

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ
ЦВЕТНАЯ
МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 29, № 3, 2023

Научно-технический журнал
Основан в 1958 г.
Выходит 6 раз в год

IZVESTIYA
NON-FERROUS
METALLURGY

Vol. 29, No. 3, 2023

Scientific and Technical Journal
Founded in 1958
6 Issues per year

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ЦВЕТНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

ISSN 0021-3438 (Print)

ISSN 2412-8783 (Online)

Том 29, № 3 2023

Научно-технический журнал

Основан в 1958 г.

Выходит 6 раз в год

<http://cvmet.misis.ru>

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации результатов диссертаций на соискание ученых степеней

Журнал включен в базы данных: Russian Science Citation Index (RSCI), Chemical Abstracts (Online), INIS, OCLC ArticleFirst, Ulrich's Periodicals Directory, РИНЦ, БД/РЖ ВИНТИ

Учредитель



ФГАОУ ВО Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Адрес: 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1

<http://www.misis.ru>

Главный редактор

Евгений Александрович Левашов

д.т.н., академик РАЕН, профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва

Заместитель главного редактора

Владислава Анатольевна Игнаткина

д.т.н., профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва

Редакционная коллегия

Е.В. Агеев — д.т.н., ЮЗГУ, г. Курск
М.В. Ананьев — д.х.н., АО «Гиредмет», г. Москва
Н.А. Белов — д.т.н., проф., НИТУ МИСИС, г. Москва
Е.В. Богатырева — д.т.н., НИТУ МИСИС, г. Москва
Г.М. Вольдман — д.х.н., проф., РТУ (МИТХТ), г. Москва
Ф.В. Гречников — д.т.н., акад. РАН, проф., СНИУ, г. Самара
Д.В. Гундеров — д.ф.-м.н., ИФМК УНЦ РАН, г. Уфа
В.Б. Деев — д.т.н., проф., НИТУ МИСИС, г. Москва
В.М. Денисов — д.х.н., проф., СФУ, г. Красноярск
Д.В. Дробот — д.х.н., проф., РТУ (МИТХТ), г. Москва
Ю.П. Зайков — д.х.н., проф., ИВТЭ УрО РАН, г. Екатеринбург
Р.Х. Залавутдинов — к.ф.-м.н., ИФХЭ РАН, г. Москва
С.В. Мамяченков — д.т.н., проф., УрФУ, г. Екатеринбург
З.А. Мансуров — д.х.н., проф., Институт проблем горения, г. Алматы, Казахстан
Н.В. Немчинова — д.т.н., проф., ИРНТУ, г. Иркутск
К.В. Никитин — д.т.н., проф., СамГТУ, г. Самара
П.В. Поляков — д.х.н., проф., СФУ, г. Красноярск
Е.С. Прусов — к.т.н., доцент, ВлГУ, г. Владимир
В.Н. Рычков — д.х.н., проф., УрФУ, г. Екатеринбург
Г.А. Салищев — д.т.н., проф., НИУ «БелГУ», г. Белгород
В.М. Сизяков — д.т.н., проф., СПГУ, г. Санкт-Петербург

Б.Б. Страумал — д.ф.-м.н., проф., ИФТТ РАН, г. Черноголовка
О.Ю. Ткачева — д.х.н., ИВТЭ УрО РАН, г. Екатеринбург
Б.Б. Хина — д.ф.-м.н., доц., ФТИ НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь
Д.В. Штанский — д.ф.-м.н., проф., НИТУ МИСИС, г. Москва
Abhilash — Dr., Ph.D., CSIR — National Metallurgical Laboratory, Jamshedpur, India
D.V. Louzguine — Prof., Dr., Tohoku University, Japan
H.A. Oye — Prof., Dr., Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway
D. Sadoway — Prof., Dr., Massachusetts Institute of Technology, Boston, USA
Stopic Srecko — Dr.-Ing. habil., RWTH Aachen University, Aachen, Germany
M. Verhaege — Prof., Dr., University of Gent, Belgium
G. Xanthopoulou — Dr., National Center for Scientific Research «Demokritos», Agia Paraskevi, Attica, Greece
A.L. Yerokhin — Prof., Dr., University of Manchester, United Kingdom
Yücel Onuralp — Prof., Dr., Istanbul Technical University, Maslak, Istanbul, Turkey
M. Zinigrad — Prof., Dr., Ariel University, Ariel, Israel
A.I. Zouboulis — Prof., Dr., Aristotle University of Thessaloniki, Greece

Редакция журнала

Адрес: 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1,
НИТУ МИСИС

Тел.: +7 (495) 638-45-35

E-mail: izv.vuz@misis.ru

Свидетельство о регистрации № 015842 от 13.03.1997 г.
Перерегистрация ПИ № ФС77-79229 от 25.09.2020 г.

