секторе такая комбинация позволяет клиентам через чат-бот оформлять заявки на продукты, в то время как роботы в фоновом режиме проверяют данные, принимают решения и обновляют учётные системы.

Ключевым фактором при выборе должно стать понимание природы автоматизируемого процесса. Если задача подразумевает работу с чётко определёнными правилами и структурированными данными, следует рассматривать RPA. Если же процесс требует гибкости, обработки неформализованных запросов или взаимодействия с людьми, чат-боты окажутся более подходящим решением. При этом важно учитывать не только текущие потребности, но и перспективы развития процесса, чтобы выбранное решение сохраняло свою эффективность в долгосрочной перспективе.

Заключение. Проведённое исследование наглядно демонстрирует, что как роботы, так и чат-боты представляют собой мощные инструменты цифровой трансформации бизнес-процессов, каждый из которых занимает свою стратегическую специфическую нишу в экосистеме корпоративной автоматизации. Анализ показал, что эти технологии не являются конкурентами, а скорее дополняют друг друга, образуя комплексный подход к оптимизации операционной деятельности предприятий.

Основной вывод исследования заключается в необходимости индивидуального подхода к выбору автоматизированных решений с учётом особенностей конкретных бизнес-задач. Роботы остаются незаменимыми для задач, требующих высокой точности и производительности при обработке структурированных данных, тогда как чат-боты открывают новые возможности в сфере клиентоориентированных сервисов и обработки неформализованных запросов (неструктурированной информации) [9].

Перспективы развития автоматизации бизнес-процессов связаны с дальнейшей конвергенцией этих технологий, особенно в области применения искусственного интеллекта и машинного обучения. Наблюдается тенденция к созданию интеллектуальных RPA-решений с элементами NLP и когнитивных технологий, а также к наделению чат-ботов возможностями выполнения сложных транзакционных операций. Это создаёт предпосылки для появления принципиально новых инструментов автоматизации в ближайшем будущем [10].

Для предприятий, стоящих перед выбором стратегии автоматизации, ключевой рекомендацией становится комплексный аудит существующих процессов с последующим точечным внедрением наиболее подходящих технологий. Важно понимать, что успешная цифровая трансформация требует не просто установки программного обеспечения, а глубокого переосмысления бизнес-процессов и организационной культуры [11]. Только такой подход позволит в полной мере реализовать потенциал как роботов, так и чат-ботов, обеспечивая устойчивое конкурентное преимущество в условиях цифровой экономики.



ЛИТЕРАТУРА

1. Робин RPA // Платформа Robin. – URL: <https://rpa-robin.ru/> (дата обращения: 20.05.2025). – Текст: электронный.
2. Что такое чат-бот // Oracle. – URL: <https://www.oracle.com/cis/chatbots/what-is-a-chatbot/> (дата обращения: 14.05.2024). – Текст: электронный.
3. Карасев, О. И. Метод экспертных оценок в форсайт-исследованиях / О. И. Карасев, Е. И. Муканина // Статистика и экономика. – 2019. – № 4. – С. 4-13.
4. Robotic Process Automation // Natuvion. – URL: <https://www.natuvion.com/challenges/robotic-process-automation/> (дата обращения: 15.05.2024). – Текст: электронный.
5. Барашко, Е. Н. Голосовые помощники / Е. Н. Барашко, А. С. Васильев, С. В. Зубань // Новые импульсы развития: вопросы научных исследований. – 2020. – № 1-1. – С. 47-53.
6. 4flow поддерживает Continental в оценке и внедрении RPA // 4flow. – URL: <https://www.4flow.com/success-stories/continental> (дата обращения: 18.05.2024). – Текст: электронный.
7. Ткаченко, А. И. Роботизированная автоматизация процессов: ответы на актуальные вопросы / А. И. Ткаченко // Московский экономический журнал. – 2022. – № 1. – С. 543-550.
8. Криволятева, М. С. Проблемы выборки тест-кейсов для автоматического тестирования ИТ-продуктов / М. С. Криволятева, Л. В. Гайкова // Наука Красноярья. – 2020. – № 1. – С. 83-94.
9. Поздников, С. Б. Железные дороги: адаптация к переменам и новым реальностям / С. Б. Поздников. – М.: Изд-во «Прометей», 2022. – 302 с.
10. Автоматизация железнодорожных систем / С. Аллаярова, А. Бегалиев, А. Мыратнызова, О. Оразмухаммедова // Символ науки. – 2024. – № 2-2-2. – С. 23-25.
11. Обзор проектов с использованием технологии программных роботов / В. Ю. Хороших, Ю. В. Руссу, М. Р. Надеева, Д. И. Баталов // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2024. – № 4 (40). – С. 50-58.

Григорьев Я. Ю., Альхименко И. Н., Григорьева А. Л.
ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДЛЯ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЛАСТЕЙ

Григорьев Я. Ю., Альхименко И. Н., Григорьева А. Л.
Ya. Yu. Grigoriev, I. N. Alkhimenko, A. L. Grigorieva

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДЛЯ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЛАСТЕЙ

PRE-PROCESSING OF DATA FOR THE PROBLEM OF FORECASTING THE DYNAMICS OF CHANGE IN THE AREAS OF STUDY

Григорьев Ян Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, и. о. ректора Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Yan Yu. Grigoriev – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Acting Rector, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Альхименко Игорь Николаевич – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Igor N. Alkhimenko – 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 Applied Mathematics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. В работе описывается подход к предварительной обработке данных, необходимых для обучения и реализации интеллектуальных моделей прогнозирования изменений состояния земной поверхности, включающий удаление шумов и выделение границ береговой линии водоёма. В работе используются данные, полученные методом дистанционного зондирования со спутников Земли. Обработку полученной информации усложняют атмосферные явления и географические особенности исследуемой территории. Рассматриваются методы удаления шумов на изображениях, обеспечивающие корректное обучение и адекватность прогнозной модели.

Summary. The paper describes an approach to the preprocessing of data necessary for training and implementing intelligent models for predicting changes in the state of the Earth's surface, including noise removal and highlighting the boundaries of the shoreline of a reservoir. The work uses data obtained by remote sensing from Earth satellites. Atmospheric phenomena and geographical features of the studied territory complicate the processing of the information received. Methods for removing noise in images that ensure correct learning and the adequacy of the predictive model are considered.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, предварительная обработка данных, удаление шумов, выделение границ, машинное обучение.

Key words: remote sensing, data preprocessing, noise removal, boundary separation, machine learning.

УДК 004.92

Введение. Исследование направлено на создание интеллектуальной системы прогнозирования изменений наблюдаемых областей земной поверхности с определёнными характеристиками при помощи методов машинного обучения. Работа включает сбор большого объёма данных и их последующую обработку. Для обучения и эффективной работы системы прогнозирования требуются обучающие данные с минимальным количеством искажающей информации. При работе с данными в виде изображений, полученных при помощи спутников, возникают шумы, вызванные облачностью и другими атмосферными воздействиями. Для отслеживания изменения границ исследуемой области требуются удаление шумов на изображении и преобразование выделенных

границ в подходящий для машинного обучения формат. Описывается подход к проведению предварительной обработки данных для задачи прогнозирования на примере береговой линии реки Амур.

Методы и материалы. В работе используются данные, полученные с сенсоров спутника Sentinel-2 L2A при помощи ресурса Sentinel-hub.

Исходные для анализа изображения формируются комбинацией 4, 3 и 2-го спектральных каналов (см. рис. 1). Для классификации воды используется индекс NDSI (см. рис. 2).

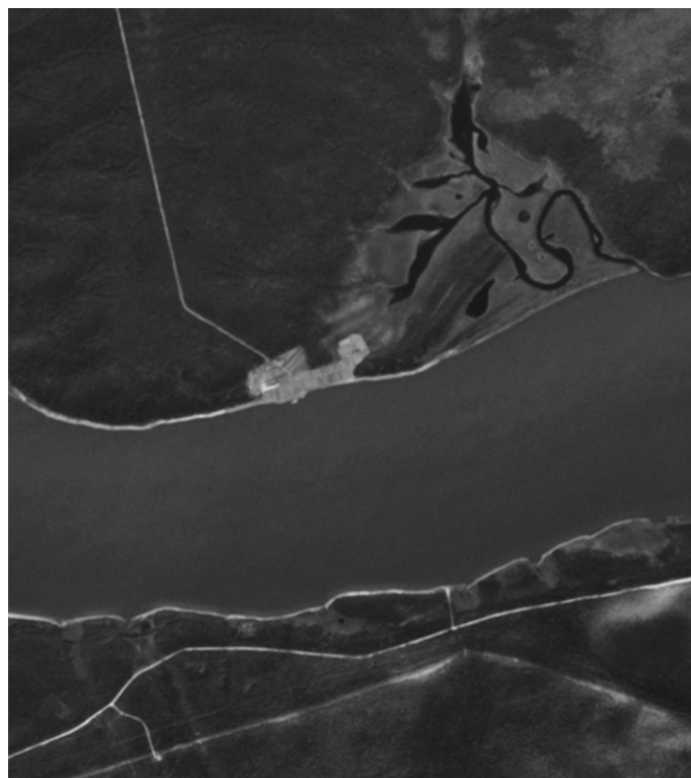


Рис. 1. Пример исходного спутникового изображения

Изображения с выделенной областью исследования (см. рис. 2) содержат участки с наличием шумов в виде облаков и других элементов, не являющихся целью анализа или неподлежащих идентификации.

В рамках задачи по прогнозированию динамики изменения береговой линии реки Амур было собрано более 1000 спектральных спутниковых изображений.

Более 70 % изображений из набора данных содержат шумы, связанные с наличием протоков и облачностью, не позволяющие применять методы бинаризации изображений и выделения границ исследуемой области. Для решения проблемы зашумленности изображений предлагается алгоритм, описанный ниже.

Создание бинарных масок и выделение границ на изображениях. Изображения с выделенной исследуемой областью подлежат бинаризации, обеспечивающей оптимизацию вычислений. Для формирования бинарных масок используется алгоритм k -ближайших средних. На бинарном изображении присутствуют шумы, вызванные наличием областей, не подлежащих исследованию и связанных с облачностью (см. рис. 3).

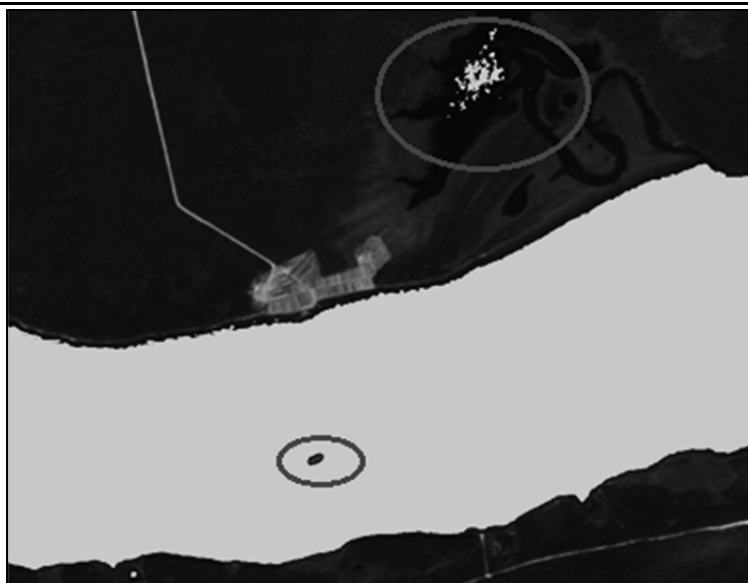


Рис. 2. Использование индекса NDSI

Для удаления мелких шумов применяется гауссово ядро размером 5×5 пикселей, определяемое следующим образом: $K(x_i, y_i) = e^{-\gamma \|x_i - y_i\|^2}$, где x_i, y_i – векторы признаков, $\|x_i - y_i\|^2$ – евклидова норма, γ – параметр, контролирующий ширину гауссового колокола.

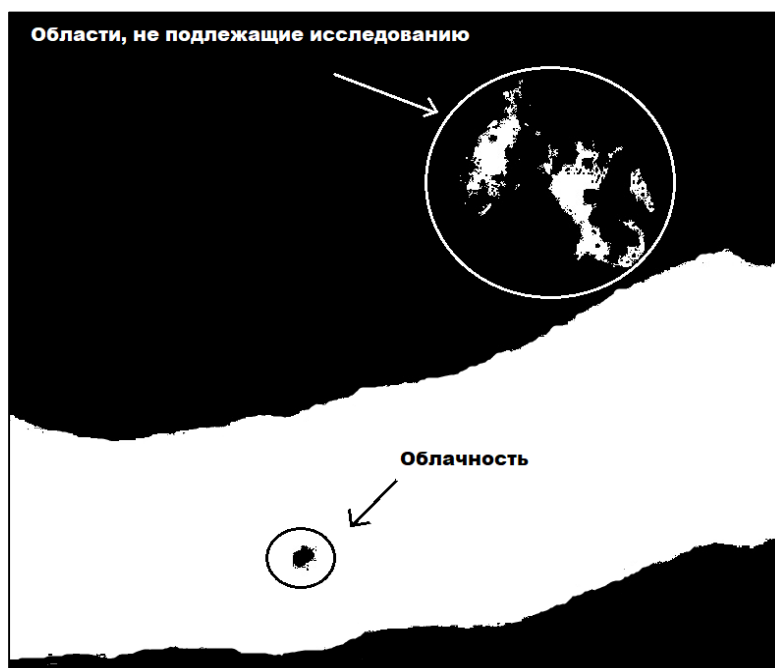


Рис. 3. Шумы на бинарных изображениях

Применяются морфологические операции. Эрозия позволяет уменьшить размеры объектов на бинарном изображении (удаление шумов), дилатация увеличивает объекты на бинарном изображении (для заполнения пробелов). Для бинарного изображения A и структурного элемента B эрозия определяется следующим образом: $A \ominus B = \{z \mid (Bz \subseteq A)\}$, где A – бинарное изображение, B – структурный элемент (гауссово ядро), z – пиксель изображения, Bz – гауссово ядро с центром в точке z . Дилатация описывается следующей формулой: $A \oplus B = \{z \mid (Bz \cap A \neq \emptyset)\}$. Для эффек-

тивного удаления шумов на изображении используют операции открытия $A \circ B = (A \ominus B) \oplus B$ (последовательность эрозии и дилатации) и закрытия $A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B$ (последовательность дилатации и эрозии). Таким образом, в случае если в область интереса попадает шум (например, облака), соответствующие пиксели удаляются, оставшееся место заполняется пикселями того же цвета, что и область интереса. Результат обработки шумов на бинарном изображении приводится на рис. 4.



Рис. 4. Удаление шумов (применение эрозии и дилатации)

После удаления шумов на бинарной маске выделяются границы реки при помощи метода Кэнни (см. рис. 5). Для выделения границ на бинарном изображении используется следующий алгоритм:

1. Проверка входного изображения I на бинарность $I(x, y) \in \{0, 255\}$.
2. Создание маски изображения E (изображение, состоящее из пикселей чёрного та). $E(x, y) = [E_R(x, y), E_G(x, y), E_B(x, y)] = [0, 0, 0]$, где RGB – цветовая модель изображения (Red – красный, Green – зелёный, Blue – синий).
3. Выделение контуров изображения I с использованием эрозии: $E(x, y) = I(x, y) - (I(x, y) \ominus K)$, где K – матрица размера 3×3 .
4. Применение пороговой фильтрации для удаления шумов. Определяются верхний и нижний пороги – T_{high} и T_{low} соответственно. Результирующее изображение описывается следующим образом:

$$E_{filtred}(x, y) = \begin{cases} 255, & \text{если } E(x, y) > T_{high} \\ 0, & \text{если } E(x, y) < T_{low} \\ E(x, y), & \text{если } T_{low} \leq E(x, y) \leq T_{high} \end{cases}.$$

После выделения границ формируется файл формата .csv, содержащий информацию о координатах пикселей выделенных границ: номер пикселя, дата снимка, к которому принадлежит пиксель, значения координат x и y соответственно, отклонение положения пикселя от предыдущего значения (см. рис. 6).

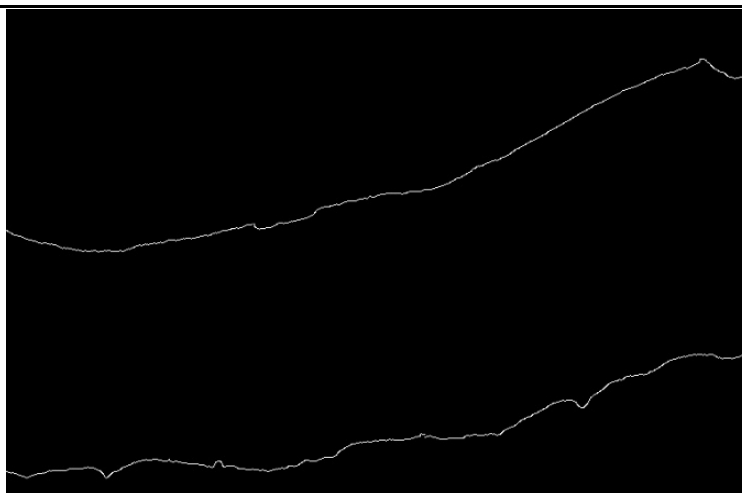


Рис. 5. Выделение границ исследуемой области

Итоговый файл формата .csv содержит записи о 1 524 629 пикселях, прошедших предварительную обработку. Формат даты преобразован в числовой, данные в таблице не содержат пропусков или некорректных значений. Сформированный файл .csv поступает на вход модели машинного обучения.

1	date	x	y1	y2	delta_y1	delta_y2
1093	20240919	321	492.0	744.0	0.0	2.0
1094	20240919	322	493.0	744.0	1.0	0.0
1095	20240919	323	492.0	744.0	-1.0	0.0
1096	20240919	324	493.0	745.0	1.0	0.0
1097	20240919	325	493.0	744.0	6.0	7.0
1098	20240919	326	493.0	738.0	7.0	1.0
1099	20240919	327	492.0	737.0	6.0	1.0
1100	20240919	328	491.0	738.0	6.0	2.0
1101	20240919	329	491.0	743.0	6.0	7.0
1102	20240919	330	491.0	744.0	5.0	8.0
1103	20240919	331	490.0	744.0	1.0	8.0
1104	20240919	332	491.0	743.0	0.0	0.0

Рис. 6. Итоговый вид представления данных после предварительной обработки

Заключение. В работе описывается подход к предварительной обработке данных, поступающих на вход интеллектуальной системы прогнозирования изменений динамики исследуемых областей (на примере береговой линии реки Амур). Для создания бинарных масок используется алгоритм k -средних. Для удаления выявленных шумов используются функции эрозии и дилатации. К обработанным от шумов бинарным маскам применяется алгоритм пороговой фильтрации для выделения границ исследуемой области на изображениях. В рамках данной работы осуществлена предварительная обработка более 1000 спутниковых спектральных снимков, получено 1 524 629 записей в файле формата .csv. Данные из сформированного файла пригодны для обучения моделей прогнозирования.



ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев, Я. Ю. Предварительная обработка данных для реализации методов машинного обучения в задачах экологического контроля / Я. Ю. Григорьев, И. Н. Альхименко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № I (73). – С. 25-31.
2. Zharikova, E. P. Artificial Intelligence Methods for Detecting Water Pollution / E. P. Zharikova, J. Y. Grigoriev, A. L. Grigorieva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Virtual, Online, 10-12 января 2022 года. – Virtual, Online, 2022. – P. 022082. – DOI 10.1088/1755-1315/988/2/022082.
3. Zharikova, E. P. Applications of computer vision in cross-sectoral tasks / E. P. Zharikova, Y. Y. Grigoriev, A. L. Grigorieva // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 200. – P. 415-426. – DOI 10.1007/978-3-030-69421-0_45.
4. Петрова, А. Н. Использование нейронных сетей для системы прогнозирования, использующей релевантный поиск в системах больших данных / А. Н. Петрова, Д. О. Фролов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № I (73). – С. 96-99.
5. Альхименко, И. Н. Сегментация изображений для задачи прогнозирования динамики распространения загрязнений / И. Н. Альхименко, Я. Ю. Григорьев // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы VII Всерос. нац. науч. конф. молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2024. – С. 452-454.
6. Жарикова, Е. П. Применение искусственного интеллекта в задачах анализа состояния акваторий / Е. П. Жарикова, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 2. – № 2 (52). – С. 129-133.
7. Амосов, О. С. Моделирование обнаружения и распознавания аномального поведения динамических систем / О. С. Амосов, С. Г. Амосова // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2020. Труды тринадцатой международной конференции / под общ. ред. С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна. – М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2020. – С. 1151-1158.
8. Альхименко, И. Н. Выделение границ сегментированной области для задачи прогнозирования динамики распространения загрязнений / И. Н. Альхименко, Я. Ю. Григорьев // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы VII Всерос. нац. науч. конф. молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2024. – С. 454-457.
9. Жарикова, Е. П. Применение методов машинного обучения в задачах мониторинга мирового океана и континентальных поверхностных вод / Е. П. Жарикова, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № VII (63). – С. 33-40.
10. Жарикова, Е. П. Анализ изменения спектральных характеристик водной поверхности реки Амур / Е. П. Жарикова, А. Л. Григорьева, Я. Ю. Григорьев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № VII (71). – С. 28-39.
11. Вьюгин, В. В. Элементы математической теории машинного обучения: учебное пособие для студентов по направлению «Прикладные математика и физика» / В. В. Вьюгин; М-во образования и науки Российской Федерации, Московский физико-технический ин-т (гос. ун-т), Ин-т проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН. – М.: МФТИ, 2010. – 231 с.

Петрова А. Н., Фролов Д. О.
ГИБРИДНЫЕ МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ И ОТКРЫТЫХ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ЭМБЕДДИНГОВ

Петрова А. Н., Фролов Д. О.
A. N. Petrova, D. O. Frolov

ГИБРИДНЫЕ МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ И ОТКРЫТЫХ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ЭМБЕДДИНГОВ

HYBRID INFORMATION SEARCH METHODS USING PROBABILISTIC MODEL AND OPEN UNIVERSAL EMBEDDINGS

Петрова Анна Николаевна – кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Проектирование, управление и развитие информационных систем» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: PetrovaAN2006@yandex.ru.

Anna N. Petrova – PhD in Engineering, Head of Design, Management and Development of Information Systems Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: PetrovaAN2006@yandex.ru.

Фролов Дмитрий Олегович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: optcompanys@mail.ru.

Dmitriy O. Frolov – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: optcompanys@mail.ru.

Аннотация. В научной статье рассматриваются современные гибридные методы информационного поиска, сочетающие вероятностное ранжирование на основе классических моделей (BM25) и семантические векторные представления, формируемые с помощью открытых универсальных энкодеров (например, SBERT). Показано, что интеграция разреженной термовой компоненты и плотной семантической компоненты позволяет значительно повысить релевантность и устойчивость поиска, особенно при работе с перефразированными и сложными запросами. Описываются различные схемы гибридизации: линейная интерполяция скорингов, адаптивное взвешивание, а также каскадное переранжирование, при котором семантическая оценка применяется только к ограниченному списку кандидатов. Представлена экспериментальная методология, охватывающая многожанровый корпус и разнообразные типы поисковых запросов, а также набор метрик для комплексной оценки качества. Экспериментальные результаты демонстрируют преимущество гибридных моделей над чисто вероятностными и чисто семантическими подходами по ключевым показателям (nDCG, MAP, Precision@10, Recall@10, MRR, устойчивость к перефразированию и робастность). Отдельное внимание уделено интерпретируемости и практическим аспектам внедрения гибридных архитектур в реальных системах поиска.

Summary. The study examines modern hybrid information retrieval methods that combine probabilistic ranking based on classical models (such as BM25) and semantic vector representations generated using open universal encoders (e.g., SBERT). It is demonstrated that integrating the sparse term-based component and the dense semantic component significantly improves the relevance and robustness of search, especially when dealing with paraphrased and complex queries. Various hybridization schemes are described: linear interpolation of scores, adaptive weighting, as well as cascade re-ranking, where semantic evaluation is applied only to a limited list of candidates. The experimental methodology is presented, covering a multi-genre corpus and diverse types of search queries, as well as a set of metrics for comprehensive quality assessment. Experimental results show the advantage of hybrid models over purely probabilistic and purely semantic approaches across key metrics (nDCG, MAP, Precision@10, Recall@10, MRR, paraphrase robustness, and overall robustness). Special attention is paid to interpretability and practical aspects of implementing hybrid architectures in real-world search systems.

Ключевые слова: информационный поиск, вероятностное ранжирование, семантические векторные представления, открытые эмбединги, гибридные модели, разреженно-плотная интеграция, переранжирование, интерпретируемость.

Key words: information retrieval, probabilistic ranking, semantic vector representations, open embedding, hybrid models, sparse-dense integration, re-ranking, interpretability.

УДК 517.95

Введение. Традиционные поисковые платформы, как правило, основывались на принципах статистического анализа и вероятностных алгоритмах, ориентированных на совпадение слов, что обеспечивало простоту интерпретации, стабильность работы и высокую производительность индексирования. Тем не менее богатство и изменчивость естественного языка (например, использование синонимов, различные способы формулировки, а также морфологические и синтаксические вариации) существенно ограничивают полноту поиска, если опираться исключительно на буквальное соответствие терминов. Современные методы, использующие семантические векторные модели, обученные на обширных текстовых данных, позволяют находить смысловые связи и лучше реагировать на перефразированные запросы. Однако такие подходы могут приводить к ошибочным результатам, особенно в специализированных областях, и зачастую затрудняют интерпретацию для конечных пользователей и экспертов. Объединение статистических и семантических технологий становится необходимым этапом развития: точечная фильтрация на основе редких терминов обеспечивает ясность и точность, а глубокий семантический анализ расширяет спектр релевантных ответов, выходя за пределы прямого совпадения. В рамках данной научной статьи обобщены ключевые принципы построения гибридных поисковых систем, определены методики и критерии оценки, а также рассмотрены существующие ограничения и возможные направления дальнейшего развития.

Теоретические основы гибридизации. Компонент, основанный на вероятностном подходе, оценивает степень релевантности документа через анализ распределения ключевых слов запроса с учётом длины текста и весов, отражающих уникальность терминов. Семантический механизм преобразует как запрос, так и документ в единое пространство признаков, формируемое универсальной моделью кодирования, где степень сходства определяется, например, косинусной мерой или скалярным умножением векторов. В базовой реализации итоговая оценка формируется как сумма с весами: финальный результат вычисляется посредством линейного объединения двух показателей (вероятностного и семантического) с регулируемым коэффициентом λ , который может быть фиксированным, оптимизированным на обучающей выборке, либо меняться в зависимости от параметров запроса (например, количества уникальных терминов, распределения их частоты или выявленного типа поискового намерения).

Существуют и другие архитектуры: последовательное уточнение результатов, когда семантическая фильтрация применяется к отсортированному списку кандидатов; интеграция нескольких факторов через обучаемые модели, такие как бустинг или компактные нейронные сети; комбинирование разреженных и плотных признаков с последующей нормализацией для балансировки диапазонов значений. Гибкая система взвешивания позволяет подстраивать влияние семантики для лаконичных либо перефразированных запросов, а также усиливать роль точного совпадения терминов при обработке специфических или редких запросов.

Архитектура системы. В архитектуре системы предусмотрен этап предварительной обработки, где для документов создаётся обратный индекс, а параллельно формируется компактное представление в виде плотного индекса, при необходимости с применением методов сжатия, таких как квантование или кластеризация, чтобы снизить требования к памяти. На следующем шаге быстрый модуль отбора кандидатов, работающий на основе вероятностной модели, осуществляет первичную фильтрацию документов. Одновременно запрос преобразуется в эмбединг в реальном времени, и этот вектор поступает в компонент объединения, который агрегирует оценки из разных моделей согласно выбранной схеме, будь то простое взвешивание, регрессионная модель или динамическое определение коэффициентов. После интеграции скорингов следует этап нормализации и окончательного ранжирования результатов; для часто встречающихся запросов реализован механизм кеширования с сохранением гибридных ответов, что позволяет минимизировать время отклика. Система оснащена инструментами контроля качества, отслеживающими релевантность, задержки и распределение весовых параметров, а также адаптивными алгоритмами, регулирующими глубину первоначального отбора (например, увеличивая число кандидатов для запросов с редкими

словами), и поддержкой пакетной обработки, чтобы оптимизировать вычисления при получении эмбеддингов.

Методология оценки. Для полноценной оценки эффективности требуется корпус, включающий как широкий общетематический слой (например, новостные и энциклопедические материалы), так и специализированный сегмент, содержащий научные рефераты и профессиональные документы. Запросы предварительно классифицируются по типу задачи: фактологические, навигационные, тематические и многоаспектные – с последующей многоуровневой ручной разметкой релевантности. Основные метрики охватывают $nDCG@k$, MAP, Precision@k, Recall@k, MRR для навигационных запросов, а также показатель устойчивости к перефразированию, отражающий относительное изменение $nDCG$ при систематических изменениях формулировки запроса. Дополнительно используется метрика «Robustness», показывающая долю случаев, когда гибридная система не уступает лучшему из отдельных компонентов. Для проверки статистической значимости различий применяются перестановочные методы или ранговый тест знаков. Абляционные эксперименты позволяют оценить вклад фиксированного и адаптивного λ , влияние нормализации скорингов и сравнить каскадное переранжирование с прямой линейной фузией. Итоговые результаты экспериментов должны содержать сопоставление базовой вероятностной модели, чисто семантического подхода, гибридной схемы с фиксированным и адаптивным весом, а также интерпретацию изменений в распределении рангов и анализ типичных случаев снижения качества.

Целью эксперимента является эмпирическая оценка эффективности предложенной гибридной архитектуры информационного поиска, объединяющей вероятностную модель ранжирования и семантические векторные представления на базе открытых универсальных эмбеддингов. Сравнение проводится с базовыми компонентами: классической вероятностной моделью (BM25) и чисто семантической моделью (универсальный энкодер SBERT).

Данные и запросы. В рамках эксперимента был собран смешанный набор данных, состоящий из 1000 материалов из новостных источников, 500 кратких обзоров научных публикаций и 200 специализированных технических файлов. Было создано 400 различных поисковых запросов, разделённых на категории: запросы на получение фактов, навигационные, тематические и комплексные. Для каждого запроса проводилась оценка релевантности по трёхступенчатой шкале.

В эксперименте сравнивались следующие системы поиска:

1. Вероятностная модель (BM25). Скоринг определяется формулой

$$Score_{BM25}(q, d) = \sum_{t \in q} IDF(t) \cdot \frac{f(t, d) \cdot (k_1 + 1)}{f(t, d) + k_1 \cdot \left(1 - b + b \cdot \frac{|d|}{avgdl}\right)},$$

где $f(t, d)$ – частота термина t в документе d ; $|d|$ – длина документа; $avgdl$ – средняя длина документа; k_1 и b – параметры модели.

2. Семантическая модель (SBERT). Скоринг основан на косинусном сходстве эмбеддингов:

$$Score_{sem}(q, d) = \cos(\vec{q}, \vec{d}) = \frac{\vec{q} \cdot \vec{d}}{||\vec{q}|| \cdot ||\vec{d}||}.$$

3. Гибридная модель. Интегрированный скоринг вычисляется по формуле

$$Score_{hybrid}(q, d) = \lambda \cdot Score_{BM25}(q, d) + (1 - \lambda) \cdot Score_{sem}(q, d),$$

где λ – коэффициент, определяющий вклад вероятностной компоненты (фиксированный или адаптивный).

4. Каскадное переранжирование. На начальном этапе для каждого поискового запроса из объединённого массива документов (включающего новости, научные резюме и технические материалы) производится первичный отбор с помощью вероятностного алгоритма BM25. Этот подход позволяет оперативно выделить топ- N наиболее релевантных документов (например, 100 лучших),



основываясь на совпадении ключевых слов, что значительно уменьшает объём данных для дальнейшего анализа.

Следующий шаг – применение семантической модели SBERT к предварительно выбранным документам. Для этого вычисляется косинусное расстояние между эмбедингами запроса и документов, после чего топ- N список пересортировывается с учётом смысловой близости.

В ходе эксперимента эффективность поиска с многоступенчатым ранжированием анализируется по тем же критериям, что и альтернативные методы (nDCG@10, MAP, Precision@10, Recall@10, MRR, устойчивость к перефразированию и надёжность). Полученные данные свидетельствуют о том, что такой подход обеспечивает лучшие результаты по релевантности и стабильности, превосходя как отдельные вероятностные, так и чисто семантические модели, а также гибридные решения с фиксированной компоновкой. Ключевое преимущество заключается в том, что глубокий семантический анализ проводится только для ограниченного числа документов, а не для всей базы, что критично при работе с большими объёмами информации.

В итоге, многоступенчатое ранжирование сочетает быстрый фильтр BM25 и последующую детальную обработку с помощью SBERT, обеспечивая оптимальное соотношение между точностью, полнотой и затратами вычислительных ресурсов.

Оценка качества поиска. Качество поиска оценивалось по метрикам nDCG@10, MAP, Precision@10, Recall@10, MRR (для навигационных запросов), а также по показателю устойчивости к перефразированию (относительное изменение nDCG при замене формулировки запроса). Дополнительно вычислялась метрика робастности – доля запросов, для которых гибридная система не уступает лучшей из компонент.

Адаптивное значение λ обучалось на валидационном подкорпусе с использованием градиентного поиска по максимизации nDCG@10. Для оценки статистической значимости различий применялся перестановочный тест ($p < 0.05$).

Результаты. В табл. 1 приведены агрегированные значения метрик для всех сравниваемых моделей.

Таблица 1

Сравнение моделей по основным метрикам

Модель	nDCG@10	MAP	Precision@10	Recall@10	MRR	Robustness	Δ nDCG
Вероятностная (BM25)	0.62	0.59	0.65	0.48	0.72	0.68	-0.11
Семантическая (SBERT)	0.67	0.63	0.69	0.52	0.74	0.74	-0.03
Гибрид ($\lambda = 0.5$)	0.71	0.67	0.73	0.57	0.78	0.81	-0.02
Гибрид (адаптивный λ)	0.74	0.69	0.76	0.60	0.80	0.86	-0.01
Каскадное переранжирование	0.73	0.70	0.75	0.59	0.79	0.84	-0.02

Заключение. Анализ показал, что комбинация вероятностных алгоритмов ранжирования с семантическими векторными моделями заметно повышает эффективность поиска по сравнению с классическими решениями. Применение последовательного отбора кандидатов позволяет оптимально сочетать быстродействие и глубину смысловой обработки, поскольку ресурсоёмкие семантические методы используются только для ограниченного числа наиболее подходящих документов. Гибкая настройка весов различных компонентов гибридной системы улучшает прозрачность и стабильность получаемых результатов, что особенно важно при работе с разноплановыми запросами и сложными формулировками.

Эксперименты на корпусе с множеством жанров продемонстрировали, что гибридные подходы превосходят как вероятностные, так и исключительно семантические методы по основным показателям релевантности, полноты, устойчивости к перефразированию и надёжности. Были выявлены отдельные трудности при обработке многозначных запросов, что определяет перспективные направления дальнейших исследований, например, совершенствование адаптивных методов интеграции и более детальное изучение интерпретируемости результатов.

В итоге предложенная стратегия может быть рекомендована для интеграции в современные поисковые платформы, предназначенные для работы с большими и неоднородными коллекциями документов, а также для задач, где требуется высокая точность и гибкость поиска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касумов, В. А. Методы информационного поиска в компьютерных сетях с сверхнасыщенными информационными ресурсами: моногр. / В. А. Касумов. – Баку: Елм, 2004. – 232 с.
2. Лоук, А. В. Тезаурусы в задачах информационного поиска / А. В. Лоук. – М.: Лаборатория информационных технологий, 2002. – 232 с.
3. Нгуен Ба Нгок. Модели и методы поиска информационных ресурсов с использованием семантических технологий: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.11 / Нгуен Ба Нгок. – Томск, 2012. – 198 с.
4. Афонин, П. В. Гибридная система поиска решений на основе временных продукционных правил / П. В. Афонин // Программные продукты и системы. – 2006. – № 2. – С. 5-8.
5. Hybrid Approaches to Information Retrieval: Combining Probabilistic and Semantic Models // ACM Computing Surveys, 2022. – Vol. 55, No. 3.
6. Пантелеев, А. В. Применение гибридного метода случайного поиска в задачах оптимизации элементов технических систем / А. В. Пантелеев, Д. А. Родионова // Научный вестник МГТУ ГА. – 2018. – Т. 21. – № 03. – С. 139-179.
7. Абдрашилов, А. А. Гибридные технологии подачи информации в интернет пространстве Казахстана: синергия и противоречия / А. А. Абдрашилов, А. Б. Альжанова // Новые медиа. – 2025. – № 2 (151). – С. 134-144.
8. Тихонова, Е. В. Методы и методика поиска информации в новой информационной среде – Интернет: учеб. пособие / Е. В. Тихонова, А. В. Маркин. – Нижний Новгород: ННГУ, 2017. – 44 с.
9. Володенков, С. В. Глобальные «гибридные» акторы информационного вмешательства в современные политические процессы / С. В. Володенков // Политекс. – 2019. – № 9. – С. 383-390.
10. Максаков, А. В. Повышение релевантности периодического тематического поиска информации в web: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.11 / Максаков Алексей Владимирович. – М., 2007. – 20 с.
11. Григорьев, Я. Ю. Предварительная обработка данных для реализации методов машинного обучения в задачах экологического контроля / Я. Ю. Григорьев, И. Н. Альхименко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № I (73). – С. 25-31.
12. Андрианов, И. К. Метод определения наиболее термонагруженной области на поверхности лопатки газотурбинного двигателя с использованием нейронной сети / И. К. Андрианов, Д. О. Фролов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № III (83). – С. 11-15.

Бахматов П. В., Фролов А. В., Клешина О. Н.
P. V. Bakhmatov, A. V. Frolov, O. N. Kleshnina

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ОДНОПРОХОДНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ТИТАНОВЫХ
ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ВЫСОКИЕ ЗНАЧЕНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

**DETERMINATION OF CONDITIONS FOR SINGLE-PASS ARC WELDING OF TITANIUM
THIN-WALLED PARTS THAT PROVIDE HIGH MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED
JOINTS**

Бахматов Павел Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологии сварочного и металлургического производства им. В. И. Муравьева» 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 «Technologies of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev», 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 «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Afrolov.kms@mail.ru.

Aleksei V. Frolov – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Afrolov.kms@mail.ru.

Клешина Оксана Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии сварочного и металлургического производства им. В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(962)288-46-40. E-mail: mim@knastu.ru.

Oksana N. Kleshnina – PhD in Engineering, Associate Professor, Department «Technologies of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(962)288-46-40. E-mail: mim@knastu.ru.

Аннотация. Представлена расчётная схема для определения оптимальных параметров режима аргонодуговой автоматической или роботизированной сварки тонкостенных стыковых соединений (толщиной 1,2...2,5 мм) из псевдо α -сплава (например ВТ20) как непрерывной дугой, так и импульсной или пульсирующей, исходя из необходимости поддержания соответствующей скорости охлаждения в диапазоне температур полиморфных превращений для обеспечения равенства предела прочности и угла загиба основного металла и зоны термического влияния при скоростях охлаждения в области превращений 650...750; 550...600; 150...175 °C/с соответственно для толщин 1,2; 2,0 и 2,5 мм. Описан калькулятор параметров режима сварки, созданный авторами на основе расчётной схемы.

Summary. A calculation scheme is presented for determining the optimal parameters of the mode of argon arc automatic or robotic welding of thin-walled butt joints (1.2...2.5 mm thick) made of a pseudo- α alloy (for example, VT20) by both continuous arc and pulsed or pulsating arc, based on the need to maintain an appropriate cooling rate in the temperature range of polymorphic transformations to ensure equality of tensile strength and the bending angle of the base metal and the zone of thermal influence at cooling rates in the transformation region 650...750; 550...600; 150...175 °C/s, respectively, for thicknesses of 1.2, 2.0 and 2.5 mm. The calculator of welding mode parameters, created by the authors based on the calculation scheme, is described.

Ключевые слова: автоматическая или роботизированная аргонодуговая сварка неплавящимся электродом, титановый сплав, параметры режима сварки, расчётная схема, калькулятор.

Key words: automatic or robotic argon arc welding with a non-melting electrode, titanium alloy, welding mode parameters, calculation scheme, calculator.

Исследования, изложенные в материале статьи, проводились в рамках гранта № ВН001/2023.

УДК 621.791.011

Введение. Пористость – характерный дефект, образующийся в процессе формирования соединений титановых сплавов при аргонодуговой сварке неплавящимся вольфрамовым электродом [1]. Основной причиной порообразования является наличие на поверхности свариваемых торцов и прилегающих к ним кромок капиллярно-конденсированной влаги (ККВ) [2]. Удаление ККВ – процесс малоэффективный, ввиду того что насыщение обезвоженных поверхностей влагой происходит за очень короткий промежуток времени, а безотлагательное начало процесса сварки без сборочных, наладочных и контрольных процедур в реальных условиях невозможно. Капиллярная конденсация определяется величиной дефектного поверхностного слоя, обуславливаемого операцией подготовки кромок под сварку (рубка на гильотинных ножницах, фрезерование, полирование, электроэрозионная резка, травление и т. п.). В производственных условиях изготовления титановых конструкций единственным методом резки и непосредственной подготовки кромок под сварку является фрезерование, критерием качества которой принят параметр шероховатости $Ra \leq 3,2$.

Как показано в работах [2–3], вне зависимости от шероховатости после фрезерования показатель насыщенности ККВ формируемой поверхности торцов не является минимальным. Рекомендуемые ПИ 1.4.1898-2003 послефрезеровочные операции (запиловка личным напильником, зачистка вращающимися металлическими щётками, шабрение) либо не обеспечивают необходимые параметры шероховатости, либо не обеспечивают низкие параметры содержания ККВ (за исключением шабрения) [2].

В целом содержание ККВ, а не параметр шероховатости, определяет вероятность порообразования в сварных соединениях титановых сплавов. Снижение содержания ККВ на поверхности стыкуемых торцов при их фрезеровании возможно подбором режимов параметра процесса резания (преимущественно высокоскоростным) [2–4] с достижением $Ra = 0,48 \dots 1,5$, но только в качестве компромисса в задачах обработки толстостенных свариваемых деталей, например при электронно-лучевой сварке. Как видно из результатов значительного числа исследований [3–6], уровень дефектности по пористости может быть снижен управлением термическим циклом сварки при увеличении времени существования сварочной ванны (снижением скорости сварки, увеличением силы сварочного тока, применением флюсов, предварительным подогревом деталей и т. п.), но эта методика приводит к увеличению параметров шва (ширина и усиление), зоны термического влияния и значительно снижает механические свойства сварного соединения, особенно по параметрам σ_b , углу загиба и относительному увеличению.

Для непосредственной операции резки и подготовки торцов под сварку тонколистовых титановых соединений предложен метод газолазерного раскроя (ГЛР) в среде азота и аргона, обуславливающий минимальный параметр ККВ $N = 1$ при высоком значении параметра шероховатости $Ra = 2,5 \dots 3,2$ мкм. Установлено, что при использовании ГЛР уровень дефектности снижается до 0. Таким образом, при решении проблемы возникновения пористости становится возможным управлять параметрами режима термического цикла сварки для достижения необходимых свойств сварных соединений.

Исследованиями [7–9] показано, что при сварке плавлением стыковых соединений титановых сплавов наиболее уязвимой является околошовная зона (ОШЗ), особенно участки прилегания твёрдой структуры основного металла к расплавленному металлу сварочной ванны, во многом определяющей механические свойства сварных соединений. Металл шва и ОШЗ претерпевают фазовые превращения, и их состав, структура и свойства зависят от скоростей охлаждения. Установлено, что критические скорости охлаждения из β -области обуславливают образование мелкозернистой структуры с изменением толщины и ориентировки α -пластин в процессе охлаждения.

В работах [5; 9] приведены данные трёхлетнего статистического анализа механических свойств сварных образцов при технологическом контроле, из которого следует, что для обеспечения равенства предела прочности и угла загиба должны быть выдержаны скорости охлаждения в области превращений 650...750; 550...600; 150...175 °С соответственно для толщин 1,2; 2,0 и 2,5 мм.

На вероятность образования пористости в титановых сплавах также существенно влияет как качество присадочного материала (проволоки), так и скорость его подачи. Так, в работах [2; 3] показано, что времени разогрева рабочего торца проволоки 0,3 с до температуры 350 °С на расстоянии 3 мм недостаточно для удаления с поверхности капиллярно-конденсированных загрязнений, попадающих в расплавленную ванну и образующих поры. Следовательно, требуется снизить скорость подачи проволоки при обеспечении необходимых геометрических параметров формирующегося шва.

Таким образом, для выполнения этого требования ставится задача обратного расчёта режимов сварки от найденных эмпирическим путём данных по скоростям охлаждения.

Разработка расчётной схемы. Для решения поставленной задачи за основу применяется расчётная методика определения скоростей охлаждения от условий конечной и начальной температур и теплофизических свойств свариваемого металла для системы линейного быстро движущегося источника тепла на поверхности пластины [10].

При сварке листов небольшой толщины встык за один проход максимальная температура в точке околосшовного участка зоны термического влияния, удалённой от центра шва на расстояние y , приближённо оценивается по зависимости

$$T_{\max} = T_0 + \frac{q / v_{\text{св}} + 0,478}{c_{\gamma}^2 y} \left(1 - \frac{ay^2}{\lambda \delta} \right).$$

В этом случае мгновенная скорость охлаждения w_0 в точке ОШЗ, находящаяся при температуре T ,

$$w_0 = \frac{2\pi\lambda c_{\gamma} (T_{\max} - T_0)^2}{(q / v_{\text{св}} \delta)^2},$$

где $q = \eta_u I_{\text{св}} U_{\text{д}}$ – эффективная мощность, здесь η_u – эффективный КПД, характеризует долю энергии, передаваемой источником нагрева свариваемому металлу, и зависит от способа и технологии сварки. Значения эффективного КПД нагрева металла для способа ААрДЭС составляет 0,55...0,65 (принят равным 0,65); $I_{\text{св}}$ – сила сварочного тока, А; $U_{\text{д}}$ – напряжение на дуге, В; $v_{\text{св}}$ – скорость сварки, мм/с; δ – толщина листа, мм; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/см·°С; c_{γ} – удельная теплоёмкость, Дж/см³·°С; T_{\max} – температура плавления, °С; T_0 – начальная температура тела, °С (принята 20 °С).

Определение математического выражения представленных на рис. 1 кривых производилось путём оптимизации, обеспечивающей максимум коэффициента корреляции. В результате получения сходимости результатов на уровне 95 % для указанного диапазона толщин и найдены экспоненциальные зависимости вида

$$w = a - b \cdot e^{c \cdot \delta},$$

где a , b и c – коэффициенты уравнения.

Таким образом, уравнения, выражающие минимальную и максимальную скорость охлаждения, примут вид

$$w_{\min} = 660 - 0,13e^{3,3\delta}$$

и

$$w_{\max} = 760 - 0,17e^{3,25\delta}.$$

Коэффициенты уравнений определены аналитически методом покоординатного спуска, результаты которого приведены в табл. 1 и на рис. 2. При этом ставилась задача нахождения коэффициента, при котором общая функция d приближалась к нулю.

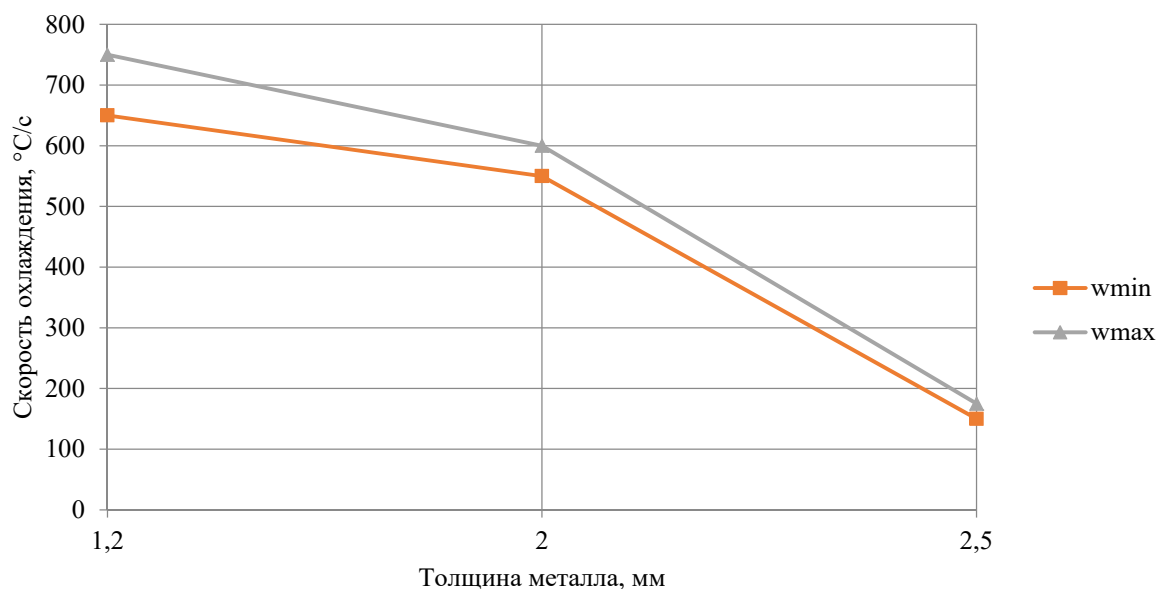


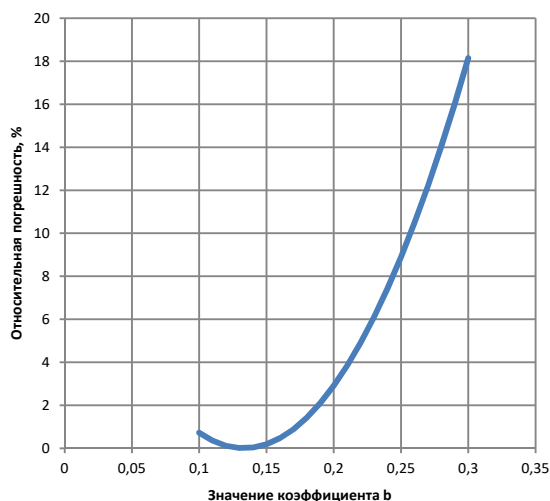
Рис. 1. График диапазонов скоростей охлаждения от w_{min} до w_{max} в зависимости от толщины свариваемых деталей

Таблица 1

Результат подбора значений коэффициентов экспоненциального уравнения

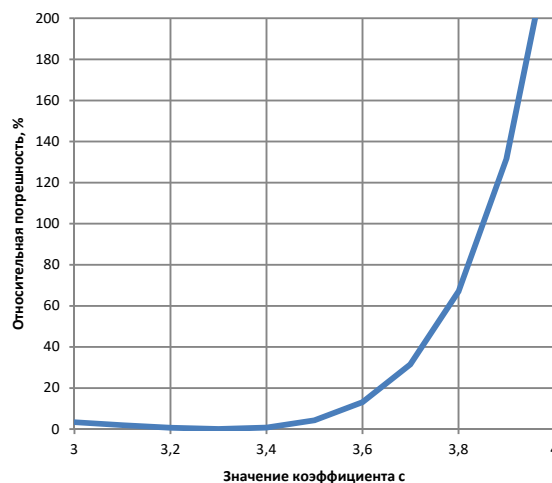
Максимальные скорости			Минимальные скорости		
b	c	d	b	c	d
0,1	3,1	2,019893	0,1	2	0,723982
0,11	3,255	1,508469	0,11	2,1	0,354587
0,12	3,41	1,071806	0,12	2,2	0,115778
0,13	3,565	0,709904	0,13	2,3	0,007556
0,14	3,72	0,422762	0,14	2,4	0,029922
0,15	3,875	0,210382	0,15	2,5	0,182875
0,16	4,03	0,072762	0,16	2,6	0,466415
0,17	4,185	0,009904	0,17	2,7	0,880542
0,18	4,34	0,021806	0,18	2,8	1,425256
0,19	4,495	0,108469	0,19	2,9	2,100558
0,2	4,65	0,269893	0,2	3	2,906447
0,21	4,805	0,506077	0,21	3,1	3,842923
0,22	4,96	0,817023	0,22	3,2	4,909986
0,23	5,115	1,20273	0,23	3,3	6,107636
0,24	5,27	1,663197	0,24	3,4	7,435874
0,25	5,425	2,198425	0,25	3,5	8,894698
0,26	5,58	2,808415	0,26	3,6	10,48411
0,27	5,735	3,493165	0,27	3,7	12,20411
0,28	5,89	4,252676	0,28	3,8	14,0547
0,29	6,045	5,086948	0,29	3,9	16,03587
0,3	6,2	5,99598	0,3	4	18,14763

а)

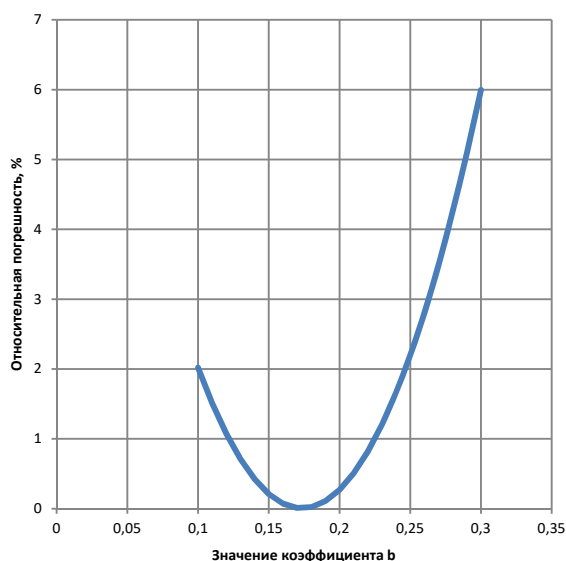


б)

Минимальные скорости охлаждения



в)



г)

Максимальные скорости охлаждения

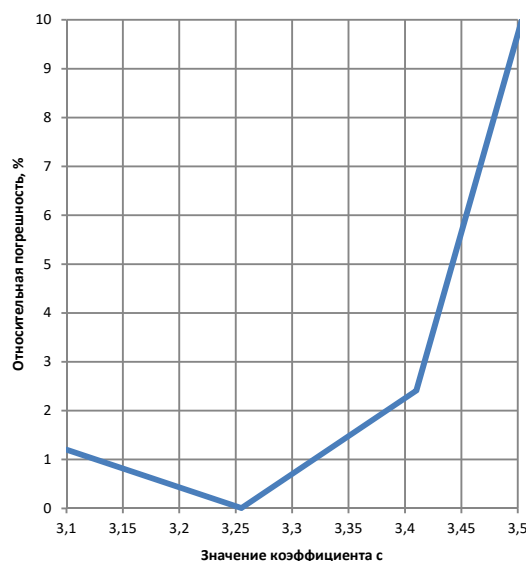


Рис. 2. Графическое отображение результата определения коэффициентов уравнений с учётом скорости охлаждения:

а, в – расчёт коэффициента b ; б, г – расчёт экспоненциального коэффициента c

Таким образом, формула расчёта скорости сварки, выраженная из уравнения расчёта мгновенной скорости охлаждения, принимает вид

$$V_{\text{св}} = \frac{\eta \cdot I_{\text{св}} \cdot U_{\text{д}}}{10^{-5} \cdot \delta} \sqrt{\frac{w_0}{2\pi \cdot \lambda \cdot c_{\gamma} \cdot (T - T_0)^3}}$$

В дальнейших расчётах приняты следующие величины расчётных параметров: $C = 587 \text{ Дж/кг}^\circ\text{C}$; $c_{\gamma} = 2,6 \cdot 10^6 \text{ Дж/мм}^3\text{C}$.

Результатом графического подбора коэффициентов уравнений для максимальных и минимальных скоростей охладений являются графики, показанные на рис. 3.

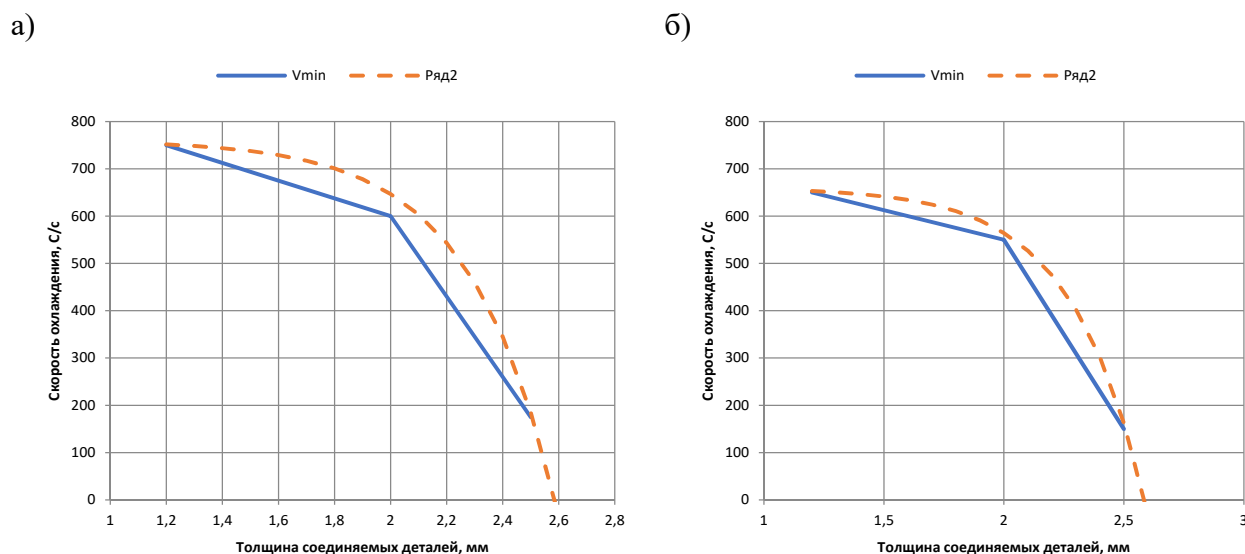


Рис. 3. Результат графического подбора коэффициентов уравнений для максимальных (а) и минимальных (б) скоростей охлаждения

Для расчёта скорости подачи проволоки использовали формулу

$$V_{пп} = 4V_{св}S / \pi d^2,$$

где S – площадь поперечного сечения шва, мм^2 ; $V_{св}$ – скорость сварки, мм/с ; d – диаметр проволоки, мм .