Подписка: Агентство «Урал-пресс»

Ведущий редактор — А.А. Кудинова

Выпускающий редактор — О.В. Соснина

Дизайн и верстка — Е.А. Легкая

Подписано в печать 14.06.2023. Формат 60×90 1/8.
Бум. офсетная № 1. Печать цифровая. Усл. печ. л. 11
Заказ 17588. Цена свободная

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСИС
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1. Тел./факс: +7 (499) 236-76-17



© НИТУ МИСИС, Москва, 2023

© «Известия вузов. Цветная металлургия», 2023



Статьи доступны под лицензией Creative Commons
Attribution Non-Commercial No Derivatives

IZVESTIYA

NON-FERROUS METALLURGY

ISSN 0021-3438 (Print)

ISSN 2412-8783 (Online)

Vol. 29, No. 3
2023

Scientific and Technical Journal

Founded in 1958

6 Issues per year

<http://cvmet.misis.ru>

Journal is included into the List of the peer-reviewed scientific publications recommended by the Highest Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for publishing the results of doctoral and candidate dissertations

Abstracting/Indexing: Russian Science Citation Index (RSCI), Chemical Abstracts (Online), INIS, OCLC ArticleFirst, Ulrich's Periodicals Directory, VINITI Database (Abstract Journal)

Founder



National University of Science and Technology "MISIS"

Address: 4 build. 1 Leninskiy Pros., Moscow 119049, Russia

<http://www.misis.ru>

Editor-in-Chief

Evgeny A. Levashov

Prof., Dr. Sci. (Eng.), Acad. of the RANS, NUST MISIS, Moscow, Russia

Deputy Editor

Vladislava A. Ignatkina

Prof., Dr. Sci., NUST MISIS, Moscow, Russia

Editorial Board

Abhilash – Dr., Ph.D., CSIR – National Metallurgical Laboratory, Jamshedpur, India
E.V. Ageev – Prof., Dr. Sci. (Eng.), SouthWest State University, Kursk, Russia
M.V. Ananyev – Prof., Dr. Sci. (Chem.), Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (JSC "Giredmet"), Moscow, Russia
N.A. Belov – Prof., Dr. Sci. (Eng.), NUST MISIS, Moscow, Russia
E.V. Bogatyreva – Prof., Dr. Sci. (Eng.), NUST MISIS, Moscow, Russia
V.B. Deev – Prof., Dr. Sci. (Eng.), NUST MISIS, Moscow, Russia
V.M. Denisov – Prof., Dr. Sci. (Chem.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
D.V. Drobot – Prof., Dr. Sci. (Chem.), Russian Technological University (MITHT), Moscow, Russia
F.V. Grechnikov – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Acad. of RAS, Samara National Research University n.a. S.P. Korolev (Samara University), Samara, Russia
D.V. Gunderov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Institute of Molecule and Crystal Physics Ufa Research Center of the RAS, Ufa, Russia
B.B. Khina – Dr. Sci. (Phys.-Math.), The Physical-Technical Institute of NAS of Belarus, Minsk, Belarus
D.V. Louzguine – Prof., Dr. Sci., Tohoku University, Japan
S.V. Mamyachenkov – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia
Z.A. Mansurov – Dr. Sci. (Chem.), Prof., Institute of Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan
N.V. Nemchinova – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
K.V. Nikitin – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Samara State Technical University, Samara, Russia
H.A. Oye – Prof., Dr., Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway
P.V. Polyakov – Prof., Dr. Sci. (Chem.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

E.S. Prusov – Cand. Sci. (Eng.), Vladimir State University, Vladimir, Russia
V.N. Richkov – Prof., Dr. Sci. (Chem.), Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia
D. Sadoway – Prof., Dr., Massachusetts Institute of Technology, Boston, USA
G.A. Salishchev – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Belgorod National Research University, Belgorod, Russia
D.V. Shtansky – Prof., Dr. Sci. (Phys.-Math.), NUST MISIS, Moscow, Russia
V.M. Sizyakov – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia
Stopic Srecko – Dr.-Ing. habil., RWTH Aachen University, Aachen, Germany
B.B. Straumal – Prof., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Institute of Solid State Physics of the RAS, Chernogolovka, Moscow region
O.Yu. Tkacheva – Dr. Sci. (Chem.), Institute of High Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia
M. Verhaege – Prof., Dr., University of Gent, Belgium
G.M. Vol'dman – Prof., Dr. Sci. (Chem.), Russian Technological University (MITHT), Moscow, Russia
G. Xanthopoulou – Dr., National Center for Scientific Research "Demokritos", Agia Paraskevi, Attica, Greece
A.L. Yerokhin – Prof., Dr., University of Manchester, United Kingdom
Onuralp Yücel – Prof., Dr., Istanbul Technical University, Maslak, Istanbul, Turkey
Yu.P. Zaikov – Prof., Dr. Sci. (Chem.), Institute of High Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia
R.Kh. Zhalavutdinov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the RAS, Moscow, Russia
M. Zinigrad – Prof., Dr., Ariel University, Ariel, Israel
A.I. Zouboulis – Prof., Dr., Aristotle University of Thessaloniki, Greece

Editorial Staff

Address: NUST MISIS, 4 build. 1 Leninskiy Pros., Moscow 119049, Russia

Phone: +7 (495) 638-45-35

E-mail: izv.vuz@misis.ru

Certificate of registration No. 015842 (13.03.1997)

Re-registration PI No. ΦC77-79229 (25.09.2020)

Subscription: Ural-Press Agency

Leading Editor – A.A. Kudinova

Executive Editor – O.V. Sosnina

Layout Designer – E.A. Legkaya

Signed print 14.06.2023. Format 60×90 1/8.

Offset paper No. 1. Digital printing. Quires 11

Order 17588. Free price

Printed in the printing house of the MISIS Publish House

4 build. 1 Leninskiy