Наиболее выгодным такой подход оказался не для непрерывно действующей дуги (см. табл. 2), где последняя является источником сдерживания сброса тепловой энергии, а при применении пульсирующей дуги с паузой по движению в момент импульса тока. Как известно [10], неподвижный источник тепла организует концентрические линии изотерм вокруг точки ввода энергии, что обуславливает предварительный подогрев места введения энергии до температур полиморфных превращений в следующей точке, а вторая точка сдерживает скорость охлаждения предыдущей. Этот эффект позволяет прогреть соседний с проставленной точкой участок стыка для удаления ККВ, обеспечить равномерную скорость охлаждения по всей длине шва, а также снизить вводимую погонную энергию.

В табл. 3 приведены результаты расчёта параметров режима сварки тонколистовых титановых конструкций толщинами 1,2; 1,5; 2,0 мм в зависимости от установленных скоростей охлаждения в интервале температур 960...650 °C (от температуры полиморфных превращений до температуры отпуска), обуславливающим наиболее благоприятные условия структурной организации и механических свойств. Также расчёт производился из условий перекрытия проставляемых точек на 50 %, т. е. шаг между центрами соответствует половине величины максимальной рекомендуемой ширины шва. При этом действие дежурной дуги ($I_d = 0,1 \dots 0,15 I_{св}$, А) при перемещении горелки между точками обеспечивает равномерность скорости охлаждения и поддержание температуры не ниже 650 °C.

На основе представленной расчётной схемы разработан калькулятор определения оптимальных параметров режима сварки тонкостенных стыковых соединений (толщиной 1,2 ... 2,5 мм) из псевдо α -сплава (например, ВТ20) как непрерывной дугой, так и импульсной или пульсирующей, исходя из необходимости поддержания соответствующей скорости охлаждения в диапазоне температур полиморфных превращений для обеспечения равенства предела прочности и угла загиба основного металла и зоны термического влияния при скоростях охлаждения в области превращений 650...750; 550...600; 150...175 °C/c соответственно для толщин 1,2; 2,0 и 2,5 мм [11].



Таблица 2

Результат расчёта скорости сварки для стыковых соединений сплава ВТ20 с температурой начала полиморфных превращений $T_{\text{пп}} = 960^\circ\text{C}$ при ААрДЭС непрерывной дугой

Толщина свариваемого металла, мм	Сварочный ток, А (рекомендованный ПИ 1.4.1898)		Диаметр вольфрамового электрода, мм	Напряжение на дуге, В	Необходимая скорость охлаждения, $^\circ\text{C}/\text{с}$	Расчётная скорость сварки, мм/с		Скорость подачи проволоки, мм/с	
						min	max	min	max
1,2	min	80	2...3	8	650...750	2,67	2,87	4,24	4,56
	max	100		9		3,76	4,04	5,98	6,42
2,0	min	115	3...4	9	550...600	2,38	2,49	6,05	6,18
	max	140		10		3,22	3,37	8	8,37
2,5	min	115	3...4	9	150...175	0,99	1,07	2,95	3,19
	max	190		10		1,82	1,97	5,42	5,87

Примечание – приведён рекомендуемый ПИ 1.4.1898-2003 диапазон диаметров W электрода; рекомендуется установочная длина дуги 1,0...1,5 мм.

Таблица 3

Результат расчёта скорости сварки для стыковых соединений сплава ВТ20 в температурном интервале $T_{\text{пп}} = 960...650^\circ\text{C}$ при ААрДЭС пульсирующей дугой с осцилляцией по траектории

Толщина свариваемого металла, мм	Сварочный ток, А (рекомендованный ПИ 1.4.1898)		Напряжение на дуге, В	Диаметр точки – ширина шва, рекомендованная ПИ (не более), мм	Расчётная скорость сварки, мм/с		Длина пути горелки до точки – расстояние между центрами точек, мм	Требуемое время между импульсами – время паузы, с	
					min	max		min	max
1,2	min	80	8	8	14,12	15,17	4	0,28	0,26
	max	110	10		24,28	26,08		0,16	0,15
1,5	min	90	10	10	15,71	16,76	5	0,32	0,30
	max	120	12		25,13	26,85		0,20	0,19
2,0	min	160	10	12	19,47	20,34	6	0,31	0,29
	max	200	12		29,21	30,51		0,21	0,20

Примечание – сила тока дежурной дуги не превышает 10...15 % от силы сварочного тока ($I_{\text{д}} = 0,1...0,15I_{\text{св}}$)

Область применения: калькулятор может быть применён для расчёта скорости сварки и скорости подачи проволоки при проектировании технологического процесса автоматической и/или роботизированной сварки тонкостенных титановых деталей, например ребристых панелей летательных аппаратов.

Функциональные возможности: программа запрашивает ввести в свободные слоты:

- теплофизические характеристики свариваемого материала: теплопроводность, плотность, удельную теплоёмкость, объёмную теплоёмкость, температуру полиморфного превращения;
- геометрические характеристики свариваемого металла: толщину листовой заготовки;
- характеристики среды и источника нагрева: температуру окружающей среды, КПД нагрева, напряжение на дуге и величину сварочного тока, диаметр сварочной проволоки.

После ввода данных производится расчёт и отображение диапазона минимальных и максимальных значений скорости сварки и скорости подачи сварочной проволоки.

Внешний вид панели калькулятора приведён на рис. 4.

The screenshot shows a software window titled "UserForm1" with a close button. It contains several input fields and calculation results organized into sections:

- Физические свойства (Physical properties):**
 - Теплопроводность, Вт/м.К: 8
 - Плотность, кг/куб.м: 4450
 - Удельная теплоёмкость, Дж/кг.К: 587
 - Объёмная теплоёмкость, Дж/куб.м.К: 2612150
 - Температура полиморфного превращения, град.С: 960
- Геометрические размеры (Geometric dimensions):**
 - Толщина листовой заготовки, мм: 1.2
- Тепловой режим (Thermal regime):**
 - Температура окружающей среды, град.С: 20
 - Скорость охлаждения, гр.С/с: 650 ... 750
- Параметры сварки (Welding parameters):**
 - КПД нагрева: 0.65
 - Напряжение дуги, В: 10
 - Сварочный ток, А: 120
 - Расчётная скорость сварки, мм/с: 5,01 ... 5,38
 - Диаметр проволоки, мм: 1.6
 - Скорость подачи проволоки, мм/с: 7,97 ... 8,55
- Рекомендации (Recommendations):**
 - 8, 9, 65, 80 (with 9 and 80 highlighted in red)
 - 5,55, 6,94

Рис. 4. Внешний вид панели калькулятора

Выводы.

1. Многолетним статистическим анализом механических свойств сварных образцов при технологическом контроле установлены параметры скорости охлаждения ОШЗ в области превращений 650...750; 550...600; 150...175 °С соответственно для толщин 1,2; 2,0 и 2,5 мм, обеспечивающие равенство предела прочности и угла загиба металла сварных образцов с основным металлом.

2. На основе теории тепловых процессов при сварке и оптимальных параметров скоростей охладений разработана расчётная схема, позволяющая решить обратную задачу – определение рациональных параметров режима (скорости сварки и скорости подачи проволоки) аргонодуговой автоматической и/или роботизированной сварки тонкостенных титановых деталей, например ребристых панелей летательных аппаратов.

3. На базе разработанной расчётной схемы создан калькулятор, позволяющий оперативно определять и назначать параметры режима сварки при разработке технологий изготовления ответственных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Металлография титановых сплавов / [Е. А. Борисова, Г. А. Бочвар, М. Я. Брун и др.]; редкол.: С. Г. Глазунов, Б. А. Колачев (отв. редакторы). – М.: Металлургия, 1980. – 464 с.
2. Муравьев, В. И. Доминирующие факторы образования поверхности раздела, вызывающие капиллярную конденсацию загрязнений и дефектность металла шва титановых конструкций / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов // Сварка и диагностика. – 2016. – № 3. – С. 11-16.
3. Влияние качества присадочной проволоки на порообразование при сварке титановых сплавов / В. И. Муравьев, Р. Ф. Крупский, Р. А. Физулаков [и др.] // Сварочное производство. – 2007. – № 12. – С. 3-8.
4. Влияние структуры поверхности образцов титанового сплава BT20 на их физико-механические свойства / Н. А. Семашко, О. Г. Коптева, В. И. Муравьев [и др.] // Тяжёлое машиностроение. – 2009. – № 3. – С. 23-27.



5. Муравьев, В. И. Исследование влияния режимов термического цикла сварки титановых сплавов в условиях отсутствия порообразования на свойства сварных соединений / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов // Справочник. Инженерный журнал. – 2017. – № 3 (240). – С. 3-10.
6. Влияние режимов термического цикла сварки на структуру и свойства металла шва титановых сплавов / В. И. Муравьев, О. Н. Клешина, А. А. Кузнецов, П. В. Бахматов // Сварочное производство. – 2010. – № 8. – С. 3-9.
7. Шоршоров, М. Х. Фазовые превращения и изменения свойств сплавов титана при сварке: атлас / М. Х. Шоршоров, В. Н. Мещеряков. – М.: Наука, 1973. – 159 с.
8. Лясоцкая, В. С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов / В. С. Лясоцкая; под ред. Б. А. Колачева. – М.: Экомет, 2003. – 351 с.
9. Стробыкин, Н. А. Условия создания бездефектных сварных соединений тонкостенных титановых авиационных конструкций / Н. А. Стробыкин, П. В. Бахматов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № V (77). – С. 98-107.
10. Рыкалин Н. Н. Расчёты тепловых процессов при сварке: справочник по сварке / Н. Н. Рыкалин. – М.: Машгиз, 1960. – С. 9-50.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025682154 Российская Федерация. Калькулятор параметров режима автоматической аргонодуговой сварки неплавящимся электродом титановых тонколистовых стыковых соединений без разделки кромок: № 2025669820: заявл. 04.08.2025; опубл. 21.08.2025 / А. В. Фролов, П. В. Бахматов, О. Н. Клешина; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет». – Бюл. № 9.

Клешнина О. Н., Плетнев Н. О., Кочнев Е. А.
O. N. Kleshnina, N. O. Pletnev, E. A. Kochnev

ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ ТИТАНОВЫХ ЛОПАТОК ИМПЕЛЛЕРА

IMPORT SUBSTITUTION OF TITANIUM IMPELLER BLADES

Клешнина Оксана Николаевна – доцент кафедры «Технология сварочного и металлургического производства имени В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Oksana N. Kleshnina – Associate Professor, Department «Technology of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Плетнев Никита Олегович – старший преподаватель кафедры «Технология сварочного и металлургического производства имени В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Nikita O. Pletnev – Senior Lecturer, Department «Technology of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Кочнев Евгений Анатольевич – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Evgeny A. Kochnev – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. В работе представлена технология сборки и сварки съёмных лопаток импеллера из отечественного титанового сплава BT1-0, используемых для массообмена в условиях автоклавного окисления, взамен импортного сплава Titan Grade 5. Описаны виды износа лопаток в условиях агрессивной среды. Технология включает тавровое соединение толщиной 25 мм. Для достижения поставленной задачи проведён технологический анализ, выбран и обоснован способ сварки, проведены расчёты режимов аргонодуговой сварки, выбрано и обосновано сборочное и сварочное оборудование.

Summary. The paper presents the technology of assembly and welding of removable impeller blades made of domestic titanium alloy VT 1-0, used for mass transfer under autoclave oxidation conditions, instead of imported Titan Grade 5 alloy. The technology includes a 25 mm thick T-joint. To achieve the set task, the following was done: a technological analysis was carried out; a welding method was selected and justified; calculations of argon-arc welding modes were carried out; assembly and welding equipment was selected and justified.

Ключевые слова: сварка титана; неразъёмные соединения; лопатки импеллера; BT1-0.

Key words: titanium welding; permanent joints; impeller blades; VT 1-0.

УДК 621.791.8

Введение. В настоящее время на гидрометаллургических предприятиях наиболее перспективным и широко применяемым способом извлечения золота из золотосодержащих руд является автоклавное окисление [1–4].

Цель автоклавного окисления – полное вскрытие сульфидных минералов и содержащихся в них золотых частиц. При окислении золотосодержащих минералов разрушается и золото, содержащееся в них в виде металлических дисперсных включений или твёрдого раствора [5].

Технология работает следующим образом: руда добывается и измельчается, проходит процесс обогащения. Затем изготавливается пульпа. Для получения пульпы мелкие частицы смешивают с концентрированной серной кислотой (процесс разложения карбонатов, преимущественно кальция и магния, серной кислотой) [6; 7].

Пульпа подогревается и поступает в автоклав. Режим окисления пульпы в автоклаве: температура 200 °С, парциальное давление кислорода 700 кПа, общее давление в автоклаве 2270 кПа. Продолжительность процесса автоклавного окисления составляет 2 ч.

Для равномерного перекачивания густой и плотной суспензии, рыхления, взмучивания или перемешивания раствора и пульпы используют насосы-мешалки. Мешалки в обогащении используют при флотации для эффективного перемещения реагентов, диспергирования воздуха, также интенсивная агитация требуется при выщелачивании.

Для необходимого массообмена в условиях автоклавного окисления в мешалках используют импеллер, который представляет собой рабочее колесо со съёмными лопастями (лопатками). Прямая форма лопаток предупреждает образование вихревых потоков и, следовательно, оказывает существенное противодействие эрозии.

В мешалках ЕКАТО HWL2120N лопатки изготовлены из титанового сплава Titan Grade 5, % мас.: 5,5...6,75 Al; 3,5...4,5 V; 0,08 C; 0,40 Fe; 0,2 O; 0,05 N; 0,015 H; остальное Ti. Данный сплав широко используется в аэрокосмической, медицинской и других областях, где требуется умеренная прочность, хорошая выносливость к нагрузкам, а также высокая стойкость к коррозии.

Лопатка импеллера – конструкция, состоящая из двух частей крепёжного хвостовика и рабочей плиты. Чертёж лопатки с размерами представлен на рис. 1.

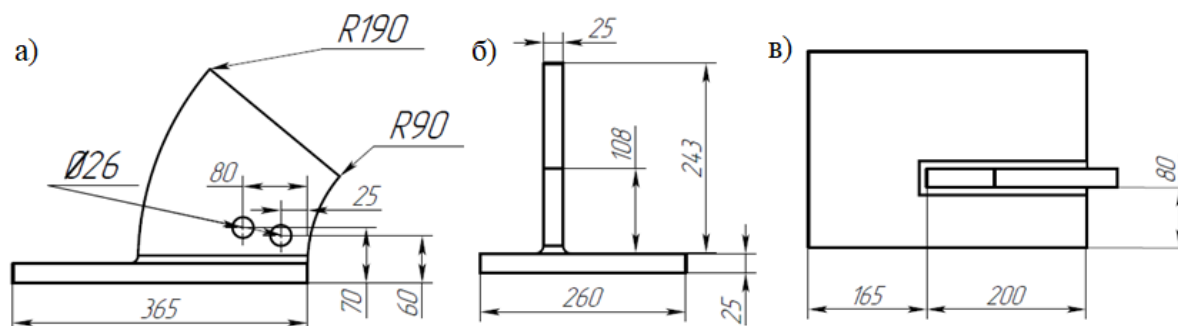


Рис. 1. Чертёж лопатки с размерами:
а – главный вид; б – вид сверху; в – вид слева

Несмотря на то что лопатки импеллера изготовлены из высокопрочного титанового сплава, в условиях агрессивной среды автоклава они подвержены многочисленным видам износа [8].

Скорость износа деталей оборудования зависит от следующих причин: условий и режима работы; материала деталей; смазки поверхностей трения; усилия и скорости скольжения; температуры в зоне контакта деталей; состояния окружающей среды (запылённость и др.) [9].

Виды коррозионно-механического изнашивания: окислительное изнашивание; изнашивание при фреттинг-коррозии.

Виды и характеристики изнашивания:

- механическое изнашивание – изнашивание в результате механического воздействия;
- коррозионно-механическое изнашивание – изнашивание в результате механического воздействия, сопровождаемого химическим и (или) электрическим взаимодействием материала со средой;
- абразивное изнашивание – механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твёрдых тел или твёрдых частиц;
- гидроэрозионное изнашивание – изнашивание поверхности в результате воздействия потока жидкости;
- гидроабразивное изнашивание – абразивное изнашивание в результате действия твёрдых тел или твёрдых частиц, увлекаемых потоком жидкости;
- усталостное изнашивание – механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъёмов материала поверхностного слоя;
- окислительное изнашивание – коррозионно-механическое изнашивание, при котором преобладает химическая реакция материала с кислородом или окисляющей окружающей средой.

В данном случае происходит аварийный (прогрессирующий) износ. Титановые лопатки подвергаются всем вышеперечисленным видам изнашивания, о чём свидетельствует их внешний вид, изменение формы и небольшой срок службы [10].

Аварийный износ вследствие описанных воздействий на лопатках импеллера представлен на рис. 2.



Рис. 2. Аварийный износ лопаток импеллера мешалки

Таким образом, задача разработки технологического процесса сварки лопатки из отечественного титанового сплава, включающего сварку в среде защитных газов, является актуальной. Для достижения поставленной задачи проведён технологический анализ, выбран и обоснован способ сварки, проведены расчёты режимов аргонодуговой сварки, выбрано и обосновано сборочное и сварочное оборудование, разработана технология сварки лопатки из титанового сплава (см. табл. 1).

Таблица 1

Технологическая карта сборки и сварки лопатки

Способ сварки	РАД	Типоразмер, мм	
Тип шва	УШ	Длина	450
Тип соединения (по НД)	T8	Толщина	25
Положение при сварке	H2	Количество КСС	6
Вид соединения	дс (гз)	Шифр клейма	9LSC
Сварочные материалы (шифр по РД 03-613-03, марка)	DT-ER Ti 2 присадочная проволока; неплавящийся электрод WT-20; аргон газобразный высшего сорта по ГОСТ 10157-2016	Основной материал (группа, марка)	M41, BT1-0
Сварочное оборудование (шифр по РД 03-613-03, марка)	ESAB Origo Tig 4300iw TA24 AC/DC	Способ сборки	Сборочное приспособление
		Требования к прихватке: количество прихваток – 2, длиной 20...25 мм	

Предложено использовать отечественный аналог – титановый сплав BT1-0, % мас.: 0,1 Si; 0,07 C; 0,18 Fe; 0,12 O; 0,04 N; 0,01 H; остальное Ti.

Основные трудности при сварке титана обусловлены его высокой химической активностью по отношению к газам (кислороду, азоту, водороду) при нагреве и расплавлении. При комнатной температуре титан взаимодействует с кислородом с образованием альфинированного слоя. При нагреве до температуры 350 °С и выше титан активно поглощает кислород, образуя различные окислы с высокой твёрдостью, прочностью и низкой пластичностью [11].

Для изготовления лопаток используется ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в среде защитного газа аргон.

В связи с тем что сварка лопатки выполняется тавровым соединением и материал, применяемый для изготовления лопаток, имеет толщину 25 мм, используется К-образная разделка кромок (см. рис. 3), подготовленная методом фрезерования.

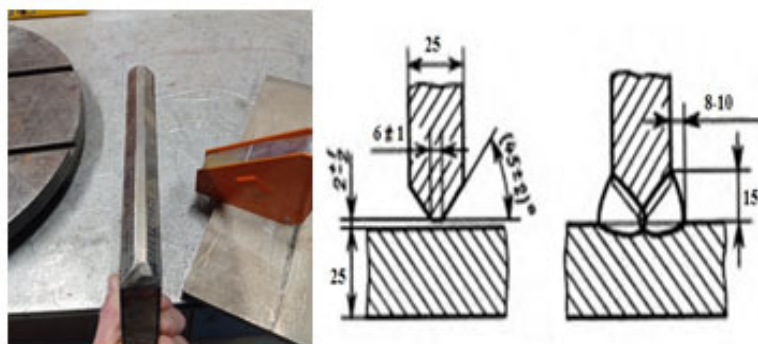


Рис. 3. Конструктивные элементы с К-образной разделкой кромки

Исходя из конструктивных элементов и толщины свариваемого металла, сварка выполняется в 6 проходов, ориентировочные режимы сварки представлены в табл. 2.

Таблица 2

Технологические параметры сварки

Номер шва	Способ сварки	Диаметр электрода, мм	Диаметр присадки, мм	Сила тока, А	Напряжение, В	Расход защитного газа (основной и поддув), л/мин
1	РАД	3,2	2,4	200...240	14...20	15...20
2				230...260		
3				230...260		
4				200...240		
5				200...240		
6				200...240		

Для изготовления лопаток используется лист из титанового сплава марки ВТ1-0 толщиной 25 мм, шириной 1000 мм, длиной 2000 мм. На данном листе производится разметка деталей по заранее изготовленным шаблонам (см. рис. 4).

После разметки производится воздушно-плазменная резка деталей. Далее деталь подвергается механической обработке, фрезеровке фасок и сверлению технологических отверстий. После этого детали собираются и прихватываются по торцам для корректировки и дальнейшей сварки (см. рис. 5).

Сварка происходит в определённой последовательности:

1. заполнение корня шва с двух сторон детали по одному проходу, обязательный дополнительный поддув обратной стороны корня шва;
2. заполнение фасок с двух сторон, с чередованием сторон, в два прохода (вначале с одной стороны детали, затем с другой);
3. усиление с облицовочным швом в три прохода с чередованием сторон (см. рис. 6).

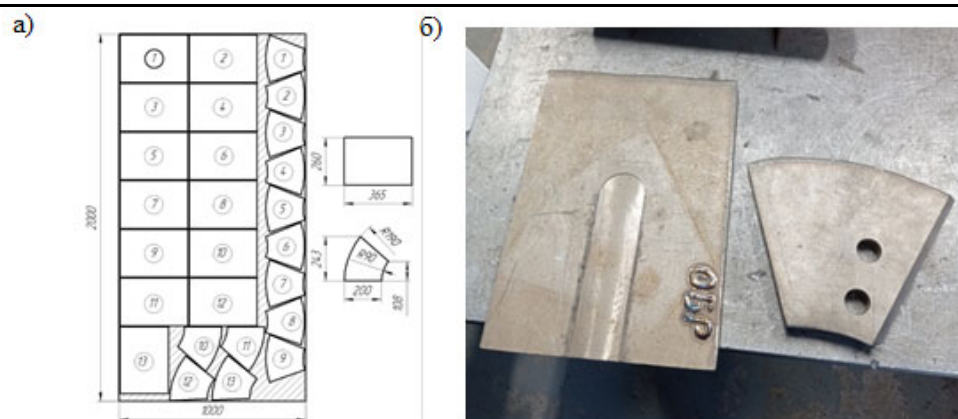


Рис. 4. Разметка деталей на листе титана для последующей плазменной резки:
а – схема раскроя; б – шаблон лопатки

Обязательным условием во время процесса сварки является подача дополнительного поддува аргона в зону уже выполненного шва.

После сварки изделие проходит конечный этап механической обработки и проходит визуально-измерительный контроль.



Рис. 5. Сборка деталей на прихватки и установка в положение под сварку

Заключение. В процессе технологического процесса сборки и сварки лопаток импеллера из титана учтены требования к сварке этого материала и необходимость надёжной защиты сварного шва от воздействия окружающей среды.



Рис. 6. Изготовление лопатки на производстве



Титан обладает высокой химической активностью при повышенных температурах, поэтому сварка в обычных условиях приводит к образованию хрупких и непрочных соединений. Для решения этой проблемы применялись специальные методы сварки в среде инертных газов, таких как аргон, а также использовалось оборудование, обеспечивающее локализованную защиту шва от кислорода и азота. После завершения всех этапов производственного процесса был проведён тщательный анализ результатов. Он показал, что, несмотря на все сложности, изготовление лопатки из титана вполне осуществимо в рамках существующего предприятия с использованием имеющихся в распоряжении ресурсов и квалификации персонала.

Для подтверждения экономической целесообразности внедрения данной технологии был проведён расчёт экономического эффекта. Расчёты учитывали все затраты, связанные с приобретением необходимых материалов, оплатой труда персонала, амортизацией оборудования и потреблением электроэнергии. Сравнение затрат и выгод показало, что применение данной технологии является экономически выгодным для предприятия. В сложившихся условиях санкционных ограничений, которые оказывают существенное влияние на экономику Российской Федерации, ранее зависевшей от импорта высокотехнологичных материалов и оборудования, освоение технологии изготовления деталей из титана приобретает особое значение. Это позволяет предприятию снизить зависимость от импортных поставок, обеспечить стабильность производства и сохранить конкурентоспособность на рынке. Изготовленная деталь, по своим характеристикам и качеству не уступает оригинальным импортным аналогам, что подтверждается результатами проведённых испытаний и проверок. Таким образом, освоение технологии изготовления деталей из титана является важным шагом на пути к импортозамещению и укреплению технологической независимости страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров, Г. В. Сравнение способов повышения извлечения золота из золотосодержащих концентратов двойной упорности в технологии автоклавного окисления / Г. В. Петров, Д. В. Гордеев, В. Р. Бекирова // *iPolytech Journal*. – 2023. – Т. 27. – № 4. – С. 809-820.
2. Edahbi M., Mermillod-Blondin R., Plante B., Benzaazoua M. CIL gold loss characterization within oxidized leach tails: creating a synergistic approach between mineralogical characterization, diagnostic leach tests, and preg-robbing tests. *Minerals*. 2019;9(9):557. <https://doi.org/10.3390/min9090557>.
3. Simmons G. L. Pressure oxidation process development for treating carbonaceous ores at Twin Creeks. In: *Randol Gold Forum*. Golden, 1996;199-208.
4. Chan T., Collins M., Dennett J., Stikma J., Ji J., Kalanchey R., Berezowsky R. Pilot plant pressure oxidation of refractory gold-silver concentrate from Eldorado Gold Corporation's Certej Project in Romania. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2015;54(3):252-260. <https://doi.org/10.1179/1879139515Y.0000000018>.
5. Автоклавное окисление золотосодержащих руд и концентратов / С. В. Валиков, С. С. Гудков, Ю. Е. Емельянов [и др.]. – Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 2016. – 471 с.
6. Miller J. D., Wan R. Y., Díaz X. Preg-robbing gold ores. *Gold ore processing. Project development and operations*. Chap. 49. Elsevier Science, 2016. P. 885-907.
7. Каминский, Ю. Д. Высокоскоростные автоклавные процессы и аппараты для их реализации / Ю. Д. Каминский; отв. ред. Н. З. Ляхов; Российская академия наук, Сибирское отделение, Институт химии твёрдого тела и механохимии. – Новосибирск: Сибирское отделение Российской академии наук, 2020. – 271 с.
8. Кочнев, Е. А. Разработка технологии сварки титановых лопаток импеллера / Е. А. Кочнев, Н. О. Плетнев, О. Н. Клешина // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы VII Всерос. нац. науч. конф. молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2024 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2024. – С. 37-39.
9. Круковский, К. В. Закономерности изнашивания титана ВТ1-0 и сплавов ПТ-3В и ВТ6 с крупнозернистой и ультрамелкозернистой структурой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Круковский Константин Витальевич. – Томск, 2012. – 19 с.
10. Барченков, В. В. Основные технологические процессы переработки золотосодержащих руд / В. В. Барченков. – СПб.: Интермедия, 2013. – 469 с.
11. Овчинников, В. В. Металловедение сварки титановых сплавов / В. В. Овчинников, Н. В. Учеваткина, М. А. Гуреева. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. – 192 с.

Григорьев В. В., Поправко Д. Г., Клешина О. Н.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT20, ВЫПОЛНЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ

Григорьев В. В., Поправко Д. Г., Клешина О. Н.

V. V. Grigorev, D. G. Popravko, O. N. Kleshnina

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT20, ВЫПОЛНЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ

THE EFFECT OF HEAT TREATMENT WITH HIGH-FREQUENCY CURRENTS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF TITANIUM ALLOY VT20 MADE BY ELECTRON BEAM WELDING

Григорьев Владимир Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология сварочного и металлургического производства имени В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)183-02-99. E-mail: grigorev.vlv@gmail.com.

Vladimir V. Grigorev – PhD in Engineering, Associate Professor, Department «Technology of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyov», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)183-02-99. E-mail: grigorev.vlv@gmail.com.

Поправко Даниил Геннадьевич – магистрант кафедры «Технология сварочного и металлургического производства имени В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(909)863-94-64. E-mail: backward322@gmail.com.

Daniil G. Popravko – Master's Degree Student, Department «Technology of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyov», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(909)863-94-64. E-mail: backward322@gmail.com.

Клешина Оксана Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология сварочного и металлургического производства им. В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(962)288-46-40. E-mail: o.n.kleshnina@mail.ru.

Oksana N. Kleshnina – PhD in Engineering, Associate Professor, Department «Technology of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyov», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(962)288-46-40. E-mail: o.n.kleshnina@mail.ru.

Аннотация. Настоящая работа посвящена исследованию локальной термической обработки сварных соединений титанового сплава VT20 в условиях фазового превращения при температуре 980...1020 °С со временем выдержки от 90 до 150 с. Термическая обработка проводилась с использованием установки для закалки токами высокой частоты и специально разработанной оснастки. Были выполнены испытания на статическое растяжение в соответствии с ГОСТ 6996-66, результаты которых показали, что при увеличении времени выдержки до 150 с происходит повышение предела прочности и пластических свойств, что практически соответствует требованиям РТМ 1.4.1379-84.

Summary. The present work is devoted to the study of local heat treatment of welded joints of VT20 titanium alloy under conditions of phase pre-transformation at a temperature of 980-1020 °C with a holding time from 90 to 150 seconds. The heat treatment was carried out using a high-frequency current quenching unit and specially designed equipment. Static tensile tests were performed in accordance with GOST 6996-66, the results of which showed that with an increase in the holding time to 150 seconds, an increase in tensile strength and plastic properties occurs, which practically meets the requirements of RTM 1.4.1379-84.

Ключевые слова: титановые сплавы, электронно-лучевая сварка, механические свойства.

Key words: titanium alloys, electron beam welding, mechanical properties.

УДК 621.791

Введение. На сегодняшний день титановые сплавы активно используются в конструкции современных летательных аппаратов, и для соединения толстостенных элементов, выполненных из титановых сплавов BT20 и BT23, применяется высококонцентрированный источник энергии – электронно-лучевая сварка [1].

Обязательной операцией после формообразования подборок силовых элементов из сплава BT20 и электронно-лучевой сварки является термическая обработка при температуре 680 °С в течение 2 ч с целью снятия остаточных напряжений после механической обработки и сварки [2].

Длительность цикла термической обработки элементов из сплава BT23 может занимать от 15 до 20 ч в связи с особенностью сплава (термоупрочнение) и включать такие операции термической обработки, как закалка, отжиг и старение [3].

Из-за высокой трудоёмкости и продолжительного цикла термической обработки возникает необходимость в поиске менее трудоёмких методов термической обработки, включая локальные способы для обработки сварных соединений.

Известен способ [3] локальной термической обработки электронным лучом после процесса электронно-лучевой сварки, однако данный способ не позволяет выполнить прогрев элементов с большой толщиной.

Наиболее перспективным способом локальной термической обработки в настоящее время является термическая обработка в интервалах фазовых превращений [4].

Целью настоящей работы является установление возможности локальной термической обработки токами высокой частоты сварных соединений из сплава BT20, выполненных электронно-лучевой сваркой, а также влияние рассматриваемого способа на механические свойства и микроструктуру.

Перед сваркой образцов выполнена высокопроизводительная механическая обработка стыкуемых кромок с целью минимизации порообразования сварных соединений на станке DMU 80P duoBLOCK по режимам, представленным в табл. 1. Габариты темплетов составляли 30×60×130 мм.

Таблица 1

Режимы механической обработки стыкуемых кромок

Номер темплета	1	2	3
Обороты, об./мин	500	1000	2500
Подача, мм/мин	200	400	1000
Скорость резания $V_{рез}$	25	40	125

Процесс резания выполнялся с использованием отечественного инструмента производства СКИФ-М – MT190-VBE-016Z16R0-38-H070-L150-R0-T. Электронно-лучевую сварку темплетов выполняли с использованием электронно-лучевой установки КЛ-144 при режимах сварки $U = 30$ кВ, $I_{св} = 350$ мА, $V_{св} = 20$ м/ч. После сварки проводили раскрой темплетов на слайсы для возможности проведения рентгенографического контроля и термической обработки с последующим разрушающим контролем. Внешний вид полученных образцов после раскроя представлен на рис. 1.

Термическая обработка токами высокой частоты (ТВЧ) выполнена с использованием установки АМБИТ ИМ 30-8-50 (см. рис. 2), специализированной оснастки для термической обработки образцов с контролем температуры термопарой типа ХА (см. рис. 3). Термическая обработка выполнена на следующих режимах установки ТВЧ: частота 50 кГц, мощность 28,5 кВт.

В связи с тем что установка является маломощной, необходим косвенный нагрев титановых образцов, для этого использовано стальное кольцо (см. рис. 3, позиция 2), в котором высверлено отверстие, предназначенное для фиксирования термопары и измерения температуры.

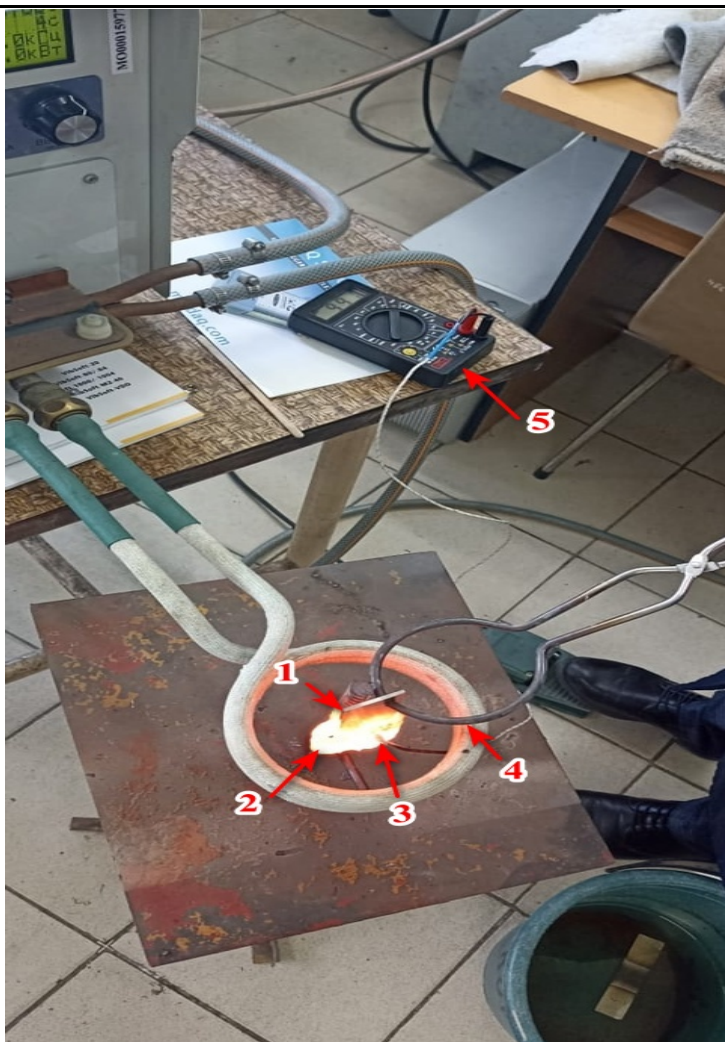


Рис. 1. Внешний вид образцов

Образцы выдерживались в интервале фазового превращения при температуре 980...1020 °С со временем выдержки от 90 до 150 с (см. табл. 2).



Рис. 2. Оборудование АМБИТ ИНМ 30-8-50



1 – образец; 2 – кольцо для косвенного нагрева; 3 – место крепления термопары; 4 – кузнечные щипцы для исключения образования прижогов при контакте образца с кольцом; 5 – мультиметр с термопарой типа ХА для регистрации температуры
Рис. 3. Процесс термической обработки образца

Таблица 2

План проведения исследований

№ образца	Режим термической обработки и выдержка	Назначение образца
1.1	980...1020 °С, 90 с	Оценка структуры, микротвёрдость
1.2		Статическое растяжение
2.1	980...1020 °С, 120 с	Оценка структуры, микротвёрдость
2.2		Статическое растяжение
3.1	980...1020 °С, 150 с	Оценка структуры, микротвёрдость
3.2		Статическое растяжение

Оценка микроструктуры сварных соединений выполнялась на металлографическом микроскопе NikonMA200 в зонах основного металла, сварного шва и зоны термического влияния.

Макро- и микроструктура образцов представлены на рис. 4-6.

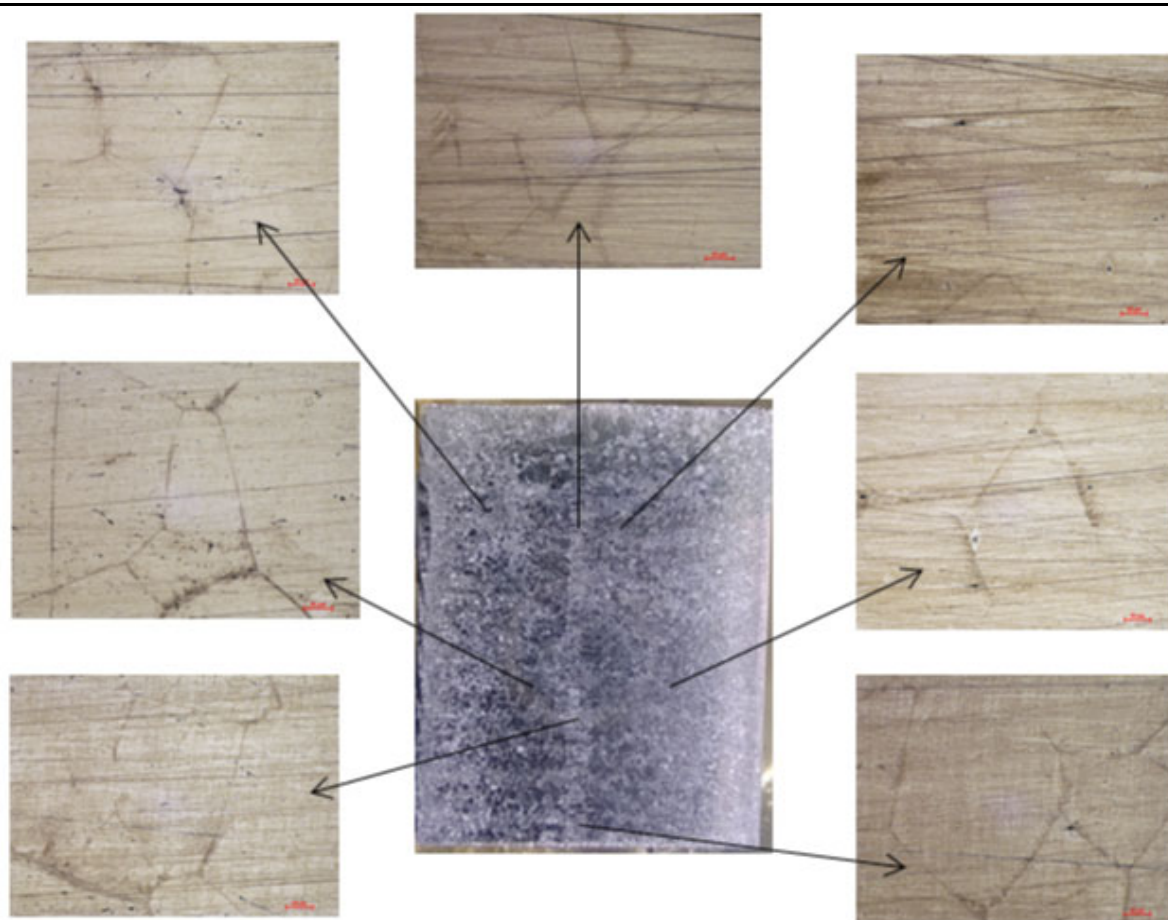


Рис. 4. Макро- и микроструктура образца 1.1

Зона термического влияния образца 1.1 характеризуется колониальной структурой, сформированной в результате распада высокотемпературной β -фазы при закалке. Внутри исходных β -зёрен наблюдается равномерное распределение игольчатых пластин α -фазы, ориентированных преимущественно в одном направлении, что свидетельствует о колониальном механизме роста. Границы исходных β -зёрен различимы, однако частично размыты из-за фазовых превращений в процессе быстрого охлаждения.

Размер зёрен β -фазы сравнительно крупный, что связано с длительным пребыванием металла в высокотемпературной области β -фазы при выдержке 90 с. Быстрое охлаждение в воде способствует фиксации мартенситоподобной структуры α' -фазы, формирующей плотный пакет игольчатых пластин. Межпластинчатое расстояние α -пластин небольшое, что указывает на высокую скорость охлаждения.

Микроструктура основного металла образца 1.1 характеризуется равномерным зёрненным строением, состоящим из крупных β -зёрен с развитым внутрикристаллическим распадом. Внутри зёрен β -фазы формируются плотные пакеты пластинчатой α -фазы, расположенные в согласованных кристаллографических ориентациях, что указывает на колониальный механизм роста α -фазы при распаде β -фазы во время закалки.

Размер зёрен β -фазы в основном металле несколько превышает аналогичный показатель в зоне термического влияния. Быстрое охлаждение в воде фиксирует плотную мартенситоподобную α' -фазу с характерным мелким межпластинчатым расстоянием.

Микроструктура сварного шва образца 1.1 после термической обработки характеризуется выраженной колонной морфологией β -фазы и плотной мартенситоподобной α' -структурой с мелкими пакетами пластин при высокоинтенсивном охлаждении.

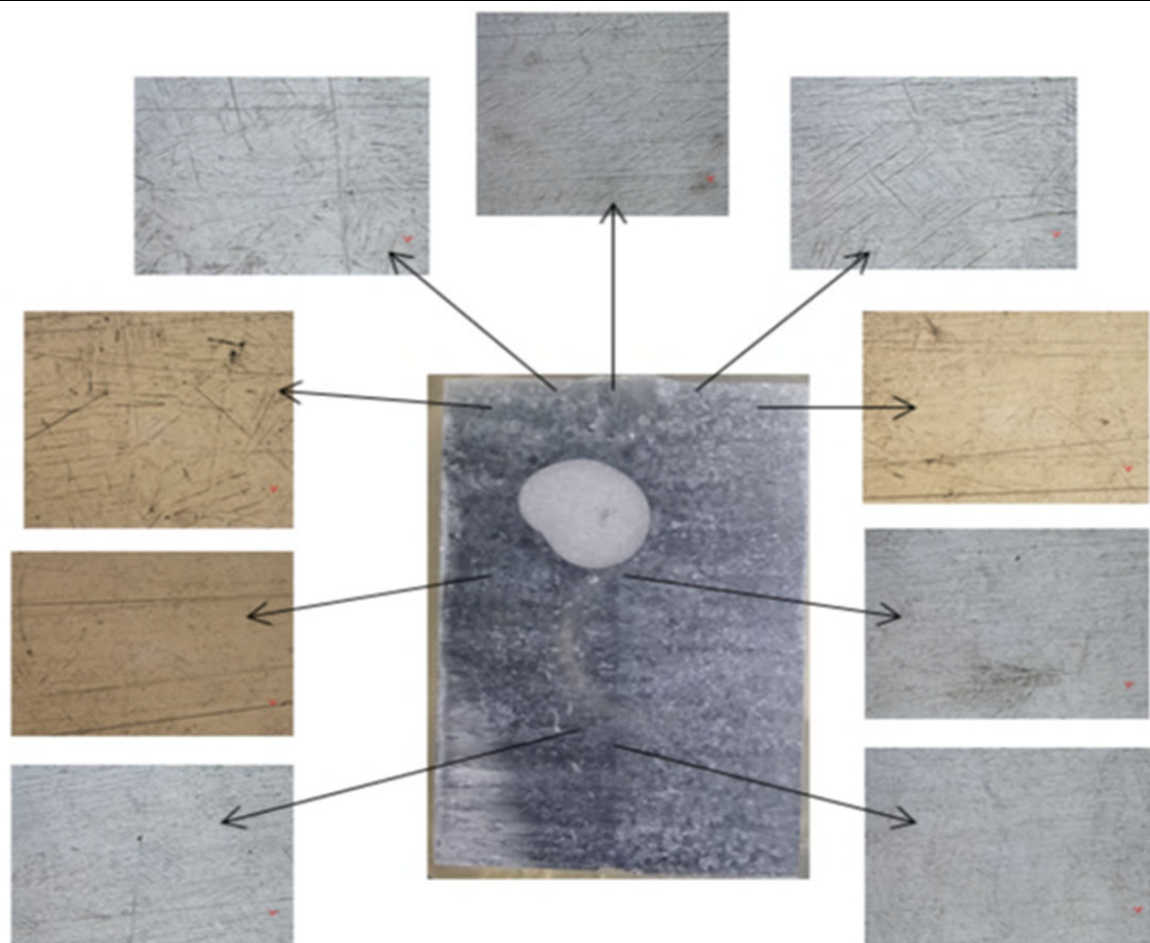


Рис. 5. Макро- и микроструктура образца 2.1

Микроструктура зоны термического влияния образца 2.1 характеризуется выраженной колониальной структурой с формированием игольчатых пакетов α' -фазы внутри β -зёрен. По сравнению с образцами, полученными при выдержке 90 с, наблюдается увеличение размеров β -зёрен, что обусловлено более длительным пребыванием в β -области и активацией процессов зерноукрупнения. Границы β -зёрен отчётливо визуализируются и демонстрируют признаки роста.

Внутризёренное строение представлено плотными колониями α' -фазы, образующимися в процессе распада β -фазы при интенсивном охлаждении. Морфология α' -фазы сохраняет игольчатый характер, при этом межпластинчатое расстояние остаётся минимальным, что подтверждает высокую скорость охлаждения в водной среде.

Микроструктура основного металла образца 2.1 демонстрирует развитие колониальной структуры с укрупнёнными β -зёрнами, что обусловлено увеличенным временем пребывания в β -области в течение выдержки 120 с. Границы β -зёрен чётко визуализируются, зёрна имеют вытянутую или полигональную форму, указывающую на активизацию процессов зёрненного роста.

Микроструктура сварного шва образца 2.1 характеризуется развитием вытянутых β -зёрен, сформировавшихся в процессе первичной кристаллизации сварочной ванны. После последующей термической обработки в пределах β -зёрен происходит интенсивный распад β -фазы с образованием плотных колоний мартенситоподобной α' -фазы.

Пластины α' -фазы ориентированы согласованно в пределах β -зёрен, образуя компактные пакеты. При данном увеличении визуально определяются чёткая граница β -зёрен и равномерность распределения игольчатых α' -пластин в их объёме. Межпластинчатое расстояние остаётся минимальным, что свидетельствует о высоких скоростях охлаждения и эффективной фиксации мартенситной структуры.

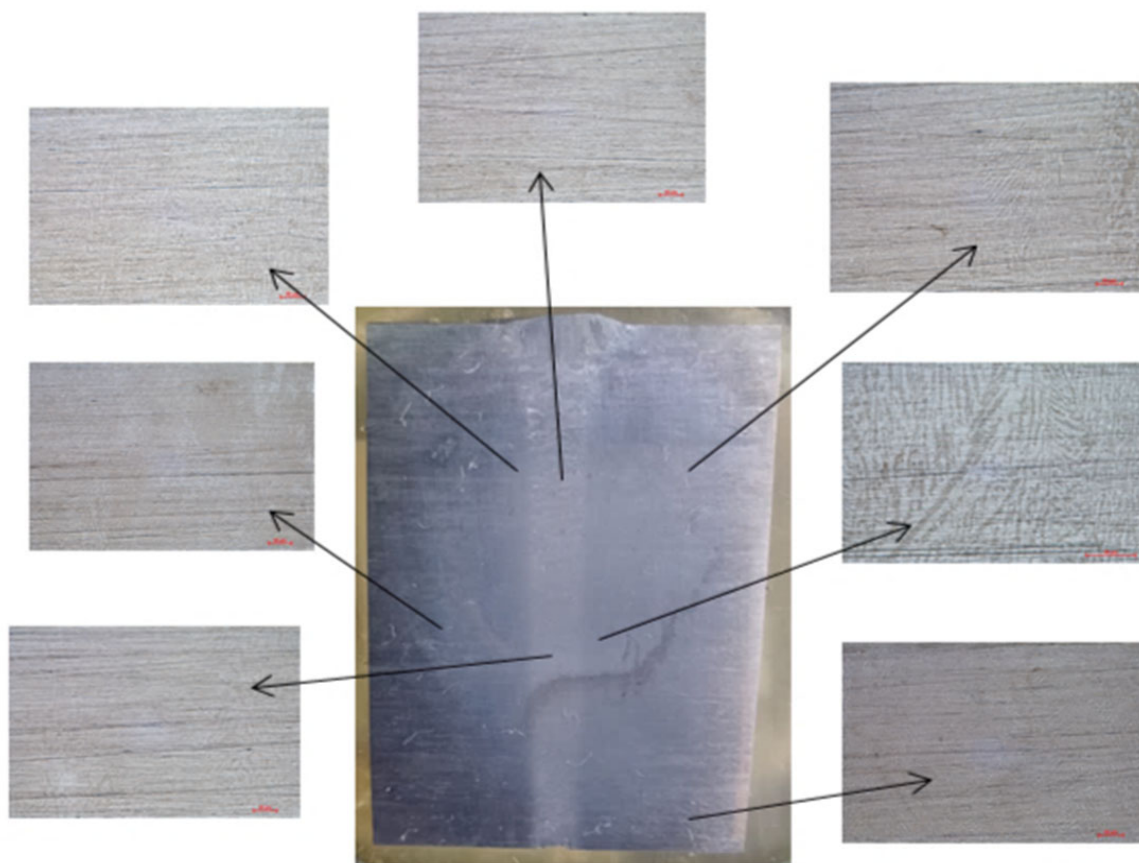


Рис. 6. Макро- и микроструктура образца 3.1

Микроструктура зоны термического влияния образца 3.1 при выдержке 150 с характеризуется выраженным укрупнением β -зёрен при сохранении плотной мартенситоподобной структуры α' -фазы, что подтверждает влияние длительного пребывания в β -области в сочетании с интенсивным охлаждением.

Микроструктура основного металла образца 3.1 после выдержки 150 с демонстрирует стабильное развитие плотной мартенситоподобной структуры α' -фазы с сохранением тонкой пластинчатой морфологии и высокой плотности пластин при интенсивном охлаждении, несмотря на дальнейшее укрупнение β -зёрен.

Микроструктура сварного шва образца 3.1 при выдержке 150 с характеризуется выраженным укрупнением β -зёрен и стабильной плотной мартенситоподобной α' -структурой с минимальным межпластинчатым расстоянием при интенсивном охлаждении.

Таким образом, в процессе термической обработки сварных соединений сплава VT20 при температуре 980 °С с выдержками 90, 120 и 150 с и последующим охлаждением в воде наблюдается стабильное формирование мартенситоподобной α' -фазы во всех зонах соединения.

Увеличение времени выдержки приводит к закономерному укрупнению β -зёрен во всех исследованных зонах (основной металл, зона термического влияния, сварной шов), что связано с ростом зерна при длительном пребывании в β -области.

Несмотря на укрупнение β -зёрен, морфология мартенситоподобной α' -фазы сохраняется стабильной: формируются плотные пакеты игольчатых пластин с минимальным межпластинчатым расстоянием, что указывает на эффективное переохлаждение в процессе термической обработки.

При всех рассмотренных режимах термической обработки структура сварного соединения сохраняет высокую однородность и стабильность. Дефекты сварочного или термического проис-

хождения (поры, включения, микротрещины, признаки рекристаллизации или фазовой деградации) не зафиксированы.

Полученные результаты подтверждают, что исследованный режим термической обработки обеспечивает стабильное фазовое состояние, однородность морфологии и отсутствие структурных дефектов сварного соединения сплава VT20 при различной продолжительности выдержки.

Характер изменения микроструктуры при увеличении времени выдержки соответствует классическим термокинетическим закономерностям фазовых превращений в $\alpha+\beta$ титановом сплаве VT20 при высокотемпературной обработке с последующим охлаждением в воде.

После оценки микроструктуры произвели измерение микротвёрдости в поперечном сечении сварных соединений с целью определения степени снятия остаточных напряжений. Измерение микротвёрдости выполняли с использованием микротвердомера Shimadzu HNV-2. Измерения твёрдости выполняли с шагом 3 мм при величине нагрузки на индентор 0,9807 Н.

Распределение твёрдости по сечению швов в зонах усиления, центра и корня представлено на рис. 7-9. Характер распределения значений микротвёрдости имеет сложный характер, который не соответствует классическому распределению твёрдости с её повышением в зоне сварного шва. Это связано с тем, что сварной шов, как и зона термического влияния, с основным металлом подвергались одновременному нагреву. Средние значения микротвёрдости (по 6 измерениям в каждой зоне) в сечении швов при времени выдержки 90 и 120 с являются практически идентичными (447 HV в зоне усиления), однако при времени выдержки в 150 с наблюдается снижение параметра микротвёрдости практически на 18 %.

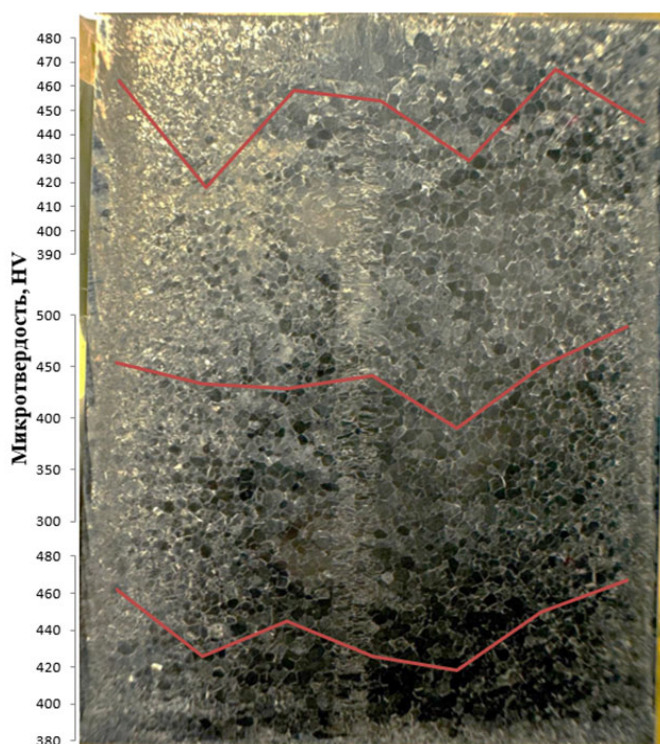


Рис. 7. Распределение микротвёрдости в сечении образца 1.1

Для исследования влияния локальной термической обработки на механические свойства сварных соединений использованы образцы, вырезанные из темплетов с габаритами $3 \times 30 \times 120$ мм, которые соответствуют ГОСТ 6996-66 (тип образца XII).

Испытания на статическое растяжение выполнены с использованием испытательной машины Instron 3382, скорость растяжения составляла 2 мм/мин.

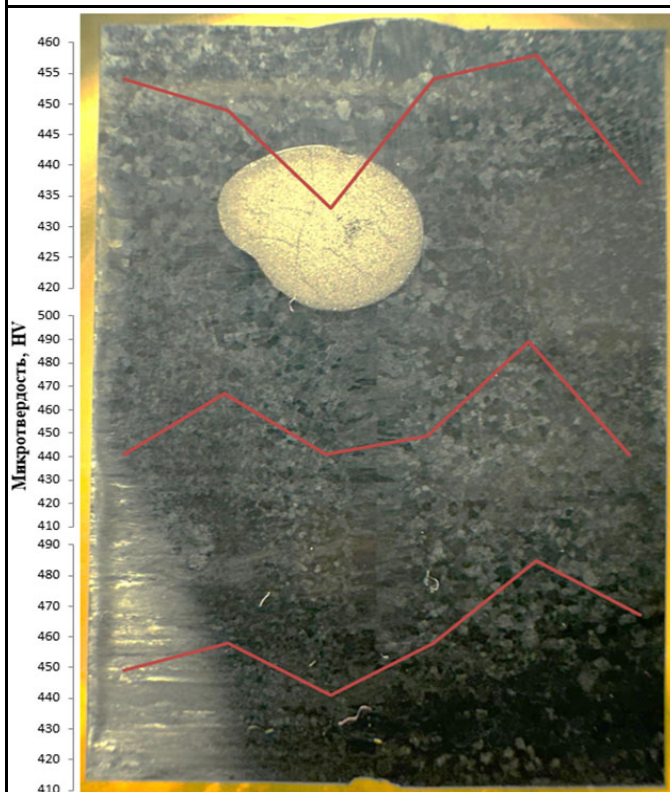


Рис. 8. Распределение микротвёрдости
в сечении образца 2.1

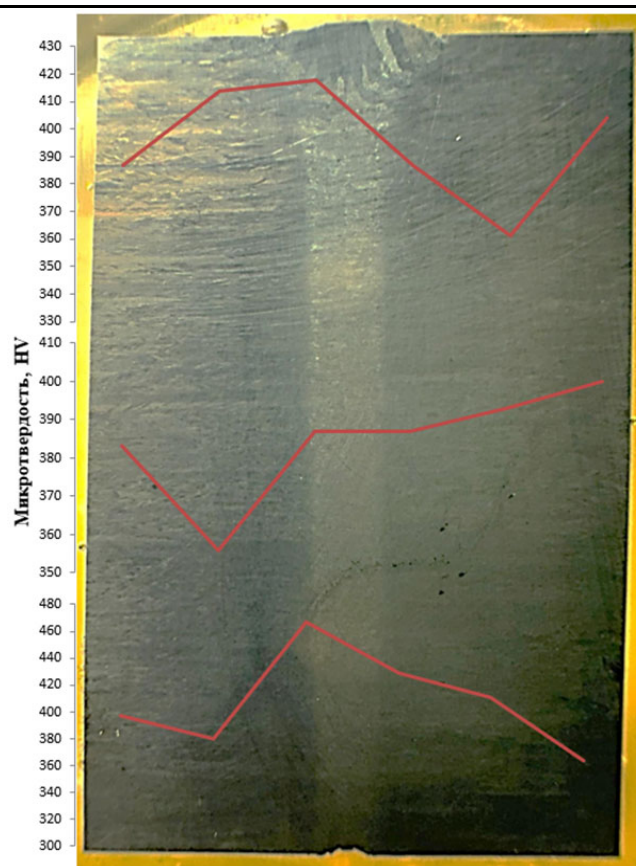


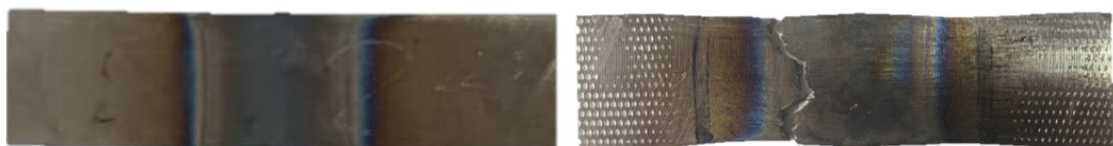
Рис. 9. Распределение микротвёрдости
в сечении образца 3.1

Внешний вид сварных соединений до и после статического растяжения представлен на рис. 10. Зона термического влияния после локальной термической обработки составляет 33 мм, на некоторых образцах имеются участки цветов побежалости и прижоги от контакта со стальным кольцом. Цвет образцов после термической обработки соответствует тёмно-серому, что соответствует температуре более 700 °С.

Образец 1.2



Образец 2.2



Образец 3.2

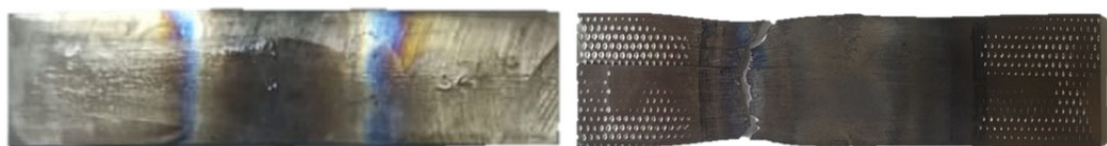


Рис. 10. Внешний вид образцов до и после испытаний на статическое растяжение

Данные о механических свойствах образцов после испытаний представлены в табл. 3 и на рис. 11.

Таблица 3

Результаты испытаний на статическое растяжение

№ образца	Время выдержки, с	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
1.2	60	869,2	2,3	3,34
2.2	120	888,6	8,06	9,13
3.2	150	956,7	6,89	15,16

Разрушение сварных соединений в большинстве случаев произошло в переходной области между зоной термического воздействия от ТВЧ и основным металлом. Наблюдается повышение предела прочности и пластических свойств с увеличением времени выдержки образцов.

Основным нормативным документом на электронно-лучевую сварку изделий из титановых сплавов является РТМ 1.4.1379-84, согласно нормативному документу, предел прочности термически обработанного сварного шва должен быть не менее 960 МПа. В нашем случае наибольшая сходимость к данному требованию наблюдается при выдержке 150 с.

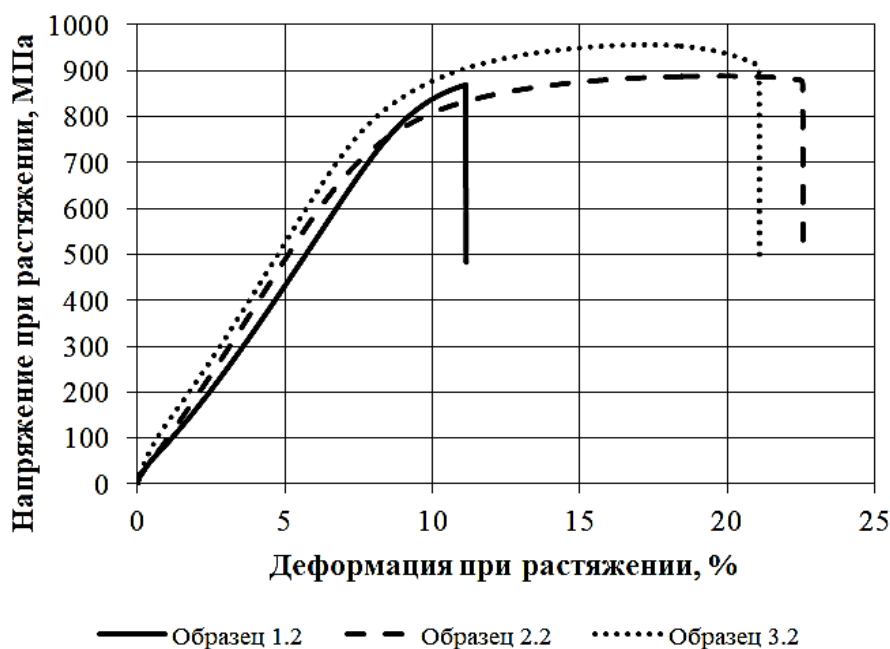


Рис. 11. Диаграмма деформации образцов

После разрушающего контроля на статическое растяжение произвели анализ изломов образцов сварных соединений с помощью электронной микроскопии, применяя электронный микроскоп Hitachi S3400N. Подготовка образцов под электронную микроскопию выполнялась по стандартной методике: промывка образцов спиртом в ультразвуковой ванне УЗУ-025 с последующей просушкой при комнатной температуре.

В образце 1.2 наблюдается (см. рис. 12) классический транскристаллитный скол – хрупкое внутризеренное разрушение по определённым кристаллографическим плоскостям. Наличие ярко выраженных «речных узоров» и радиальных борозд, а также отсутствие признаков значительной пластической деформации (вязкого разрушения) однозначно указывают на этот механизм. Разрушение локализовано в области сварного соединения.

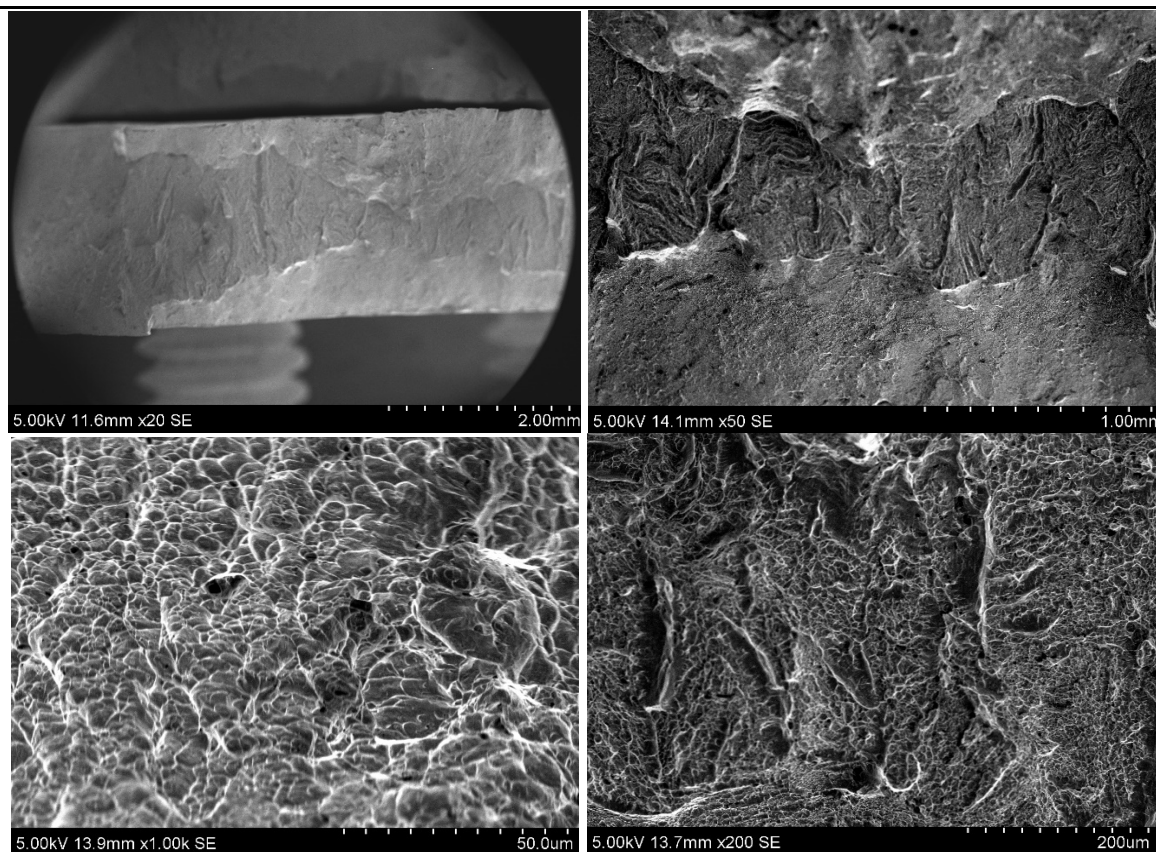


Рис. 12. Характер разрушения образца 1.2

В образце 2.2 (см. рис. 13) наблюдается, как и в образце 1.2, сотовый рельеф поверхности – малая доля локальной пластической деформации. Также наблюдаются усталостные бороздки – элемент микрорельефа усталостного излома в виде повторяющихся удлинённых впадин и выступов, не пересекающихся между собой и ориентированных перпендикулярно локальному направлению развития трещины.

В образце 3.2, представленном на рис. 14, наблюдается наличие фасетки квазискола, имеется ровный участок разрушения, не всегда связанный ориентационно с плоскостями скола. Наряду с признаками хрупкого разрушения имеются признаки пластической деформации (гребни), при этом границы менее чёткие, чем у фасетки скола.

Также имеются ямки волокнисто-полосчатого излома – микроуглубления, возникшие в результате образования и слияния микропустот. Присутствует структура сотового рельефа.

Таким образом, по результатам фрактографии все образцы имеют неоднородный излом, характеризующийся наличием различных зон и участков, отличающихся по макрорельефу, которые могут соответствовать различным стадиям разрушения образца.

В образцах преобладает сотовый рельеф поверхности разрушения в виде мелких плоских ямок. Данное строение излома свидетельствует о малой доле локальной пластической деформации при разрушении.

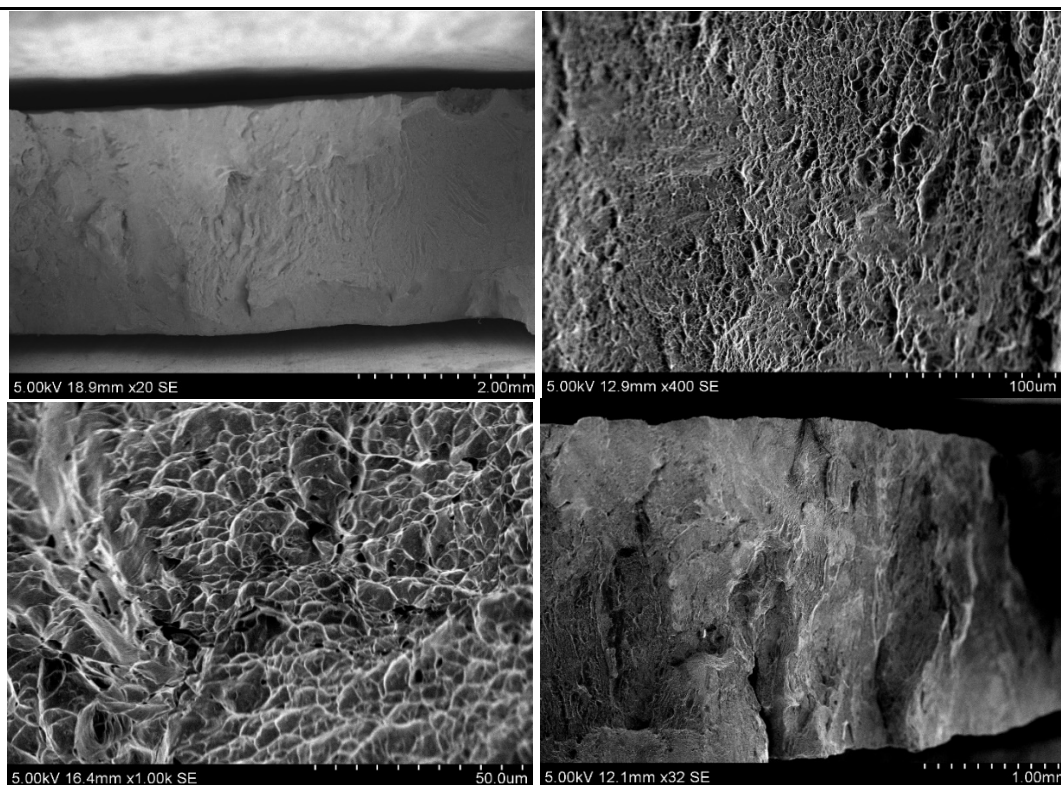


Рис. 13. Характер разрушения образца 2.2

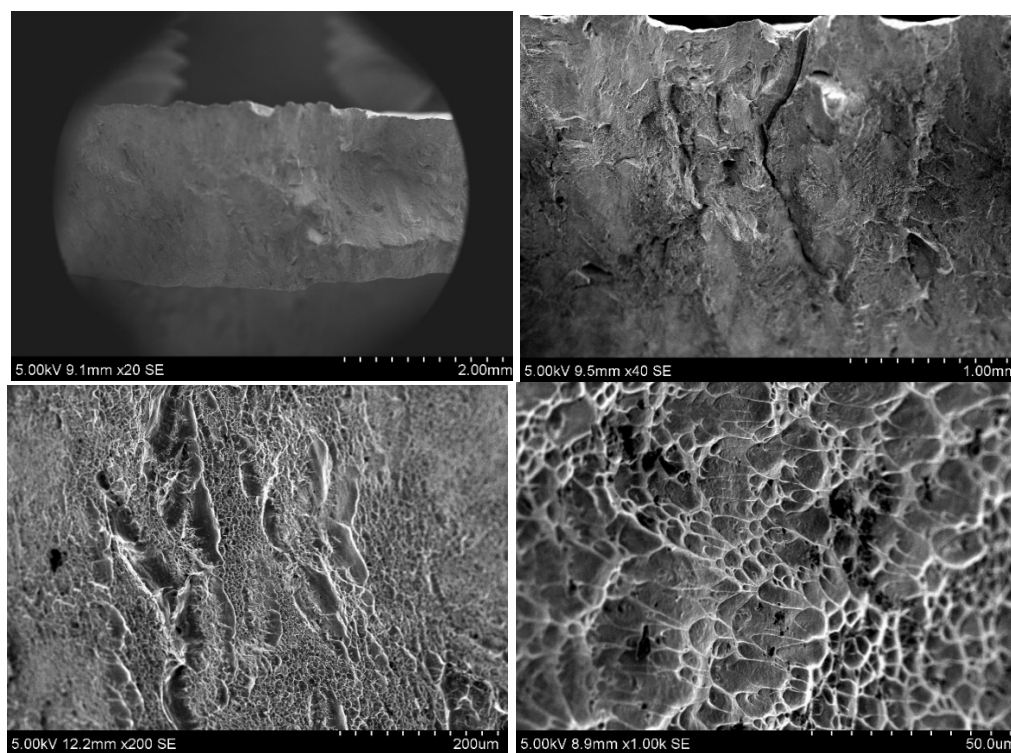


Рис. 14. Характер разрушения образца 3.2

Выводы. По результатам исследования установлена возможность проведения высокопроизводительной термической обработки токами высокой частоты в интервалах фазового превращения сварных соединений сплава VT20 за счёт конвекционного нагрева.

По результатам исследований установлено следующее:

- Характер изменения микроструктуры при увеличении времени выдержки в интервалах от 90 до 150 с соответствует классическим термокинетическим закономерностям фазовых превращений в $\alpha+\beta$ титановом сплаве VT20 при высокотемпературной обработке с последующим охлаждением в воде.

- При увеличении времени выдержки до 150 с происходит увеличение β -зёрен с сохранением мартенситоподобной структуры α' -фазы в сварных соединениях.

- Распределение значений микротвёрдости имеет сложный характер, который не соответствует классическому распределению твёрдости с её повышением в зоне сварного шва. Это связано с тем, что сварной шов, как и зона термического влияния, с основным металлом подвергались одновременному нагреву. При этом наблюдается, что с увеличением времени выдержки параметр микротвёрдости в сечении образца снижается.

- Испытаниями на статическое растяжение установлено, что разрушение сварных соединений в большинстве случаев произошло в переходной области между зоной термического воздействия от ТВЧ и основным металлом. Наблюдается повышение предела прочности и пластических свойств с увеличением времени выдержки образцов.

- Установлено, что при выдержке в 150 с практически обеспечивается сходимость по требованию предела прочности (954 МПа) согласно РТМ 1.4.1379-84.

- По результатам фрактографии, после статического растяжения все образцы имеют неоднородный излом, характеризующийся наличием различных зон и участков, отличающихся по макрорельефу, которые могут соответствовать различным стадиям разрушения образца. При этом в образцах преобладает сотовый рельеф поверхности разрушения в виде мелких плоских ямок. Данное строение излома свидетельствует о малой доле локальной пластической деформации при разрушении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Муравьев, В. И. Обеспечение качества неразъёмных соединений титановых конструкций летательных аппаратов, выполненных сваркой плавлением: моногр. / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, В. В. Григорьев. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 296 с.
2. Братухин, А. Г. Штамповка, сварка, пайка и термообработка титана и его сплавов в авиастроении / А. Г. Братухин, Ю. Л. Иванов, Б. Н. Марьин. – М.: Машиностроение, 1997. – 600 с.
3. Лясоцкая, В. С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов / В. С. Лясоцкая; под ред. Б. А. Колачева. – М.: Экомет, 2003. – 351 с.
4. Григорьев, В. В. Влияние режимов термической обработки в условиях фазового превращения на структуру и свойства сварных соединений из титанового сплава, выполненных электронно-лучевой сваркой / В. В. Григорьев, П. В. Бахматов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2023. – № 12 (822). – С. 37-44.



Саблин П. А., Косачев К. Д.
P. A. Sablin, K. D. Kosachev

ОПТИМИЗАЦИЯ СПОСОБА ПРИМЕНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

OPTIMIZATION OF APPLYING EXPERIMENTAL RESEARCH METHODS OF THE CUTTING PROCESS BASED ON THE ANALYSIS OF LITERARY SOURCES

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.

Косачев Кирилл Дмитриевич – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета, ассистент кафедры «Машиностроение» (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: KodmicH@yandex.ru.

Kirill D. Kosachev – Postgraduate Student, Teaching Assistant, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: KodmicH@yandex.ru.

Аннотация. В статье дан анализ современного состояния вопроса о возможностях получения информации из зоны резания как после проведения процесса резания, так и в режиме реального времени. Сформировано предложение по повышению эффективности процесса резания с применением различных способов получения информации из зоны резания.

Summary. The article provides an analysis of the current state of the issue of the possibilities of obtaining information from the cutting zone both after the cutting process and in real time. A proposal has been made to improve the efficiency of the cutting process using various methods of obtaining information from the cutting zone.

Ключевые слова: температура, термопара, зона контакта, механическая обработка, обработка резанием, эффективность обработки, динамометр, калориметр.

Key words: temperature, thermocouple, contact area, machining, cutting, processing efficiency, dynamometer, calorimeter.

УДК 621.9

Введение. Процесс обработки резанием является одним из наиболее распространённых способов производства деталей машин для различных отраслей промышленности. Для повышения эффективности процесса резания актуальны вопросы сбора информации из зоны контакта для последующего исследования и анализа, причём не только после выполнения операции, но и в режиме реального времени, в процессе обработки.

Целью работы является разработка предложений по повышению эффективности процесса резания с применением различных способов получения данных из зоны резания.

Процесс резания является сложным нелинейным процессом, влияние на который оказывает большое число факторов, например: применяемые материалы инструмента и детали, жёсткость системы «станок-приспособление-инструмент-деталь», геометрические параметры инструмента, режимы резания (скорость резания, подача, глубина резания), силы резания и т. д. [2–4].

Из измерений физических процессов, исследуемых при процессе резания и на основании которых можно оценить эффективность процесса, следует выделить: измерение температуры резания, измерение составляющих силы резания, измерение вибраций инструмента и детали, использование различных оптических методов.

В процессе резания происходит выделение теплоты. Более 99,5 % работы резания переходит в тепло [2]. Основные источники образования тепла при обработке резанием: тепло деформации, образуемое на условной поверхности сдвига, тепло трения стружки о переднюю поверхность инструмента и тепло трения задней поверхности инструмента о деталь. Из зон образования выделившаяся энергия распространяется в более холодные участки инструмента, детали и стружки. На резце, стружке и детали формируется температурное поле с изотермами и зонами более высоких и низких температур.

Собирая данные о температуре в зоне резания, можно оценивать процессы резания, а также производить корректировку параметров с целью повышения эффективности механической обработки.

Для измерений температуры могут быть использованы любые свойства твёрдых, жидких и газообразных веществ, изменяющиеся в зависимости от температуры: физическое или химическое состояние, линейные размеры, электрические свойства, скорость звука в газах, собственная частота колебаний кварцевых резонаторов и т. д. Однако многие из этих параметров можно измерять только с применением сложной и дорогостоящей аппаратуры и при жёсткой стабилизации параметров окружающей среды, что является труднодостижимым при постановке лабораторного эксперимента и тем более в производственных условиях при обработке деталей.

Также следует классифицировать методы по возможности обработки получаемых данных в режиме реального времени. Не все методы позволяют получать информацию о процессе резания с достаточной быстротой и отсутствием инерционности. Эти качества позволяют своевременно формировать корректирующий сигнал входных параметров системы резания для повышения эффективности обработки.

Рассмотрим методы измерения температуры, используемые для исследования процесса резания: калориметрический метод (оценка температуры стружки при её попадании из зоны резания сразу в калориметр), метод плёнок (нанесение тонкого слоя чистого металла с известной температурой плавления на контактные площадки), метод термокрасок (используются составы, изменяющие цвет под действием определённой температуры). Вышеуказанные способы применимы для исследования процесса резания в лабораторных условиях, однако в производственных условиях данные методы сложно использовать ввиду больших временных затрат на подготовку к исследованию и необходимости использования дополнительного оборудования (в случае плёночного метода), а также отсутствия возможности использования получаемых данных для корректировки режимов резания в режиме реального времени. Возможно рассмотреть комбинацию использования, например, метода термокрасок и оптического метода (к примеру, камера с виртуальным зрением в режиме реального времени фиксирует изменение цвета термокрасок или стружки), однако применение данного метода требует тарировки камеры по цветам в зависимости от цвета материалов при различных температурах, а также цвета термокрасок, что трудноосуществимо в производственных условиях.

Также существуют методы измерения температуры при помощи подведённой и естественно образующейся термопары. Метод подведённой термопары заключается в том, что в инструменте к передней поверхности через отверстие подведена стандартная термопара. Метод естественной термопары заключается в формировании термопары между материалами инструмента и заготовки. Данные методы позволяют получать информацию о процессе резания в режиме реального времени, оценивать явления в зоне резания и формировать корректирующий сигнал.

Однако подведённая термопара находится на достаточном удалении от зоны контакта инструмент-заготовка, поэтому показывает температуру ниже, чем есть на самом деле; также в современных условиях обработки с максимальной производительностью актуальным становится вопрос влияния подведённой термопары на прочность инструмента и возможности использования подведённой термопары на вращающемся инструменте.

Естественная термопара требует тарировки при изменении материалов инструмента и детали, что является ограничением к применению при производстве широкой номенклатуры продукции из различных материалов с использованием различного инструмента. Основным недостаток



естественной термопары для измерения температуры заключается в том, что естественная термопара показывает некоторую усреднённую температуру на всей поверхности контакта инструмента и заготовки, однако же реальная температура в различных точках контакта может существенно отличаться от показываемой естественной термопарой.

Метод естественной термопары не нашёл широкого практического применения. Это связано с трудностями обеспечения надёжной коммутации электрических цепей, реализация которой при многоинструментальной обработке на станках с ЧПУ уязвима в эксплуатации [5].

Существует также радиационный метод контроля температуры (определение температуры по излучению, которое испускается телами). Приборы, определяющие температуру тела по его излучению, называют пирометрами.

К примеру, в работе [6] автор предлагает использовать термо-ЭДС естественной термопары, сигналы от которой обрабатывает программируемый логистический контроллер. Термо-ЭДС представляется как интегральный показатель условий протекания процесса резания. Однако отсутствуют экспериментальное подтверждение и практический результат повышения эффективности механической обработки.

При исследовании процессов резания силу резания P раскладывают на составляющие P_z , P_x , P_y , направленные вдоль соответствующих осей в декартовой системе координат. Для измерения сил используют динамометры. В зависимости от вида обработки используют различные динамометры, например, при точении – трёхкомпонентный динамометр, при сверлении – двухкомпонентный и т. д.

По принципу действия различают гидравлические, механические и электрические динамометры. Гидравлические и механические динамометры из-за большой инерционности не позволяют получать точную информацию о быстропротекающих процессах резания, из-за чего вышеуказанные динамометры не нашли широкое применение в области исследования процессов резания.

Наибольшее распространение получили электрические динамометры с различными электрическими датчиками, которые позволяют производить запись быстропротекающих процессов за тысячные и стотысячные доли секунды.

Оценка составляющих силы резания при помощи электрических динамометров позволяет собирать информацию о происходящих явлениях при резании в режиме реального времени и на основании обработки данных вносить корректирующий сигнал с целью повышения эффективности и недопущения выпуска продукции несоответствующего качества.

В работе [7] автор предлагает конструкцию однокомпонентного динамометра для измерения тангенциальной составляющей силы резания P_z при обработке на токарных станках с ЧПУ. По своим технико-эксплуатационным характеристикам динамометр соответствует всем современным требованиям. Данная модель динамометра демонстрирует продвижение в области импортозамещения наукоёмкой продукции и может быть использована в производстве для повышения эффективности механической обработки. Однако для более объективной оценки процессов при токарной обработке требуются разработка и применение трёхкомпонентного динамометра.

Также следует упомянуть оптические методы сбора информации из зоны резания, например при помощи камеры. Данные методы позволяют измерять температуру, оценивать точность изготовления детали, и вносить корректировки во входные параметры процессов резания.

Помимо измерения составляющих сил резания, температуры, размеров детали, также широкое распространение получило измерение вибрации инструмента или детали при резании. Сущность метода заключается в измерении вибрации при помощи датчиков виброакустической эмиссии (ВАЭ) либо звуковых колебаний при помощи микрофона, последующих преобразованиях полученного сигнала и оценке динамической устойчивости процесса резания.

В настоящее время для исследования процессов резания с целью повышения эффективности механической обработки применяется сочетание измерений различных параметров (температуры, силы, вибрации, линейных размеров и т. д.). Рассмотрим примеры использования различных методов при сборе информации о процессе резания.

Так, в работе [8] авторы разрабатывают цифровой двойник для мониторинга износа инструмента в процессе токарной обработки. Для сбора данных, помимо информации от станка ЧПУ, используются трёхосевой динамометр Kistler 9257B и термическая камера FLIR A325. Данная работа демонстрирует использование нескольких способов измерения для сбора информации о процессе резания, однако не измеряется вибрация инструмента, а также не оценивается точность фиксируемой температуры в зоне резания.

В работе [9] авторы разрабатывают цифровой двойник, используя симуляцию моделей в реальном времени и функции предвидения для контроля механической обработки в замкнутом контуре. Авторы используют динамометр Kistler 9255C для сбора данных о силе резания, симуляции остаточных напряжений после механической обработки. Однако в данной работе не оценивается температура в зоне контакта, отсутствует контроль вибраций при резании, в качестве контроля вибраций используется смоделированная карта стабильности, требующая экспериментальной проверки для широкой номенклатуры различных деталей и инструмента.

В работе [10] авторы разрабатывают цифровой двойник для предсказания состояния инструмента при фрезеровании. В качестве источников данных о процессе резания используются трёхкомпонентный динамометр Kistler, сверху на который устанавливается деталь, а также три акселерометра Kistler для измерения вибрации по трём осям. Данная работа использует актуальные способы сбора данных из зоны резания, однако получаемые данные применяются только для прогнозирования износа инструмента, не оцениваются динамическая устойчивость инструмента и детали, а также её влияние на эффективность механической обработки.

В труде [11] авторы используют обработанный аудиосигнал, записанный при помощи микрофона, для получения данных о вибрации в зоне резания. Однако данный способ индикации уступает по точности виброакустической эмиссии в силу расположения микрофона на большем расстоянии от зоны резания, чем датчики ВАЭ. Также использование микрофона в большей степени подвержено записи помех, не связанных с процессом резания (различные звуковые волны в помещении с расположенным оборудованием).

В работе [12] авторы разрабатывают цифровой двойник для производства тонкостенных деталей, оценивающий реальные габариты детали при помощи камеры. Перед обработкой детали камеру калибруют, затем при производстве детали на основании данных с камеры система корректирует траекторию инструмента. Данная работа демонстрирует перспективы во внедрении оптического метода. В перспективе подобные способы корректировки траектории инструмента возможно внедрить в качестве стандартной комплектации станков с ЧПУ.

Заключение. На основании собранной информации предлагается использовать следующие способы получения данных из зоны резания при проведении экспериментальных исследований: измерение вибрации инструмента по трём осям, контроль составляющих сил резания. В качестве оценки сил резания при наличии возможности с целью более объективной оценки необходимо использовать трёхкомпонентный динамометр, однако возможно оценивать состояние процесса резания по наибольшей составляющей сил резания P_z . В качестве дополнительного источника информации для оценки процесса резания возможны использование естественной термопары, а также применение оптического метода для оценки температуры. Собираемые данные обрабатываются в режиме реального времени, далее проводится комплексная оценка процесса резания: состояние инструмента, вибрации системы, температура в зоне резания и температура стружки – с последующим многофакторным анализом получаемых данных и формированием корректирующего сигнала.

Выполненное исследование позволило разработать предложение по повышению эффективности процесса резания с применением различных способов получения данных из зоны резания. В этом предложении использовано комплексное понимание процессов, происходящих в зоне резания (износ инструмента, динамическая устойчивость системы резания, температура в зоне резания). Также использованы методы обработки данных для подачи корректирующего сигнала в систему управления станка для повышения эффективности механической обработки.



ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 3.1109-82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий = Unified system for technological documentation. Terms and definitions of main concepts: изд. официальное: утв. и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 30 июля 1982 г. № 2988: взамен ГОСТ 3.1109-73: дата введения 1983-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 14 с.
2. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
3. Грановский, Г. И. Резание металлов: учеб. / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.
4. Ящерицын, П. И. Теория резания: учеб. / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – 2-е изд., испр. и доп. – Минск: Новое знание, 2006. – 512 с.
5. Диагностика деформирования срезаемого слоя и рациональное нагружение инструмента при точении на станках с ЧПУ / Р. Ю. Некрасов, У. С. Путилова, Ю. И. Некрасов [и др.] // СТИН. – 2014. – № 6. – С. 33-35.
6. Чигиринский, Ю. Л. Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка, производство, прослеживание / Ю. Л. Чигиринский, Д. В. Крайнев, Е. М. Фролов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2022. – № 8 (134). – С. 39-48.
7. Динамометрическая система для измерения силы резания при точении / В. Ф. Безъязычный, А. В. Кордюков, М. В. Тимофеев, Р. Н. Фоменко // СТИН. – 2014. – № 7. – С. 29-32.
8. Zhuang, K.; Shi, Z.; Sun, Y.; Gao, Z.; Wang, L. Digital Twin-Driven Tool Wear Monitoring and Predicting Method for the Turning Process. *Symmetry* 2021, 13, 1438.
9. Ward, R., Sun, C., Dominguez-Caballero, J. et al. Machining Digital Twin using real-time model-based simulations and lookahead function for closed loop machining control. *Int J Adv Manuf Technol* 117, 3615–3629 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07867-w>.
10. Qianzhe Qiao, Jinjiang Wang, Lunkuan Ye, Robert X. Gao, Digital Twin for Machining Tool Condition Prediction, *Procedia CIRP*, Volume 81, 2019, Pages 1388-1393, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.049>.
11. Schmitz, T. L., Medicus, K., & Dutterer, B. (2002). EXPLORING ONCE-PER-REVOLUTION AUDIO SIGNAL VARIANCE AS A CHATTER INDICATOR. *Machining Science and Technology*, 6(2), 215–233. doi:10.1081/mst-120005957.
12. Zhu, Z., Xi, X., Xu, X., & Cai, Y. (2021). Digital Twin-driven machining process for thin-walled part manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 453–466. doi:10.1016/j.jmsy.2021.03.01.

Бахматов П. В., Старцев Е. А.
P. V. Bakhmatov, E. A. Startsev

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКАНИЯ ПРЕССОВАННЫХ ЗАГОТОВОК
ИЗ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА В УСЛОВИЯХ АВТОВАКУУМА,
ФОРМИРУЕМОГО ГЕТТЕРНОЙ СРЕДОЙ**

**INVESTIGATION OF SINTERING OF PRESSED BILLETS FROM METALLURGICAL SLAG
IN AN AUTOVACUUM FORMED BY A GETTER MEDIUM**

Бахматов Павел Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологии сварочного и металлургического производства им. В. И. Муравьева» 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 «Technologies of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Старцев Егор Андреевич – старший преподаватель кафедры «Технологии сварочного и металлургического производства им. В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: egorstarts@inbox.ru.

Egor A. Startsev – Senior Lecturer, Department «Technologies of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: egorstarts@inbox.ru.

Аннотация. В работе представлено экспериментальное исследование возможности спекания прессованных заготовок, полученных из металлургического шлака, в условиях автовакуума. В качестве восстановительной среды использовалась герметичная ёмкость с титановой стружкой, обеспечивающей поглощение кислорода при температурах выше 900 °С. Порошок шлака предварительно смешивали с графитом и подвергали прессованию под давлением 661 МПа. Спекание проводилось при температуре 890...990 °С в течение одного часа. Установлена возможность получения визуально плотных заготовок (без признаков макропористости) без следов внешнего окисления. Обнаружены технологические особенности герметизации, влияющие на качество сварных швов. Полученные образцы сохраняют ферромагнитные свойства, и при пробной механической обработке отмечено сопротивление резанию (качественное наблюдение). Отмеченная особенность согласуется с формированием твёрдых участков и/или высокой компактности материала; подтверждение потребует фазового анализа и измерений микротвёрдости. Представленный подход может использоваться для вовлечения металлургических шлаков в процессы порошковой металлургии с частичным восстановлением оксидов.

Summary. The paper presents an experimental study of the possibility of sintering pressed blanks obtained from metallurgical slag under autovacuum conditions. A sealed container with titanium shavings was used as a reducing medium, which ensures oxygen absorption at temperatures above 900 °C. The slag powder was pre-mixed with graphite and pressed at a pressure of 661 MPa. Sintering was carried out at a temperature of 890-990 °C for one hour. The possibility of obtaining visually dense blanks (without signs of macroporosity) without traces of external oxidation has been established. Technological features of sealing that affect the quality of welds have been discovered. The obtained samples retain their ferromagnetic properties and cutting resistance was noted during trial machining (qualitative observation). This feature is consistent with the formation of solid areas and/or high compactness of the material; confirmation will require phase analysis and microhardness measurements. The presented approach can be used to involve metallurgical slags in powder metallurgy processes with partial reduction of oxides.

Ключевые слова: автовакуум, геттерная среда, титан, металлургический шлак, порошковая металлургия, спекание, восстановление оксидов.

Key words: autovacuum, getter medium, titanium, metallurgical slag, powder metallurgy, sintering, reduction of oxides.



УДК 621.762.5,621.577

Введение. Современная металлургия характеризуется возрастающими требованиями к ресурсосбережению и экологической безопасности. В условиях дефицита высококачественного металлолома и необходимости утилизации металлургических отходов актуальной задачей становится вовлечение шлаков сталеплавильного производства в повторный технологический цикл. Одним из перспективных направлений является использование оксидосодержащих шлаков в порошковой металлургии с последующим восстановлением компонентов в твёрдой фазе [1–4].

Восстановление оксидов железа, марганца и других элементов традиционно осуществляется в вакуумных или восстановительных атмосферах при высоких температурах. Однако оборудование вакуумной металлургии отличается высокой стоимостью и сложностью эксплуатации. Альтернативой может служить использование метода автовакуума – спекания в герметичном объёме с применением геттерных материалов, способных связывать кислород, водород и азот при нагревании, например, таких как титан [5–7].

Такая технология позволяет сократить окисление активных компонентов, снизить уровень примесей, а также упростить конструктивное исполнение процесса. При этом важной задачей остаётся изучение поведения прессованных шлаковых заготовок при спекании в подобных условиях, а также определение технологических ограничений, связанных с герметизацией и стабильностью среды [8–10].

Целью работы является экспериментальная оценка возможности спекания прессованных заготовок из переработанного металлургического шлака в условиях автовакуума, формируемого геттерной средой, с верификацией признаков работы геттера, а также оценкой целостности, визуальной плотности и ферромагнитных свойств полученных заготовок.

Методика эксперимента. В качестве исходного материала использовался металлургический шлак сталеплавильного предприятия – АО «Амурсталь». Шлак подвергался измельчению в шаровой мельнице до порошкообразного состояния. Химический состав измельчённого материала определён методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием спектрометра Rigaku. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1
Химический состав металлургического шлака
В процентах

CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe/FeO	MnO
15,40...21,03	2,33...3,81	8,70...14,94	4,87...7,73	48,24...66,05	5,56...5,98

Для создания восстановительной среды в шлаковый порошок добавлялся порошкообразный графит в количестве 10 % от общего объёма смеси. Полученная композиция прессовалась на гидравлическом прессе ИП-2500 с максимальным усилием 830 кН. Удельное давление в зоне прессования составляло 661 МПа. Для формирования образца использовалась специально разработанная оснастка, обеспечивающая получение цилиндра диаметром 40 мм. Внешний вид оснастки приведён на рис. 1.

Одна из полученных заготовок была использована для последующего спекания. Процесс спекания проводился в муфельной печи с программным управлением при температуре 890...990 °С, выдержка – 1 ч. Для создания среды автовакуума использовалась герметичная стальная ёмкость с засыпкой титановой стружкой (сплав ВТ20), обеспечивающей связывание кислорода, водорода и азота при нагревании. Крышки ёмкости герметизировались путём сварки. После спекания образец извлекался и направлялся на визуальный анализ состояния поверхности, оценку целостности и магнитных свойств.

Результаты и обсуждение. В процессе прессования порошковой композиции при нагрузке 830 кН была зафиксирована характерная диаграмма нагружения, представленная на рис. 2.



Рис. 1. Внешний вид
оснастки для прессования

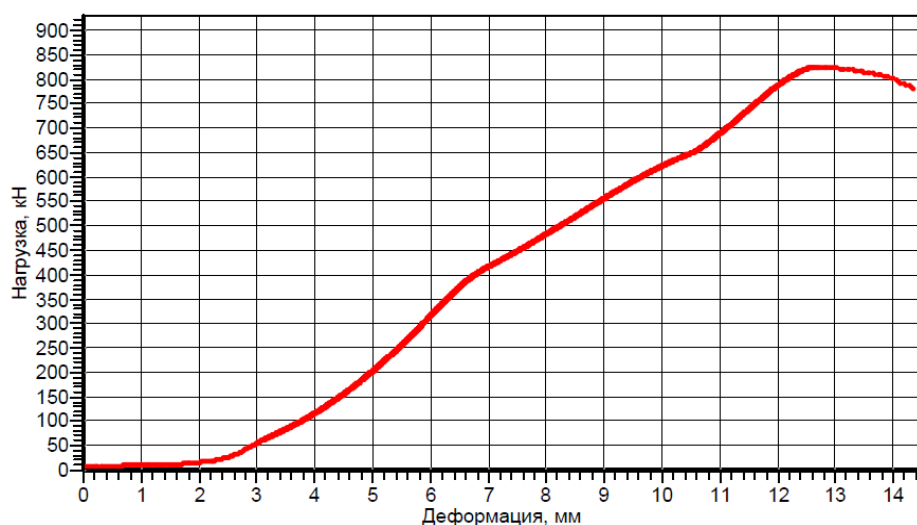


Рис. 2. Диаграмма нагружения при прессовании

Анализ диаграммы (см. рис. 2) указывает на участок активного деформирования с выходом на плато, соответствующий завершению уплотнения порошковой массы. Начальный наклон отражает перегруппировку частиц под нагрузкой, участок стабилизации – установление структурной устойчивости. Уплотнение порядка 45 % согласуется с оксидной природой материала и ограниченной пластичностью частиц.

Внешний вид образца после прессования представлен на рис. 3.

Визуальный осмотр поверхности заготовки позволил зафиксировать типичное поперечное расслоение, проявляющееся в виде чётко выраженной границы между верхним и нижним слоями. Подобное явление характерно для систем с ограниченной пластичностью и выраженной фракционной неоднородностью. На изображении видно, что одна из поверхностей имеет матовую, шероховатую структуру с признаками межчастичной деструкции, в то время как другая – более плотная с относительно однородной текстурой.



Рис. 3. Полученный
прессованием образец

Причинами образования межслоевой границы могут быть недостаточная передача давления на периферию заготовки, частичный сдвиг прессуемой массы во время хода пуансона, а также наличие зон с повышенной пористостью в объёме материала. Такие дефекты указывают на необходимость доработки технологического процесса, в частности, введения стадий предварительного виброуплотнения или двойного прессования.

Разделение образца на две части представляется целесообразным с экспериментальной точки зрения: одна часть использовалась для последующего спекания, вторая сохранилась как контрольный образец для оценки влияния термического воздействия. Это позволило обоснованно сопоставить состояние материала до и после высокотемпературной обработки.

Спекание проводилось в замкнутом объёме. Общий вид ёмкости после вскрытия показан на рис. 4.

В качестве восстановительно-защитной среды применялась титановая стружка, помещённая в герметичную стальную ёмкость кубической формы (100×100×100 мм). Перед термической обработкой объём заполнялся стружкой с максимальным уплотнением вручную, после чего укла-

дывалась прессованная заготовка, а верхняя часть контейнера герметизировалась посредством сварки. Вид подготовленной к спеканию ёмкости приведён на рис. 4, а.

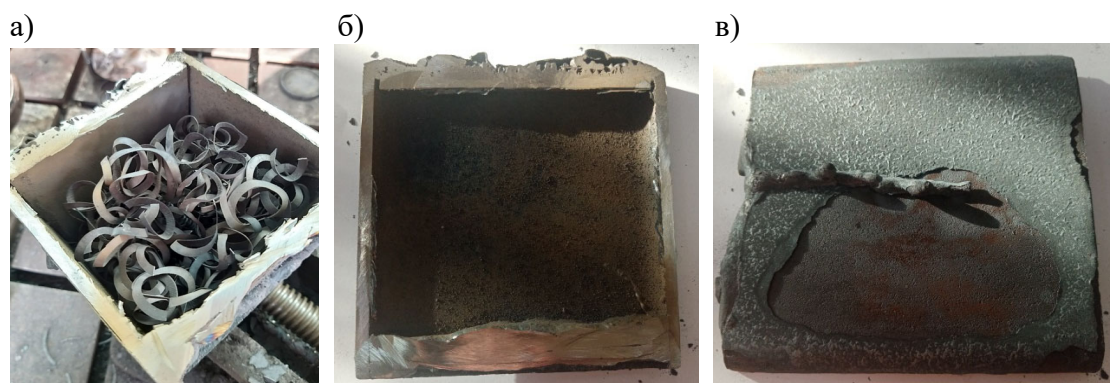


Рис. 4. Ёмкость для создания автовакуума, вскрытая после спекания:
а – общий вид; б – внутренняя стенка; в – наружная стенка с окалиной

По завершении теплового цикла наблюдались характерное потемнение внутренней поверхности ёмкости, а также изменение цвета и структуры титановой стружки. Потемнение связано с химической активностью титана, проявляющейся при температурах выше 800°C , и свидетельствует о его взаимодействии с остаточной атмосферой, в том числе кислородом и водородом, образующимися в процессе разложения оксидов. Отсутствие выраженной окалины на внутренних стенках ёмкости (см. рис. 4, б) подтверждает эффективность поглощения кислорода, т. е. реализацию эффекта автовакуума.

Визуальное состояние наружной поверхности (см. рис. 4, в) также указывает на наличие частичного изолирующего действия: участки с остаточной окалиной локализованы в зоне сварного шва, где могли возникать утечки либо неплотности. Отсутствие равномерной окалины по всему объёму дополнительно подтверждает наличие восстановительной среды внутри контейнера.

Таким образом, геттерная среда на основе титановой стружки показала достаточную активность в заданном температурном диапазоне, обеспечив минимизацию окисления при спекании.

Спечённая заготовка извлекалась из ёмкости без повреждений и следов поверхностного окисления. Внешний вид образца после термообработки приведён на рис. 5.



Рис. 5. Поверхности спечённого образца

Результаты визуального осмотра спечённой заготовки, представленные на рис. 5, демонстрируют отсутствие макроскопических дефектов поверхности, таких как трещины, отслоения или участки окалинообразования. Верхняя поверхность образца характеризуется равномерной текстурой с матовым серым оттенком, что свидетельствует о низкой степени окисления и равномерности температурного поля в процессе термообработки (см. рис. 5).

На обработанной (шлифованной) поверхности образца прослеживается плотная структура с выраженной зоной полировки и металлическим блеском, что косвенно подтверждает наличие металлических фаз в теле заготовки. Центральный участок неравномерного шлифования визуально выделяется за счёт изменения коэффициента отражения, однако признаков пористости на этом участке не зафиксировано (см. рис. 5).

Формальная целостность образца после извлечения из термогерметичной среды и отсутствие следов взаимодействия с кислородом подтверждают эффективность заявленного подхода спекания в условиях автовакуума. Визуально плотная структура и сохранение геометрической формы дополнительно указывают на достижение достаточного уровня спекания и фазовой устойчивости материала в заданных температурных условиях.

Процесс герметизации ёмкости с титановой стружкой сопровождался значительными технологическими затруднениями. В частности, при выполнении сварного шва по второй крышке уже в условиях частичной герметизации и заполнения внутреннего объёма геттером возникла выраженная пористость, сопровождающаяся дефектами сварного металла. На рис. 6, а видна неравномерность валика, наличие проплавов и участков с выраженными включениями шлакообразной природы, что указывает на нестабильные условия газового окружения при сварке.

Вскрытие корпуса показало наличие протяжённой зоны пористости вдоль шва (см. рис. 6, б), что, вероятно, обусловлено повышенным внутренним давлением паров и газов, высвобождающихся из титановой стружки, и остатков влаги в момент теплового воздействия. Газообразование внутри замкнутого объёма при сварке сопровождается кратковременным ростом давления, приводящим к образованию газовых каверн и вздутий, характер которых представлен на рис. 6, в.

Наличие пористости при герметизации указывает на накопление газов в замкнутом объёме при локальном тепловложении. Для стабилизации операции целесообразны предварительная дегазация засыпки, применение временных компенсационных каналов с последующим заправлением, а также снижение удельного тепловложения при проваре.

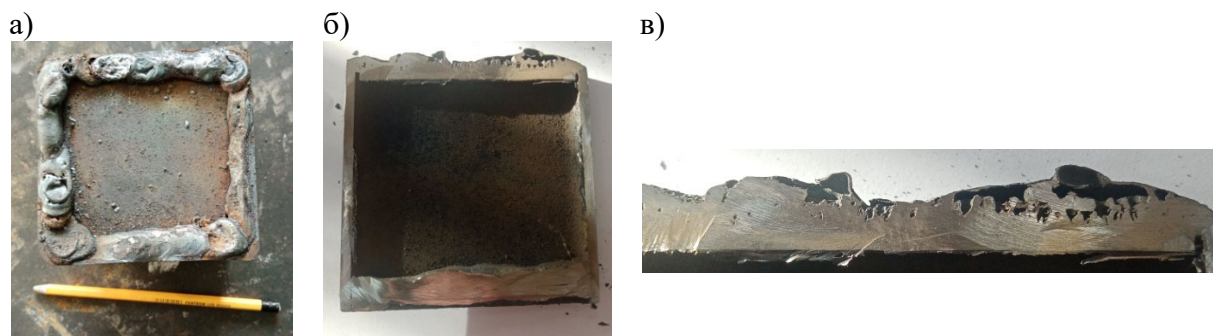


Рис. 6. Пористость при герметизации второй крышки ёмкости:

а – внешний вид шва; б – зона протяжённой пористости; в – локальные вздутия (газовые каверны)

Выявленные дефекты не повлияли критически на герметичность в ходе спекания, однако являются потенциально опасными при масштабировании технологии или повышении объёма загрузки.

Факт сохранения ферромагнитных свойств в спечённой заготовке указывает на присутствие фаз металлического железа, образовавшихся в процессе восстановления оксидов при термическом воздействии. Принимая во внимание, что основным исходным компонентом является металлургический шлак, содержащий FeO и Fe_2O_3 , можем заключить, что в условиях восстановительной атмосферы на основе графита и титана произошло частичное восстановление железа до элементарного состояния или до низших оксидов с ферромагнитной активностью (например, Fe_3O_4).

При пробной механической обработке заготовки отмечались затруднения резания; количественная оценка обрабатываемости не проводилась. По имеющимся наблюдениям выводы о фазовом составе и уровне плотности делать преждевременно. Для интерпретации эффекта требуются



дополнительные исследования: измерения микротвёрдости, рентгенофазовый анализ, микроструктурные исследования, а также определение плотности для сопоставления с исходным состоянием.

Данный этап эксперимента был ограничен макрофизической оценкой, однако полученные данные позволяют утверждать, что в заготовке формируются структурно устойчивые и ферромагнитно активные фазы с механической стойкостью, что открывает перспективы для использования таких материалов в конструкционных и магнитотехнических применениях.

Выводы.

1. Предложен и апробирован подход спекания прессованных заготовок из переработанного металлургического шлака в условиях автовакуума, формируемого геттерной средой, без применения внешнего вакуума и защитных газов.

2. При режимах 890...990 °С и выдержке 1 ч получены заготовки, сохраняющие целостность; исходное уплотнение при прессовании составило около 45 % по данным диаграммы нагружения.

3. Визуальные наблюдения и магнитные свойства образца подтверждают частичное восстановление железа до элементарного состояния или до ферромагнитных соединений, что указывает на эффективность заявленного метода по отношению к шлаковым материалам.

4. При герметизации сваркой контейнера с титановой засыпкой выявлены технологические сложности, связанные с образованием пористости, обусловленной газовой выделением в замкнутом объёме. Это требует дополнительной проработки режимов герметизации и дегазации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бельский, С. С. Современное состояние переработки шлаков сталеплавильного производства / С. С. Бельский, Е. В. Глазков, И. В. Плеханов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Естественные и инженерные науки. – 2021. – Т. 27. – № 1. – С. 97-108.
2. Dehghanpour Abyaneh, M., Sesana, R. Advances in grinding sludge valorisation and recovery in the manufacturing industries / M. Dehghanpour Abyaneh, R. Sesana // La Metallurgia Italiana. – 2025. – Т. 3. – Р. 45-56.
3. Лиманкин, В. В. Направления переработки техногенных отходов дальневосточных металлургических предприятий / В. В. Лиманкин, Е. А. Старцев, В. В. Бельский // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № III (75). – С. 119-122.
4. Бахматов, П. В. Влияние режимов дуговой сварки под слоем экспериментального флюса на распределение внутренних напряжений в сварных образцах, выявленных методом магнитной памяти металлов / П. В. Бахматов, Е. А. Старцев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № V (69). – С. 83-96.
5. Мельничук, А. Ф. Формирование пористой структуры в изделиях на основе железа и титана с заданными физико-механическими и эксплуатационными свойствами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Мельничук Александр Фёдорович. – Комсомольск-на-Амуре, 2009. – 24 с.
6. Yu, C., Cao, P., Jones, M. I. Titanium Powder Sintering in a Graphite Furnace and Mechanical Properties of Sintered Parts / C. Yu, P. Cao, M. I. Jones // Metals. – 2017. – Vol. 7, No. 2. – Article 67. – DOI 10.3390/met7020067.
7. Влияние титана на структурообразование и микротвёрдость высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-V-M (M=Ti), синтезированного СВС-металлургией / И. О. Паньшин, Э. Х. Ри, Е. Д. Ким, В. С. Попова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № I (81). – С. 74-79.
8. Hojati, M., et al. Mechanical and Physical Properties of Differently Alloyed Powder Metallurgy Steel Grades / M. Hojati et al. // Metals. – 2022. – Vol. 12, No. 1. – Article 13.
9. Дорофеев, В. Ю. К вопросу применимости концепции активированного спекания, предложенной Г. В. Самсоновым, при изучении процессов деформации порошковых материалов / В. Ю. Дорофеев, А. Н. Свиридова, Х. С. Кочкарова // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2018. – № 4. – С. 6-14.
10. Получение лигатуры на основе шеелитового концентрата методом алюминотермии / В. В. Гостищев, Э. Х. Ри, Е. Д. Ким [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № III-1 (31). – С. 84-91.

Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.
G. A. Kolykhalov, E. G. Kravchenko

ПРЕДЕЛЬНЫЕ КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВСЕЛЕННОЙ

LIMITING COSMOLOGICAL PARAMETERS OF THE UNIVERSE

Колыхалов Геннадий Антонович – начальник научно-исследовательского отдела Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kolykhalov40@mail.ru.

Gennady A. Kolykhalov – Head of Research Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kolykhalov40@mail.ru.

Кравченко Елена Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ek74@list.ru.

Elena G. Kravchenko – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ek74@list.ru.

Аннотация. В работе представлены результаты вычислений предельно больших и предельно малых космологических параметров Вселенной. Выявлена характерная закономерность: отношение соответствующих предельно больших величин к предельно малым определяется одинаковым числовым значением в рамках основных единиц измерения в системе СИ. Сделано предположение, что протекающие во Вселенной процессы синхронизированы относительно изменения времени и её информационной составляющей. Определено возможное время расширения Вселенной. Получена формула, устанавливающая связь плотности во Вселенной с изменением времени, и определены её величины для предельно малого, планковского и современного значения времени, а также её значение для момента окончания расширения Вселенной. Приведены вычисленные по полученным формулам планковские значения длины, массы и энергии, и показано их соответствие принятым в науке значениям планковских величин. Показано, что космологический параметр плотности Вселенной Ω не зависит от времени.

Summary. The paper presents the results of calculations of extremely large and extremely small cosmological parameters of the Universe. A characteristic pattern was revealed: the ratio of the corresponding extremely large values to extremely small ones is determined by the same numerical value within the basic units of measurement in the SI system. It has been assumed that the processes taking place in the Universe are synchronized regarding the change in time and its information component. The possible time of expansion of the Universe has been determined. A formula was obtained that establishes the relationship of density in the Universe with time change and its values were determined for the extremely small, Planck and modern time values, as well as its value for the moment of the end of the expansion of the Universe. Planck values of length, mass and energy calculated by obtained formulas are given and their correspondence with values of Planck values accepted in science is shown. It has been shown that the cosmological parameter of the density of the Universe is Ω independent of time.

Ключевые слова: Вселенная, Большой Взрыв, праматерия, планковские величины, кванты, время, масса, длина, гравитационный радиус, плотность, информация, синхронизация, вращение, космологический параметр плотности.

Key words: Universe, Big Bang, primacy, Planck quantities, quanta, time, mass, length, gravitational radius, density, information, synchronization, rotation, cosmological density parameter.

УДК 524.852:52-423;53.02:530.145

Вселенная! Её тайны во всех своих формах и проявлениях, во все времена и у всех народов будоражили умы многих людей, вызывали у них неподдельный интерес и желание к познанию этих тайн [1].

На сегодняшний день человечество очень многое узнало о Вселенной (Космосе), о законах взаимодействия её частей и элементов между собой на многих иерархических уровнях, начиная от



микромира и кончая макрокосмосом, о закономерностях, управляющих Вселенной и сформировавших её современный облик.

При этом удивительно, и даже в чём-то парадоксально, что чем больше мы узнаем о Вселенной, тем ещё больше тайн предлагает нам она.

К настоящему времени учёные – и теоретики, и экспериментаторы – достаточно глубоко проникли во многие тайны Вселенной, открыли фундаментальные законы и определили с высокой точностью значения многих фундаментальных величин, лежащих в основе её рождения и дальнейшего развития и определяющих важные, существенные стороны жизни Космоса.

В свете изложенного интерес также представляет оценка предельных значений для ряда величин, характеризующих с определённых позиций важные свойства Вселенной.

Для оценки этих предельных значений введём ряд представлений и предположений (гипотез):

1. Исследования проводятся в рамках модели Большого Взрыва. Полагаем, что к моменту начала Большого Взрыва праматерия в области сингулярности вращалась с гигантской угловой скоростью ω [2], определяемой по формуле

$$\omega = 2\pi \cdot \nu, \quad (1)$$

где ν – частота колебаний.

Таким образом, будем предполагать, что Вселенная имеет главную, космологическую ось вращения.

2. Предполагаем, что вся масса M современной Вселенной (барионная, тёмной материи и тёмной энергии в эквиваленте массы) в момент Большого Взрыва была сосредоточена в фазе праматерии в области сингулярности [3].

В работе [4] отмечается, что масса барионной материи составляет приблизительно величину порядка $m_b \approx 10^{53}$ кг и определяет около 5 % всей массы Вселенной.

Относительно точные на сегодняшний день значения масс в процентных соотношениях представлены в работе [5].

В нашем случае мы принимаем, что вся масса Вселенной равна

$$M = 2 \cdot 10^{54} \text{ кг}. \quad (2)$$

В работе [6] отмечается, что масса праматерии в фазе сингулярности имеет значение $M \sim 10^{70}$ кг.

3. Примем, что Вселенная расширяется не бесконечно в пространстве и времени, а имеет предел, т. е. будем считать, что трёхмерное пространство обладает геометрией Римана, имеет положительную кривизну и является замкнутым, а его объём – ограниченным.

В этом случае расширяющаяся Вселенная достигает определённого максимального радиуса, а расширение сменяется сжатием.

4. Полагаем, что возникновение барионной (видимой) материи и рост её массы после Большого Взрыва с течением времени происходят в результате интенсивного падения температуры с соответствующей трансформацией праматерии. Процесс проходит три фазы: тёмная гия → тёмная материя → барионная материя (планеты, звёзды, галактики и т. д.). В качестве аналогии можно привести процесс фазового перехода жидкости (например, воды) от парообразного состояния при высокой температуре в жидкую, затем в кристаллическую (твёрдую) в процессе последовательного снижения температуры.

5. Считаем, что во все периоды жизни Вселенной закон сохранения массы M не нарушается.

Массу Вселенной, представленную формулой (2), будем считать одним из предельных значений Вселенной, определяющей её свойства в качестве одного из параметров.

Определим минимальную величину отрезка времени t , для чего воспользуемся формулой Луи де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}, \quad (3)$$

где λ – длина волны; h – постоянная Планка; m – масса; v – скорость.

Примем во внимание, что

$$\lambda = 2 \cdot \pi \cdot r \text{ и } r = c \cdot t,$$

где r – радиус; c – скорость света; t – время.

Тогда формула (3) примет вид

$$t = \frac{\hbar}{m \cdot c^2}, \quad (4)$$

где $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,0557 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

Из формулы (4) видно, что минимальное значение отрезка времени t будет иметь место только при максимальном значении массы M , т. е. при $m = M$:

$$t = t_{\min} = \frac{\hbar}{M \cdot c^2}. \quad (5)$$

Подставим сюда значения величин для \hbar , M и c , получим

$$t_{\min} = \frac{1,0557 \cdot 10^{-34}}{2 \cdot 10^{54} \cdot 9 \cdot 10^{16}} = 0,586 \cdot 10^{-105} \text{ с.}$$

В работе [7] приведены расчёты по оценке минимального времени для массы $M = 10^{53}$ кг.

Таким образом, минимальный отрезок времени t_{\min} по принятому в научной среде определению для кванта будем условно считать квантом времени $t_{\text{кв}}$ в нашей Вселенной (хотя он может быть и иным), т. е.

$$t_{\min} = t_{\text{кв}} = 0,586 \cdot 10^{-105} \text{ с.}$$

Определим значение максимальной угловой скорости ω_{\max} , для чего воспользуемся соотношениями (1) и (3) и учтём, что $m = M$, $v = c/\lambda$ и $v = c$, получим

$$\omega_{\max} = \frac{M \cdot c^2}{\hbar}. \quad (6)$$

Подставим в формулу (6) значения величин M , c и \hbar , получим

$$\omega_{\max} = \frac{2 \cdot 10^{54} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{1,0557 \cdot 10^{-34}} = 1,7045 \cdot 10^{105} \frac{1}{\text{с}}.$$

Вычисленная угловая скорость может быть получена также из формулы

$$\omega_{\max} = \frac{1}{t_{\text{кв}}} = \frac{1}{0,586 \cdot 10^{-105}} = 1,7045 \cdot 10^{105} \frac{1}{\text{с}}.$$

Определим предельно малое значение условного радиуса r_{\min} принятого сферическим объёма, в котором находилась праматерия в момент начала Большого Взрыва, и назовём его, как и минимальное время, условно квантом длины.

Для этого воспользуемся зависимостью

$$r = c \cdot t.$$

С учётом формулы (4) получим

$$r = \frac{\hbar}{m \cdot c}. \quad (7)$$

Из формулы видно, что минимальное значение радиуса r будет иметь место при $m = M$.

Тогда $r_{\min} = r_{\text{кв}} = \frac{\hbar}{M \cdot c}$.

Подставим сюда значения входящих величин, получим

$$r_{\min} = r_{\text{кв}} = \frac{1,0557 \cdot 10^{-34}}{2 \cdot 10^{54} \cdot 3 \cdot 10^8} = 1,758 \cdot 10^{-97} \text{ м.}$$

Минимальная длина волны λ определится по формуле

$$\lambda = 2\pi \cdot r_{\min} = 6,28 \cdot 1,758 \cdot 10^{-97} = 1,104 \cdot 10^{-97} \approx 1,1 \cdot 10^{-96} \text{ м.}$$

Полученная зависимость даёт основание полагать, что во Вселенной не могут существовать частицы с длиной волны меньше приведённой.

Формула (7) позволяет также определить гравитационный радиус горизонта Вселенной $r = r_g$. Очевидно, что его значение r_g будет максимальным при $m = m_{\min}$, которую также условно назовём квантом массы $m_{\text{кв}}$, т. е. $m_{\min} = m_{\text{кв}}$.

В этом случае формула (7) запишется в виде

$$r_g = \frac{\hbar}{m_{\text{кв}} \cdot c}. \quad (8)$$

Определим минимальное значение массы m , которую может иметь частица во Вселенной и в качестве которой могут выступать, например, фотон, гравитон или другие.

Для этого воспользуемся зависимостью, представленной в работе [8]:

$$m = \frac{c^3}{G} \cdot t, \quad (9)$$

где G – гравитационная постоянная.

Подставим сюда значение для времени t , вычисленное по формуле (5), будем иметь

$$m_{\text{кв}} \frac{c^3}{G} \cdot \frac{\hbar}{M \cdot c^2} = \frac{\hbar \cdot c}{M \cdot G}. \quad (10)$$

Внесём сюда значения для c , G и M , получим

$$m_{\text{кв}} = \frac{1,0557 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^{54} \cdot 6,67 \cdot 10^{-11}} = 2,372 \cdot 10^{-70} \text{ кг.}$$

Формулу для массы $m_{\text{кв}}$, полученной по зависимости (10), подставим в соотношение (8), будем иметь

$$r_g = \frac{G \cdot M}{c^2}. \quad (11)$$

Подставим сюда значения входящих величин, получим

$$r_g = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 2 \cdot 10^{54}}{9 \cdot 10^{16}} = 1,4832 \cdot 10^{27} \text{ м.}$$

Длина волны

$$\lambda = \lambda_g = 2\pi \cdot r_g = 6,28 \cdot 1,4832 \cdot 10^{27} = 9,3144 \cdot 10^{27} \text{ м.}$$

Формула (11) определяет предельный радиус расширения Вселенной, т. е. $r_g = r_{\max}$.

Соответственно, максимальное время достижения $t_g = t_{\max}$ гравитационного горизонта Вселенной определится значением

$$t_g = t_{\max} = \frac{r_g}{c} = \frac{G \cdot M}{c^3} = \frac{1,4832 \cdot 10^{27}}{3 \cdot 10^8} = 0,4944 \cdot 10^{19} \text{ с.}$$

Если принять, что Вселенная вращается относительно своей главной космологической оси, при этом окружную скорость вращения частиц на границе предельного радиуса считать максимальной и равной скорости света, то можно рассчитать минимальное теоретическое время полного оборота Вселенной вокруг своей оси.

Для этого воспользуемся формулой

$$T_{\min} = \frac{2 \cdot \pi}{c} \cdot r_g = \frac{2 \cdot \pi}{c} \cdot \frac{G \cdot M}{c^2} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{G \cdot M}{c^3},$$

где T – время полного оборота Вселенной.

Подставим сюда значения входящих величин, получим

$$T_{\min} = \frac{2 \cdot 3,14}{3 \cdot 10^8} \cdot 1,5 \cdot 10^{27} = 3,14 \cdot 10^{19} \text{ с.}$$

Время одного года равно $3,156 \cdot 10^7$ с, тогда время полного оборота будет равно $T \approx 10^{12}$ лет, т. е. одному триллиону лет.

Поэтому все далёкие от нас галактики будут нам всегда казаться неподвижными. Нашей Вселенной сейчас всего около 14 млрд лет.

В работе [9] также представлена формула для определения гравитационного радиуса горизонта Вселенной r_g в форме

$$r_g = \frac{2G \cdot M}{c^2}.$$

В этой формуле под r_g , по-видимому, понимается расстояние между крайними точками гравитационного радиуса Вселенной $l_g = 2r_g$, т. е. как бы наблюдатель находится не в центре сферы, а на её периферии, тогда вместо r_g надо поставить l_g . В этом случае формула (11) будет совпадать с последней формулой и они одинаковым образом определяют рассматриваемый предельный случай.

В научной статье [10] для времени $t_g = \frac{r_g}{c} = 10^{19}$ с представлены значения величин $r_g = 10^{27}$ м и $M = 10^{53}$ кг.

Для справки: у нас сейчас на космическом дворе время $t \approx 4,37 \cdot 10^{17}$ с, т. е. приблизительно около 14 млрд лет.

Таким образом, будем предполагать, что через время t_g расширение Вселенной прекратится и начнётся фаза её сжатия. При этом вся масса тёмной материи и тёмной энергии полностью преобразуются в барионную (видимую) материю. Однако это наступит нескоро. Если принять полное время расширения Вселенной равным $t_g = 0,5 \cdot 10^{19}$ с и учесть, что время одного года $t_{\Gamma} = 3,156 \cdot 10^7$ с, то этот момент наступит только через $\frac{0,5 \cdot 10^{19}}{3,156 \cdot 10^7} \approx 158,5 \cdot 10^9$ лет (158,5 млрд лет).

По состоянию на сегодняшнюю эпоху Вселенная живёт около 14 млрд лет. То есть наша Вселенная должна прожить ещё как минимум 11 раз по сравнению с тем, что она уже прожила.

Если принять продолжительность жизни человека в 100 лет, то сейчас в сопоставлении с вышеприведёнными цифрами ему должно быть около девяти-десяти лет, это ещё возраст ребёнка. То есть современный возраст Вселенной – это детский возраст. У неё ещё всё впереди, и у человечества тоже.

Результаты проведённых вычислений позволяют составить список предельно больших и предельно малых величин. К предельно большим величинам, характеризующим определённые свойства Вселенной, отнесём: массу Вселенной $M = 2 \cdot 10^{54}$ кг, гравитационный радиус горизонта Вселенной на момент максимального расширения $r_g = 1,4832 \cdot 10^{27}$ м и соответствующую ему длину волны $\lambda_g = 2\pi \cdot r_g = 9,3144 \cdot 10^{27}$ м, время расширения $t_g = 0,4944 \cdot 10^{19}$ с.

Соответственно, к предельно малым величинам отнесём: значение отрезка времени $t_{\text{кв}} = 0,586 \cdot 10^{-105}$ с, отрезок длины (радиуса) $l = r_{\text{кв}} = 1,758 \cdot 10^{-97}$ м, а также массу частицы $m_{\text{кв}} = 2,372 \cdot 10^{-70}$ кг.

Так как в нашем мироздании все протекающие в нём процессы носят дискретный характер и существует понятие кванта – минимального количества, порции, на которые могут изменяться дискретные по своей природе физические величины (действие, энергия, количество движения и

т. д.), то вышеперечисленные минимальные значения в принятой интерпретации, как уже говорилось выше, будем условно определять как кванты времени $t = t_{\text{кв}}$, длины $r = r_{\text{кв}} = l_{\text{кв}}$ и массы $m = m_{\text{кв}}$.

В рамках проведённого исследования выявляется одна очень интересная закономерность: отношение соответствующих предельно больших величин к предельно малым, т. е. к квантам, даёт практически одинаковый результат в рамках основных единиц измерения в системе СИ:

$$\begin{aligned}\frac{t_g}{t_{\text{кв}}} &= \frac{0,4944 \cdot 10^{19}}{0,586 \cdot 10^{-105}} \approx 0,84 \cdot 10^{124}; \\ \frac{r_g}{r_{\text{кв}}} &= \frac{1,4832 \cdot 10^{27}}{1,758 \cdot 10^{-97}} \approx 0,84 \cdot 10^{124}; \\ \frac{M}{m_{\text{кв}}} &= \frac{2 \cdot 10^{54}}{2,372 \cdot 10^{-70}} \approx 0,84 \cdot 10^{124},\end{aligned}$$

то есть

$$N = \frac{t_g}{t_{\text{кв}}} = \frac{r_g}{r_{\text{кв}}} = \frac{M}{m_{\text{кв}}} \approx 0,84 \cdot 10^{124}, \quad (12)$$

где N – количество квантованных единиц в максимальных значениях величин времени, расстояний, масс и др.

С другой стороны, величину N можно выразить через фундаментальные постоянные, включив туда и массу Вселенной M из соотношения

$$N = \frac{M}{m_{\text{кв}}}.$$

Подставим сюда значение $m_{\text{кв}}$ из формулы (10), получим

$$N = \frac{M^2 \cdot G}{\hbar \cdot c} = \frac{(2 \cdot 10^{54})^2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11}}{1,0557 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} = 0,8424 \cdot 10^{124}.$$

Точность величины N зависит от точности значения массы Вселенной M .

Из соотношения (12) можно сделать вывод, что независимо от природы характерных величин в каждой из них количество квантов укладывается в равной мере. Таким образом, все процессы, протекающие во Вселенной, синхронизированы относительно времени.

Она также даёт основание считать, что справедлива зависимость вида

$$\frac{t}{t_{\text{кв}}} = \frac{r}{r_{\text{кв}}} = \frac{m}{m_{\text{кв}}} = n, \quad (13)$$

где n – количество квантов для текущих значений времени t , радиуса r и массы m .

Значение n можно определить соотношением

$$n = \frac{t}{t_{\text{кв}}}.$$

Если каждому кванту времени поставить в соответствие один бит информации [7], то за период времени $t_g = 0,4944 \cdot 10^{19}$ с получим величину битов информации N , равную

$$N = \frac{0,4944 \cdot 10^{19}}{0,586 \cdot 10^{-105}} = 0,84 \cdot 10^{124} \text{ бит.}$$

Таким образом, информационное поле в количествах битов находится в полном соответствии с количеством квантов в каждой предельной величине t_g , M и r_g .

Также можно принять, что каждая квантовая частица имеет свою дату и место рождения и одновременно является носителем информации на квантовом уровне. То есть в одном квантовом отрезке времени не может быть больше одной квантовой частицы (квантовой единицы массы).

По-видимому, квантовая частица обладает и другими свойствами.

Установим связь между значениями массы вещества m и времени t . Определим её зависимость

$$m = n \cdot m_{\text{кв}}, \quad (14)$$

где n – количество квантовых частиц в массе, равной m .

В соответствии с формулой (13) значение n будет также справедливым и для отношения

$$n = \frac{m}{m_{\text{кв}}}.$$

В этом случае формула (14) примет вид

$$m = \frac{m_{\text{кв}}}{t_{\text{кв}}} \cdot t. \quad (15)$$

Подставим сюда значения величин $m_{\text{кв}}$ и $t_{\text{кв}}$, получим

$$\frac{m_{\text{кв}}}{t_{\text{кв}}} = \frac{2,372 \cdot 10^{-70}}{0,586 \cdot 10^{-105}} = 4,05 \cdot 10^{35} \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right).$$

С другой стороны, из формулы (9) с учётом соотношения (13) также вытекает, что

$$\frac{m}{t} = \frac{m_{\text{кв}}}{t_{\text{кв}}} = \frac{c^3}{G} = 4,05 \cdot 10^{35} \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right).$$

Тогда формула (15) приобретает вид

$$m = \frac{c^3}{G} \cdot t, \quad (16)$$

т. е. совпадает с формулой (9), но при этом мы видим, что она применима в более широком диапазоне изменения времени $t_{\text{кв}} \leq t \leq t_g$.

В качестве примера подсчитаем по формуле (16) значения масс для отрезков времени $t_{\text{кв}}$, t_p и t_g , здесь t_p – планковское время:

$$m_{\text{кв}} = 4,05 \cdot 10^{35} \cdot 0,586 \cdot 10^{-105} = 2,372 \cdot 10^{-70} \text{ кг},$$

$$m_p = 4,05 \cdot 10^{35} \cdot 5,4 \cdot 10^{-44} = 2,187 \cdot 10^{-8} \text{ кг},$$

$$M = 4,05 \cdot 10^{35} \cdot 0,5 \cdot 10^{19} = 2 \cdot 10^{54} \text{ кг}.$$

Совместное решение уравнений (4) и (9) относительно времени t и массы m позволяет получить формулы для планковского времени t_p и планковского значения массы m_p соответственно:

$$t_p = \left(\frac{\hbar \cdot G}{c^5} \right)^{0,5} = 5,39 \cdot 10^{-44} \text{ с} \text{ и } m_p = \left(\frac{\hbar \cdot c}{G} \right)^{0,5} = 2,176 \cdot 10^{-8} \text{ кг}.$$

В научной литературе эти формулы и значения их величин времени и массы, которые определены с большой точностью, представлены широко.

Формулы для предельно малых значений времени $t_{\text{кв}}$, $r_{\text{кв}}$ и $m_{\text{кв}}$ и $E_{\text{кв}}$ можно записать в виде

$$t_{\text{кв}} = \frac{\hbar}{M \cdot c^2} = 0,586 \cdot 10^{-105} \text{ с},$$

$$r_{\text{кв}} = l_{\text{кв}} = \frac{\hbar}{M \cdot c} = 1,758 \cdot 10^{-97} \text{ м},$$



$$m_{\text{кв}} = \frac{c^3}{G} \cdot \frac{\hbar}{M \cdot c^2} = \frac{c \cdot \hbar}{M \cdot G} = 2,372 \cdot 10^{-70} \text{ кг},$$

$$E_{\text{кв}} = \frac{\hbar \cdot c^3}{M \cdot G} = 2,137 \cdot 10^{-53} \text{ Дж}.$$

Текущие значения длины, массы и энергии в функции количества квантов определяются через зависимости

$$t = n \cdot t_{\text{кв}} = n \cdot \frac{h}{M \cdot c^2}, \quad r = n \cdot r_{\text{кв}} = n \cdot \frac{h}{M \cdot c} = n \cdot r_{\text{кв}} = n \cdot \frac{h}{M \cdot c},$$

$$m = n \cdot m_{\text{кв}} = n \cdot \frac{c \cdot h}{M \cdot G}, \quad E = n \cdot m_{\text{кв}} \cdot c^2,$$

где $n = \frac{t}{t_{\text{кв}}}$, $M = 2 \cdot 10^{54} \text{ кг}$, $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$, $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$.

Учтём, что

$$n = \frac{t}{t_{\text{кв}}}, \quad \frac{m_{\text{кв}}}{t_{\text{кв}}} = \frac{c^3}{G}, \quad \frac{h}{M \cdot c^2 \cdot t_{\text{кв}}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{2 \cdot 10^{54} \cdot 9 \cdot 10^{16} \cdot 3,68 \cdot 10^{-105}} = 1.$$

Тогда текущие значения длины, массы и энергии, выраженные в квантах, могут быть определены в функции времени в виде соотношений

$$r = c \cdot t, \quad m = \frac{c^3}{G} \cdot t, \quad E = \frac{c^5}{G} \cdot t.$$

Из последних формул для планковских значений величин l_p , m_p и энергии E_p будем иметь при $t_p = 5,4 \cdot 10^{-44} \text{ с}$ соответственно

$$l_p = 3 \cdot 10^8 \cdot 5,4 \cdot 10^{-44} = 1,62 \cdot 10^{-35} \text{ м} \quad (l_p = 1,616 \cdot 10^{-35} \text{ м}),$$

$$m_p = \frac{27 \cdot 10^{24}}{6,67 \cdot 10^{-11}} \cdot 5,4 \cdot 10^{-44} = 2,2 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \quad (m_p = 2,176 \cdot 10^{-8} \text{ кг}),$$

$$E_p = \frac{243 \cdot 10^{40}}{6,67 \cdot 10^{-11}} \cdot 5,4 \cdot 10^{-44} = 1,967 \cdot 10^9 \text{ Дж} \quad (E_p = 1,956 \cdot 10^9 \text{ Дж}).$$

В круглых скобках представлены современные значения планковских величин.

Следует особо подчеркнуть, что постоянные Планка являются важнейшими космологическими параметрами, используемыми при изучении процессов в рамках атомной и ядерной физики и исследованиях Вселенной (космоса). С одной стороны, они выведены с использованием фундаментальных величин и вычислены с большой степенью точности, а с другой, являются маркерами, маяками, которые не дают наукам о Вселенной сбиться с правильного пути в рамках построения физических, математических и других моделей нашего космического мира.

В табл. 1 представлены формулы и значения предельных (минимальных и максимальных) космологических параметров Вселенной.

Установим связь средней плотности вещества во Вселенной в функции времени. Воспользуемся формулой Гаусса-Остроградского, которую применительно к нашему случаю представим в виде

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot v \cdot S, \quad (17)$$

где S – текущая поверхность Вселенной, определяемая формулой

$$S = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \frac{1}{k}, \quad (18)$$

здесь k – поправочный коэффициент, учитывающий несферичность Вселенной.

Таблица 1

Пределные космологические параметры Вселенной

Формулы вычисления параметров	Значения параметров		
	Минимальные	Максимальные	Планковские
$t = n \cdot \frac{\hbar}{M \cdot c^2}$	$t_{\min} = \frac{\hbar}{M \cdot c^2} =$ $= 0,586 \cdot 10^{-105} \text{ с}$	$t_{\max} = \frac{G \cdot M}{c^3} =$ $= 0,4944 \cdot 10^{19} \text{ с}$	$t_p = \left(\frac{\hbar \cdot G}{c^5}\right)^{0,5} =$ $= 5,39 \cdot 10^{-44} \text{ с}$
$r = c \cdot t$	$r_{\min} = \frac{\hbar}{M \cdot c} =$ $= 1,758 \cdot 10^{-97} \text{ м}$	$r_{\max} = \frac{G \cdot M}{c^2} =$ $= 1,4832 \cdot 10^{27} \text{ м}$	$r_p = \left(\frac{\hbar \cdot G}{c^3}\right)^{0,5} =$ $= 1,612 \cdot 10^{-35} \text{ м}$
$\omega = \frac{1}{t}$	$\omega_{\min} = \frac{c^3}{G \cdot M} =$ $= 2,023 \cdot 10^{-19} \left(\frac{1}{\text{с}}\right)$	$\omega_{\max} = \frac{M \cdot c^2}{\hbar} =$ $= 1,7045 \cdot 10^{105} \left(\frac{1}{\text{с}}\right)$	$\omega_p = \left(\frac{c^5}{\hbar \cdot G}\right)^{0,5} =$ $= 1,854 \cdot 10^{43} \left(\frac{1}{\text{с}}\right)$
$m = \frac{c^3}{G} \cdot t$	$m_{\min} = \frac{\hbar \cdot c}{M \cdot G} =$ $= 2,372 \cdot 10^{-70} \text{ кг}$	$m_{\max} = M = 2 \cdot 10^{54} \text{ кг}$	$m_p = \left(\frac{\hbar \cdot c}{G}\right)^{0,5} =$ $= 2,176 \cdot 10^{-8} \text{ кг}$
$E = \frac{c^5}{G} \cdot t$	$E_{\min} = \frac{\hbar \cdot c^3}{M \cdot G} =$ $= 2,137 \cdot 10^{-53} \text{ Дж}$	$E_{\max} = M \cdot c^2 =$ $= 1,8 \cdot 10^{71} \text{ Дж}$	$E_p = \left(\frac{\hbar \cdot c^5}{G}\right)^{0,5} =$ $= 1,956 \cdot 10^9 \text{ Дж}$
$N = \frac{M^2 \cdot G}{\hbar \cdot c} = \frac{(2 \cdot 10^{54})^2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11}}{1,0557 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} = 0,8424 \cdot 10^{124}$			

Поверхность S определяется как поверхность сплюснутого вдоль малой оси вращения эллипсоида, т. е. это поверхность сфероида.

По части формы нашей Вселенной имеется много различных мнений. Одни космологи полагают, что наблюдаемая нами Вселенная близка к пространственно плоской, другие считают, что во все времена Вселенная имела, имеет и будет иметь форму сферы.

Так как поверхность сфероида по площади меньше площади поверхности сферы того же радиуса, то вводится поправочный коэффициент $k > 1$. Величина левой части формулы (17) определяется из соотношения (9) и имеет значение

$$\frac{dm}{dt} = \frac{c^3}{G}. \quad (19)$$

Подставим формулы (18) и (19) в зависимость (17), примем, что $v = c$, и учтём, что радиус расширения Вселенной определяется зависимостью $r = c \cdot t$, получим для определения средней плотности ρ Вселенной в функции времени t соотношение

$$\rho = \frac{k}{4 \cdot \pi \cdot G} \cdot \frac{1}{t^2}. \quad (20)$$

Эта формула справедлива для всего диапазона времени $t_{\text{кв}} \leq t \leq t_g$.

Определим значение критической плотности вещества во Вселенной ρ_c . Это параметр космологической модели Фридмана, который по своей сути позволяет отделить ограниченное расширение Вселенной от неограниченного.

Воспользуемся зависимостью, представленной в работе [11] и определяющей критическую плотность ρ_c в виде

$$\rho_c = \frac{3 \cdot H^2}{8 \cdot \pi \cdot G}, \quad (21)$$

где H – постоянная Хаббла.

В работе [12] отмечается, что постоянная Хаббла не является постоянной в широком смысле этого слова, зависит от времени и может быть определена по формуле

$$H = \frac{1}{t}.$$

Подставим это значение в формулу (21), получим

$$\rho_c = \frac{3}{8 \cdot \pi \cdot G \cdot t^2}. \quad (22)$$

Введём космологический параметр плотности Ω , который определяется как отношение средней плотности ρ Вселенной к критической ρ_c :

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}.$$

Подставим в эту формулу значения величин по зависимостям (20) и (22), будем иметь

$$\Omega = k \cdot \frac{\frac{k}{4 \cdot \pi \cdot G} \cdot \frac{1}{t^2}}{\frac{3}{8 \cdot \pi \cdot G \cdot t^2}} = \frac{2}{3} \cdot k. \quad (23)$$

Полученная формула (23) говорит о том, что данный параметр Ω не зависит от времени и является постоянной величиной во все периоды существования Вселенной.

В рамках нашей космической эпохи учёные показали, что средняя плотность Вселенной, определённая экспериментально, отличается от критической в пределах погрешности измерений не более чем на 0,1...0,3 % (плюс-минус). Это даёт нам основание принять $\Omega = 1$. В этом случае коэффициент k будет равен $k = 1,5$ и формула (20) примет вид

$$\rho = \frac{k}{4 \cdot \pi \cdot G} \cdot \frac{1}{t^2} = \frac{17,9 \cdot 10^8}{t^2} \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right). \quad (24)$$

Подсчитаем по полученной формуле (24) значение средней плотности Вселенной для времени текущей космической эпохи $t_{\text{кэ}}$, а также для $t_{\text{кв}}$, t_p , t_g :

$$\rho_{\text{кэ}} = k \cdot \frac{17,9 \cdot 10^8}{(4,37)^2 \cdot 10^{34}} = 0,937 \cdot 10^{-26} \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right).$$

Критическая плотность ρ_c для этого же времени, определённая по формуле (22), даёт значение

$$\rho_c = 0,937 \cdot 10^{-26} \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right).$$

Соответственно, для времени $t_{\text{кв}}$, t_p , t_g

$$\rho_{\text{кв}} = \frac{17,9 \cdot 10^8}{(0,586)^2 \cdot 10^{-210}} = 52,126 \cdot 10^{218} \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right),$$

$$\rho_p = \frac{17,9 \cdot 10^8}{(5,4)^2 \cdot 10^{-88}} = 0,615 \cdot 10^{96} \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right),$$

$$\rho_g = \frac{17,9 \cdot 10^8}{(0,5)^2 \cdot 10^{38}} = 0,716 \cdot 10^{-28} \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right).$$

Значение $\Omega = 1$ не даёт нам возможности однозначно ответить на вопрос, что будет в будущем со Вселенной – сжатие или расширение, или что-то другое. Это знает только Всевышний.

Современные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить с определённой степенью точности значения средней и критической плотности Вселенной и сделать определённые выводы.

В работе [13] наблюдаемая средняя плотность Вселенной определяется величиной $\rho \cong 0,9 \cdot 10^{-26} \text{ кг/м}^3$, при этом отмечается, что она совпадает с теоретическим решением Фридмана, и это, по мнению авторов, является удивительным фактом.

В работе [14] критическая плотность Вселенной определяется величиной $\rho_c \cong 0,931 \cdot 10^{-26} \text{ кг/м}^3$.

В работе [15] отмечается, что значение средней плотности энергии современной Вселенной ρ равно критической плотности ρ_c в пределах ошибки измерений:

$$-0,001 \leq (\rho - \rho_c) / \rho_c \leq +0,003, \text{ или } 0,999 \leq \Omega \leq 1,003.$$

Последнее неравенство позволяет предположить, что сценарий, соответствующий $\Omega > 1$, является в определённой степени более вероятным, чем обратный: $\Omega < 1$. Не исключается и сценарий, соответствующий $\Omega = 1$.

Выводы

1. Получены предельно малые и предельно большие космологические величины, определяющие облик Вселенной.

2. Выявлена характерная закономерность: отношения соответствующих предельно больших величин к предельно малым определяются одинаковым числовым значением в рамках основных единиц измерения в системе СИ.

3. Сделано предположение, что протекающие во Вселенной процессы синхронизированы относительно изменения времени и её информационной составляющей.

4. Определено возможное время расширения Вселенной.

5. Получена формула, устанавливающая связь плотности во Вселенной с изменением времени, и определены её величины для предельно малого, планковского и современного значения времени, а также её значение для момента окончания расширения Вселенной.

6. Приведены вычисленные по полученным формулам планковские значения длины, массы и энергии, и показано их соответствие с принятыми в науке значениями планковских величин.

7. Показано, что космологический параметр плотности Ω не зависит от времени и его значение, по-видимому, было заложено изначально в момент Большого Взрыва. Наша задача достоверно определить его значение и заранее узнать о своей судьбе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Климушкин, Д. Ю. Объяснение Вселенной: от Фалеса до Ньютона / Д. Ю. Климушкин. – Новосибирск: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирское отделение Российской академии наук», 2021. – 403 с.
2. Чечин, Л. М. Вращение Вселенной в различные космологические эпохи / Л. М. Чечин // *Астрономический журнал*. – 2016. – Т. 93. – № 6. – С. 515.
3. Кондратьев, А. С. Капельная модель образования Вселенной / А. С. Кондратьев // *Вестник МГПУ. Серия: Естественные науки*. – 2012. – № 1 (9). – С. 9-14.
4. Наука и образование // Библиотека Нейро. – URL: <https://ya.ru/neurum/c/nauka-i-obrazovanie> (дата обращения: 21.03.2025). – Текст: электронный.
5. Тёмная материя // Википедия – свободная энциклопедия. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Темная материя](https://ru.wikipedia.org/wiki/Темная_материя) (дата обращения: 21.03.2025). – Текст: электронный.
6. Егоров, В. А. Масса вещественной Вселенной / В. А. Егоров // *Norwegian Journal of Development of the International Science*. – 2019. – № 12-1 (37). – С. 44-45.
7. Колыхалов, Г. А. Генетика «Большого взрыва» / Г. А. Колыхалов, Е. Г. Кравченко // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2025. – № I (81). – С. 93-102.



8. Колыхалов, Г. А. Интерпретация квантов энергии и массы фотона с позиций закона всемирного тяготения / Г. А. Колыхалов, Е. Г. Кравченко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № I (81). – С. 109-114.
9. Метагалактика // Википедия – свободная энциклопедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Метагалактика> (дата обращения: 21.03.2025). – Текст: электронный.
10. Кошман, В. От закона всемирного тяготения к оценке гравитационной массы Вселенной / В. Кошман // Norwegian Journal of Development of the International Science. – 2022. – № 80. – С. 45-49.
11. Критическая плотность // Википедия – свободная энциклопедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Критическая_плотность (дата обращения: 21.03.2025). – Текст: электронный.
12. Закон Хаббла // Элементы, 2005-2025. – URL: https://elementy.ru/trefil/21148/Zakon_Khabbla (дата обращения: 21.03.2025). – Текст: электронный.
13. Почему наша Вселенная очень разреженная и её плотность на сто порядков меньше планковской? // Яндекс Кью. – URL: https://yandex.ru/q/question/pochemu_nasha_vselennaia_ochen_i_eio_na_6bb61035/ (дата обращения: 21.03.2025). – Текст: электронный.
14. Критическая плотность (космология) // Википедия – свободная энциклопедия. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Критическая_плотность_\(космология\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Критическая_плотность_(космология)) (дата обращения: 21.03.2025). – Текст: электронный.
15. Критическая плотность Вселенной // Большая российская энциклопедия, 2022-2025. – URL: <https://bigenc.ru/c/kriticheskajaia-plotnost-vselennoi-1411f4> (дата обращения: 21.03.2025). – Текст: электронный.

Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.
G. A. Kolykhalov, E. G. Kravchenko

МОДЕЛЬ АТОМА И МЕХАНИЗМА СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНА

ATOMIC MODEL AND SPONTANEOUS ELECTRON EMISSION MECHANISM

Колыхалов Геннадий Антонович – начальник научно-исследовательского отдела Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kolykhalov40@mail.ru.
Gennady A. Kolykhalov – Head of Research Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kolykhalov40@mail.ru.

Кравченко Елена Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ek74@list.ru.

Elena G. Kravchenko – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ek74@list.ru.

Аннотация. Представлена модель атома, в рамках которой сделано предположение, что внутриатомное пространство заполнено материей (эфиром), обладающей деформационной упругостью и сопротивлением при движении электрона. Сделано предположение, что пространственные колебания ядра атома порождают волны излучения, которые энергетически взаимодействуют с электронами, переводя их на более высокие орбиты. Предложена математическая модель механизма спонтанного излучения, в которой, помимо кулоновских и центростремительных сил, учтены силы сопротивления и силы упругой деформации среды. Получены зависимости для определения коэффициентов упругой деформации среды и затухания колебаний, а также времени перехода электрона с одной орбиты на другую. Показано, что с ростом числа протонов коэффициенты деформации среды и затухания колебаний существенно возрастают, а время перехода электронов с орбиты на орбиту падает. Выявлено, что чем дальше электроны располагаются от ядра, тем заметнее снижаются коэффициенты деформации среды и затухания колебаний.

Summary. An atom model is presented, within the framework of which it is assumed that the intraatomic space is filled with matter (ether), which has deformation elasticity and resistance during the movement of an electron. It is assumed that the spatial vibrations of the atomic nucleus generate radiation waves that interact energetically with electrons, transferring them to higher orbits. A mathematical model of the spontaneous radiation mechanism is proposed, in which, in addition to Coulomb and centripetal forces, resistance forces and elastic deformation forces of the medium are taken into account. Relationships are obtained to determine coefficients of elastic deformation of the medium and attenuation of oscillations, as well as the time of transition of an electron from one orbit to another. It has been shown that with an increase in the number of protons, the coefficients of deformation of the medium and attenuation of vibrations increase significantly, and the time for electrons to pass from orbit to orbit decreases. It was found that the farther the electrons are located from the nucleus, the more noticeably the coefficients of deformation of the medium and attenuation of vibrations decrease.

Ключевые слова: атом, энергия, сила, орбитали, электрон, материя, упругость, деформация, сопротивление, колебание, затухание, период, спонтанное излучение.

Key words: atom, energy, force, orbitals, electron, matter, elasticity, deformation, resistance, oscillation, damping, period, spontaneous emission.

УДК 539.183:539.184

Возникновение современных представлений о строении и свойствах атома связано с открытиями электрона и радиоактивности. На их основе построена модель атома как системы взаимодействующих электрически заряженных частиц (атомная физика) [1].



Было определено, что все свойства атома связаны либо со свойствами ядра (их изучает ядерная физика), либо со свойствами электронных оболочек атома (их изучает атомная физика). Строение последних определяет многие химические и физические свойства атома и периодичность этих свойств. Было высказано мнение, что основной характеристикой атома в целом является величина положительного заряда [2].

Современная модель атома описывает положение электронов в атоме с точки зрения вероятностей. Электрон потенциально может быть найден на любом расстоянии от ядра, но в зависимости от его уровня энергии в одних областях вокруг ядра он существует чаще, чем в других; эта область называется его атомной орбиталью. Орбитали бывают разных форм: сфера, гантель, тор и так далее – с ядром в середине.

Таким образом, наука об атоме в рамках атомной и ядерной физики достаточно хорошо описывает структуру атома на уровне как электронной оболочки, так и ядра атома. Однако их силовое взаимодействие и взаимовлияние определяются в основном на уровне кулоновских сил. Не рассматриваются наличие внутриатомной среды, материи (эфира) и её роль с точки зрения её физических свойств [3].

В работе А. М. Скребцова [4] проведён анализ состояния вопроса по влиянию электронных оболочек ядра атома на физические и химические свойства элементов. Отмечено, что от момента открытия периодического закона элементов Д. И. Менделеева и до настоящего времени в литературе не опубликованы работы, чётко отрицающие или подтверждающие наличие или отсутствие влияния характеристик ядра на различные свойства химических элементов. В самой работе А. М. Скребцова [4] представлены исследования, которые подтверждают взаимозависимость между числом электронов во внешнем валентном слое Z и удельным зарядом ядра Z/A , где A – атомное число, что подтверждает, по мнению автора, одинаковость их влияния на физические и химические свойства элементов (правило А. М. Скребцова).

Бесспорно, что атом – это единое целое, единый организм (как Солнце и планеты), внутри которого процессы на всех уровнях (электронная оболочка, ядро, внутриатомная материя) взаимосвязаны и взаимообусловлены. Это предполагает роль атома как основного «кирпичика» в строительстве нашей Вселенной на всех её иерархических ступенях, начиная от молекулы и кончая Метагалактиками.

Таким образом, в свете вышеизложенного представляется интересным исследование процессов, связанных с механизмом устойчивости электронов при своих движениях по траекториям в рамках квантово-механической модели и, соответственно, механизмом так называемого спонтанного излучения электрона при переходе из возбуждённого состояния в стационарное.

Для решения поставленной задачи предлагается модель атома, которая определяется (формируется) на основе следующих представлений и положений:

1. Считаем, что внутриатомное пространство не «пустое», а заполнено материей (эфиром), обладающей такими физическими свойствами, как деформационная упругость и сопротивление движению электрона [5]. При этом предполагаем, что материя (эфир) находится во взаимодействии с электронной оболочкой и ядром атома.

2. Полагаем, что пространственные (объёмные) колебания ядра атома порождают волны излучения с определёнными значениями частот и, соответственно, энергии, которые, в свою очередь, взаимодействуют с электронами, переводя их на более высокие энергетические уровни (орбитали).

3. Принимаем, что за время T полного периода колебания ядра оно проходит два цикла: объёмное расширение и объёмное сжатие. В цикле расширения в ядре за счёт внутренних процессов происходит накопление потенциальной энергии – энергии упругой деформации за счёт поступления материи (эфира) в ядро. В цикле сжатия ядра происходит высвобождение потенциальной энергии в форме волн излучения (например, фотоны), которые взаимодействуют с электронной оболочкой, т. е. ядро атома «дышит».

Таким образом, в цикле расширения ядра идёт спонтанное излучение (высвобождение) приобретённой энергии от электронов и они возвращаются в свои стационарные (стабильные) со-

стояния. В цикле сжатия ядра атома идёт высвобождение энергии из ядра атома в форме излучения фотонов и накопление энергии у электронов за счёт взаимодействия с фотонами. В результате осуществляется переход электронов на более высокие орбитали.

В частности, можно предположить, что вероятностное распределение электронов в оболочке атома обусловлено не только процессами взаимодействия в рамках кулоновских сил, но и процессами внутри ядра, протекающими, например, таким образом, как это описывается в оболочечной модели ядра [6], которая в настоящее время является основой современных представлений и дальнейших исследований структуры атомного ядра [7]. Эти процессы определяют непрерывную транспортировку энергии от ядра к электронам, в результате чего электроны, помимо окружного движения по разрешённым орбитальям, приобретают радиальные возможные перемещения в пределах своих зон обитания в зависимости от номера своей стационарной орбитали [8].

Поэтому пребывание отдельного электрона в каждый момент времени можно оценить только с определённой долей вероятности, что и подтверждается уравнением Шредингера.

В рамках предлагаемой модели для решения поставленной задачи воспользуемся условием равновесия сил, действующих на электрон в радиальном направлении, которое запишется в виде

$$\vec{F}_{\text{кл}} - \vec{F}_{\text{цс}} + \vec{F}_{\text{зат}} + \vec{F}_{\text{вз}} = 0, \quad (1)$$

где $F_{\text{кл}}$ – кулоновская сила притяжения электрона к ядру атома; $F_{\text{цс}}$ – центробежная сила; $F_{\text{зат}}$ – сила сопротивления, затухающая сила; $F_{\text{вз}}$ – возвращающая сила, сила упругой деформации.

В дальнейшем знаки векторной величины у сил будут сняты ввиду параллельности рассматриваемых векторов.

При этом

$$F_{\text{кл}} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Z \cdot e^2}{r^2},$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; Z – количество протонов (электронов); e – заряд протона (электрона); r – текущий радиус орбиты, т. е. расстояние от центра атома до соответствующего электрона;

$$F_{\text{цс}} = \frac{m \cdot v^2}{r},$$

где m – масса электрона; v – окружная скорость электрона по орбите;

$$F_{\text{зат}} = -b \cdot v_r,$$

где b – коэффициент затухания; v_r – радиальная скорость электрона между разрешёнными орбитами;

$$F_{\text{вз}} = -k \cdot r,$$

где k – коэффициент жёсткости, коэффициент упругой деформации внутриатомной среды.

Таким образом, с учётом зависимостей для сил $F_{\text{кл}}$, $F_{\text{цс}}$, $F_{\text{зат}}$, $F_{\text{вз}}$ соотношение (1) можно записать в виде

$$\left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Z \cdot e^2}{r^2} - \frac{m \cdot v^2}{r} \right) + (b \cdot v_r + k \cdot r) = 0. \quad (2)$$

Следует учесть, что $v_r = 0$ при $r = r_n$, где r_n – радиус разрешённой орбиты, n – номер разрешённой орбиты. Вне разрешённых орбит $r \neq r_n$, $v_r \neq 0$.

При $r = r_n$ $F_{\text{зат}} = 0$, $F_{\text{вз}} = 0$ и уравнение (2) приобретает известный, классический вид для разрешённых орбит:

$$\left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Z \cdot e^2}{r_n^2} - \frac{m \cdot v^2}{r_n} \right) = 0.$$



Будем полагать, что при $r \neq r_n$ зависимость (1) может быть представлена в виде двух соотношений:

$$\begin{aligned} F_a &= m \cdot a = (F_{кл} - F_{цс}), \\ F_a &= m \cdot a = -(b \cdot v_r + k \cdot r), \end{aligned} \quad (3)$$

где a – ускорение электрона в радиальном направлении.

Рассмотрим зависимость (3). Перенесём все члены в левую часть этого уравнения и сделаем замену:

$$v_r = \frac{dr}{dt} \quad \text{и} \quad a = \frac{d^2 r}{dt^2},$$

где t – текущее время.

Подставим значения для v_r и a в формулу (3), получим линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$m \cdot \frac{d^2 r}{dt^2} + b \cdot \frac{dr}{dt} + k \cdot r = 0. \quad (4)$$

Это уравнение представляет собой уравнение затухающих гармонических колебаний, и его решение широко представлено в справочной литературе [9].

Будем рассматривать случай колебания с критическим затуханием (демпфированием), соответствующий условию

$$b^2 = 4 \cdot m \cdot k. \quad (5)$$

В этом случае система приходит в равновесие в самое короткое время.

Решение уравнения (4) представляется в виде

$$(r - r_{nk}) = (c_1 + c_2 \cdot t) \cdot e^{-(\frac{k}{m})^{0,5} \cdot t}. \quad (6)$$

Граничные условия:

$$\text{при } t = 0 \quad c_1 = A,$$

где $A = (r_{ni} - r_{nk})$ – начальное смещение (возмущение) электрона, т. е. расстояние от орбиты с радиусом r_{nk} до орбиты с радиусом r_{ni} , здесь i – индекс верхней орбиты; k – индекс нижней орбиты;

$$\text{при } t = 0 \quad v_r = \frac{dr}{dt} = 0,$$

т. е.

$$\frac{dr}{dt} = c_2 \cdot e^{-(\frac{k}{m})^{0,5} \cdot t} - (c_1 + c_2 \cdot t) \cdot (\frac{k}{m})^{0,5} \cdot e^{-(\frac{k}{m})^{0,5} \cdot t} = 0.$$

Это условие устанавливает связь между коэффициентами c_1 и c_2 , получаем

$$c_2 = c_1 \cdot (\frac{k}{m})^{0,5}.$$

С учётом граничных условий соотношение (6) можно записать в форме

$$(r - r_{nk}) = A \cdot [1 + (\frac{k}{m})^{0,5} \cdot t] \cdot e^{-(\frac{k}{m})^{0,5} \cdot t}. \quad (7)$$

Второе условие предполагает, что электрон на радиусах $r = r_n$ имеет скорость $v_r = 0$, т. е. электрон переходит с одной орбиты на другую по касательной к орбитам и в пределах одного оборота в самое короткое время, что соответствует условию (5).

В формуле (7) промежуток времени $t_1 = \frac{2 \cdot m}{b} = (\frac{k}{m})^{0,5}$, за который амплитуда колебаний уменьшается в e раз (здесь e – число, основание натуральных логарифмов, $e = 2,7183$), называется средним временем жизни, или временем релаксации колебания. Определим его, для чего формулу (7) запишем в виде

$$\frac{A}{e} = A \cdot [1 + (\frac{k}{m})^{0,5} \cdot T] \cdot e^{-(\frac{k}{m})^{0,5} \cdot T},$$

где T – период времени, в течение которого электрон переходит с одной орбиты на другую (с r_{n_k} на r_{n_i}).

Обозначим через $x = (\frac{k}{m})^{0,5} \cdot T$, тогда последнюю зависимость можно записать в форме

$$e^{x-1} = (1+x).$$

Его решение даёт для определения T зависимость

$$T \approx 2,15 \cdot (\frac{m}{k})^{0,5}. \quad (8)$$

Среднее время релаксации

$$t_1 = \frac{T}{2,15}.$$

Запишем уравнение (3) в форме

$$F_a = - [2 \cdot (m \cdot k)^{0,5} \cdot v_r + k \cdot r] = - [2 \cdot (m \cdot k)^{0,5} \cdot \frac{r}{T} + k \cdot r]. \quad (9)$$

Определим коэффициент упругой деформации среды (жёсткость) k , а через него и коэффициент затухания b . Для этого приближённо примем, что

$$v_r \approx \frac{r}{T}.$$

Подставим эту формулу в соотношение (9) и введём обозначение

$$\left(\frac{b}{T} + k\right) = k_1.$$

В этом случае соотношение (9) примет вид

$$F_a = - \left(\frac{b}{T} + k\right) \cdot r = - k_1 \cdot r.$$

Воспользуемся условием равенства затраченной энергии E и выполненной работы W при перемещении электрона с одной орбиты на другую:

$$E = W.$$

Разность энергии между разрешёнными орбитами с номером верхней орбиты r_{n_i} и нижней r_{n_k} определится соотношением [10]

$$E = (E_{n_i} - E_{n_k}) = \left[\frac{Z^2 \cdot e^4 \cdot m}{8\varepsilon_0^2 \cdot h^2} \cdot \left(\frac{1}{n_k^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \right]. \quad (10)$$

Эта энергия расходуется на совершение работы W при переходе электрона с орбиты r_{n_k} на орбиту r_{n_i} под действием сил, определённых соотношением

$$W = - \int_{r_{n_k}}^{r_{n_i}} F_a \cdot dr = \int_{r_{n_k}}^{r_{n_i}} k_1 \cdot r \cdot dr,$$

или

$$\int_{r_{n_k}}^{r_{n_i}} F_a \cdot dr = \frac{k_1}{2} \cdot (r_{n_i}^2 - r_{n_k}^2). \quad (11)$$

Приравняем между собой соотношения (10) и (11), получим

$$\left[\frac{Z^2 \cdot e^4 \cdot m}{8\varepsilon_0^2 \cdot h^2} \cdot \left(\frac{1}{n_k^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \right] \cdot \frac{h \cdot c}{h \cdot c} = \frac{k_1}{2} \cdot (r_{n_i}^2 - r_{n_k}^2). \quad (12)$$

Воспользуемся зависимостью, определяющей радиусы разрешённых орбит:

$$r_n = \frac{n^2 \cdot h^2 \cdot \varepsilon_0}{\pi \cdot m \cdot Z \cdot e^2}.$$

Подставим её в формулу (12), получим

$$\left[\frac{Z^2 \cdot e^4 \cdot m}{8\varepsilon_0^2 \cdot h^2} \cdot \left(\frac{1}{n_k^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \right] = \frac{k_1}{2} \cdot \left(\frac{h^2 \cdot \varepsilon_0}{\pi \cdot m \cdot Z \cdot e^2} \right)^2 \cdot (n_i^4 - n_k^4).$$

Определим из полученной зависимости значение коэффициента k_1 :

$$k_1 = \frac{\pi^2 \cdot Z^4 \cdot e^8 \cdot m^3}{4 \cdot \varepsilon_0^4 \cdot h^6} \cdot \frac{1}{n_i^2 \cdot n_k^2 \cdot (n_i^2 + n_k^2)}. \quad (13)$$

Введём значение числа Ридберга, которое для $Z = 1$ определяется значением

$$R = \frac{e^4 \cdot m}{8\varepsilon_0^2 \cdot h^3 \cdot c},$$

где c – скорость света.

Квадрат числа Ридберга запишется в форме

$$R^2 = \frac{e^8 \cdot m^2}{64 \cdot \varepsilon_0^4 \cdot h^6 \cdot c^2}.$$

С учётом числа Ридберга зависимость (13) можно привести к виду

$$k_1 = 16 \cdot \pi^2 Z^4 \cdot R^2 \cdot (m \cdot c^2) \cdot \frac{1}{n_i^2 \cdot n_k^2 \cdot (n_i^2 + n_k^2)}. \quad (14)$$

Для электрона число Ридберга определяется величиной

$$R = 1,09741 \cdot 10^7 \left(\frac{1}{\text{м}} \right).$$

Значение $m \cdot c^2 = E_э$, здесь $E_э$ – энергия электрона, определяется величиной

$$E_э = (m \cdot c^2) = 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 82,0 \cdot 10^{-15} \text{ (Дж)}.$$

Подставим значения для числа R и энергии электрона $E_э$ в формулу (14), получим

$$k_1 = 16 \cdot 3,141^2 \cdot Z^4 \cdot (1,09741 \cdot 10^7)^2 \cdot (9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16}) \cdot B,$$

где

$$B = \frac{1}{n_i^2 \cdot n_k^2 \cdot (n_i^2 + n_k^2)},$$

или

$$k_1 = 1558,5 \cdot Z^4 \cdot B = 1,56 \cdot 10^3 \cdot \frac{Z^4}{n_i^2 \cdot n_k^2 \cdot (n_i^2 + n_k^2)}. \quad (15)$$

Выразим величину k_1 через значение k , для чего воспользуемся соотношением

$$\left(\frac{b}{T} + k\right) = k_1.$$

Подставим сюда значение для T из формулы (8) и значение для b из формулы (5), получим

$$\frac{b}{T} = 0,9302k \quad \text{и} \quad k_1 = (0,9302k + k) \approx 2 \cdot k.$$

С учётом полученных соотношений зависимость (15) даёт формулу для определения коэффициента k в форме

$$k \approx 783 \cdot \frac{Z^4}{n_i^2 \cdot n_k^2 \cdot (n_i^2 + n_k^2)}, \quad \text{или} \quad k \approx 783 \cdot Z^4 \cdot B.$$

Соответственно,

$$b = \frac{60,2 \cdot 10^{-15} \cdot Z^2}{n_i \cdot n_k \cdot (n_i^2 + n_k^2)^{0,5}}, \quad \text{или} \quad b = 6 \cdot 10^{-14} \cdot Z^2 \cdot B^{0,5},$$

$$T = 2,15 \cdot 10^{-15} \cdot \frac{n_i \cdot n_k \cdot (n_i^2 + n_k^2)^{0,5}}{28 \cdot Z^2}, \quad \text{или} \quad T = 0,0767 \cdot 10^{-15} \cdot \frac{1}{Z^2 \cdot B^{0,5}}.$$

В качестве примера рассмотрим атом водорода ($Z = 1$).

При $n_k = 1$ и $n_i = 2$ будем иметь

$$k \approx 783 \cdot Z^4 \cdot B \approx 783 \cdot \frac{Z^4}{n_i^2 \cdot n_k^2 \cdot (n_i^2 + n_k^2)} = \frac{783 \cdot 1}{1 \cdot 4 \cdot (1 + 4)} = 39,15 \left(\frac{\text{Н}}{\text{М}}\right);$$

$$b = 6 \cdot 10^{-14} \cdot Z^2 \cdot B^{0,5} = 6 \cdot 10^{-14} \cdot \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 5^{0,5}} = 1,34 \cdot 10^{-14} \left(\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{М}}\right);$$

$$T = 0,0767 \cdot 10^{-15} \cdot \frac{1}{Z^2 \cdot B^{0,5}} = 0,0767 \cdot 10^{-15} \cdot \frac{1 \cdot 2 \cdot 5^{0,5}}{1} = 0,34 \cdot 10^{-15} \text{ (с)}.$$

При $n_k = 4$ и $n_i = 7$ будем иметь

$$k \approx 783 \cdot \frac{1}{36 \cdot 49 \cdot (36 + 49)} = 0,0052 \left(\frac{\text{Н}}{\text{М}}\right);$$

$$b = 6 \cdot 10^{-14} \cdot 1 \cdot \frac{1}{6 \cdot 7 \cdot (36 + 49)^{0,5}} = 0,0025 \cdot 10^{-14} \left(\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{М}}\right);$$

$$T = 0,0767 \cdot 10^{-15} \cdot \frac{6 \cdot 7 \cdot (36 + 49)^{0,5}}{1} = 29,7 \cdot 10^{-15} \approx 0,3 \cdot 10^{-13} \text{ (с)}.$$

Таким образом, анализ полученных зависимостей для коэффициентов деформации среды k , затухания колебаний b и периода времени T – перехода электрона с одной стационарной орбиты на другую стационарную орбиту, показывает, что с ростом числа протонов Z коэффициенты k и b достаточно резко возрастают, а период времени T существенно падает. Чем дальше располагаются электроны от ядра, т. е. чем больше радиусы стационарных орбит r_n , тем заметнее снижаются коэффициенты k и b , а период времени T растёт.

Выводы

1. Предложена модель атома, предполагающая, что внутриатомное пространство заполнено материей, обладающей деформационной упругостью и сопротивлением движению электрона.

2. Сделано предположение, что пространственные колебания ядра атома порождают волны излучения, которые энергетически взаимодействуют с электронами, переводя их на более высокие орбиты.



3. Предложена математическая модель, в которой, помимо кулоновских и центроостремительных сил, учтены силы сопротивления и упругой деформации среды.

4. Получены зависимости для определения коэффициентов упругой деформации среды и затухания колебаний, а также времени перехода электрона с одной орбиты на другую.

5. Отмечается, что пребывание отдельного электрона в каждый момент времени можно оценить только с определённой долей вероятности, что и подтверждается уравнением Шредингера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Милантьев, В. П. История возникновения квантовой механики и развитие представлений об атоме / В. П. Милантьев. – М.: Изд-во ЛКИ, 2017. – 246 с.
2. Физическая энциклопедия. В 5 т. Т. 1 / гл. ред. А. М. Прохоров. – М.: Советская энциклопедия, 1988. – 704 с.
3. Бадамшин, И. Х. От четырёх к одному. Силы внутриатомного взаимодействия и прочность материалов / И. Х. Бадамшин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский Дом «Академия Естествознания», 2016. – 134 с.
4. Скребцов, А. М. Ядерные и периферические свойства атомов системы элементов Д. И. Менделеева и их совместное влияние на химические и физические свойства вещества / А. М. Скребцов // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2011. – Вып. 22. – С. 21-26.
5. Виноградова, М. Г. Небесный эфир в космофизических процессах / М. Г. Виноградова // In Situ. – 2016. – № 3. – С. 5-20.
6. Теория оболочечного строения ядра // Википедия – свободная энциклопедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Теория_оболочечного_строения_ядра (дата обращения: 21.03.2025). – Текст: электронный.
7. Оболочечная модель ядра // Большая российская энциклопедия. – URL: <https://bigenc.ru/c/obolochechnaia-model-iadra-eeddea> (дата обращения: 21.03.2025). – Текст: электронный.
8. Валуев, Н. П. Проблемы теории атома водорода и фотонное взаимодействие электрона и протона / Н. П. Валуев // Проблемы современной науки и образования. – 2014. – № 3 (21). – С. 26-31.
9. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн; пер. с англ. – М.: Изд-во «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1968. – 720 с.
10. Джанколи, Д. Физика. В 2 т. Т. 2 / Д. Джанколи; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 667 с.

Content

COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

K. A. Avdonin

ANALYSIS OF THE RESULTS OF MATHEMATICAL MODELING OF POLISHING
DIAMOND-LIKE PVD COATING PROCESS BY SCRUBBERING4

A. V. Zabrodin, O. I. Khonina

AN ALGORITHMIC SOLUTION FOR AUTOMATED
BOTTLENECK DIAGNOSTICS IN STORAGE SYSTEMS
BASED ON HEAT MAP DATA 11

P. A. Sechenov

DEVELOPMENT OF A PROGRAM FOR CALCULATION OF THERMODYNAMIC
PARAMETERS OF ONE-COMPONENT SYSTEMS T-UNOCALPH 17

D. O. Frolov, I. K. Andrianov

METHOD OF PREDICTING THE THERMAL STATE
OF A GAS FLOW IN A CURVILINEAR CHANNEL BASED
ON NEURAL NETWORK MODELS 24

K. R. Nigmatullin, A. V. Zabrodin

RESEARCH OF ROBOTS AND CHATBOTS AS A SOLUTION
TO BUSINESS PROCESS AUTOMATION 28

Ya. Yu. Grigoriev, I. N. Alkhimenko, A. L. Grigorieva

PRE-PROCESSING OF DATA FOR THE PROBLEM
OF FORECASTING THE DYNAMICS
OF CHANGE IN THE AREAS OF STUDY 35

A. N. Petrova, D. O. Frolov

HYBRID INFORMATION SEARCH METHODS USING
PROBABILISTIC MODEL AND OPEN UNIVERSAL EMBEDDINGS 41

MACHINERY

P. V. Bakhmatov, A. V. Frolov, O. N. Kleshnina

DETERMINATION OF CONDITIONS FOR SINGLE-PASS
ARC WELDING OF TITANIUM THIN-WALLED
PARTS THAT PROVIDE HIGH MECHANICAL
PROPERTIES OF WELDED JOINTS 46

O. N. Kleshnina, N. O. Pletnev, E. A. Kochnev

IMPORT SUBSTITUTION OF TITANIUM
IMPELLER BLADES 55

V. V. Grigorev, D. G. Popravko, O. N. Kleshnina

THE EFFECT OF HEAT TREATMENT WITH HIGH-FREQUENCY
CURRENTS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES
OF WELDED JOINTS OF TITANIUM ALLOY
VT20 MADE BY ELECTRON BEAM WELDING 61

P. A. Sablin, K. D. Kosachev

OPTIMIZATION OF APPLYING EXPERIMENTAL
RESEARCH METHODS OF THE CUTTING PROCESS BASED
ON THE ANALYSIS OF LITERARY SOURCES 74

MATERIALS SCIENCE AND CHEMICAL TECHNOLOGY

P. V. Bakhmatov, E. A. Startsev

INVESTIGATION OF SINTERING OF PRESSED BILLETS
FROM METALLURGICAL SLAG IN AN AUTOVACUUM
FORMED BY A GETTER MEDIUM 79

MATHEMATICS AND MECHANICS

G. A. Kolykhalov, E. G. Kravchenko

LIMITING COSMOLOGICAL PARAMETERS
OF THE UNIVERSE 85

G. A. Kolykhalov, E. G. Kravchenko

ATOMIC MODEL AND SPONTANEOUS
ELECTRON EMISSION MECHANISM 97

Научное издание

Учёные записки КНАГТУ
2025 № V (85)
Науки о природе
и технике

Выпускающий редактор
Е. П. Иванкова

Подписано в печать 26.09.2025
Дата выхода в свет 30.09.2025

Формат А4.
Бумага офисная 80 г/м².
Усл. печ. л. 11,90.
Уч.-изд. л. 11,74.
Тираж 200. Заказ 31333

Отпечатано:
в типографии КНАГУ
681013,
г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, д. 27;
в типографии «Агора»
681024,
г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, д. 39.

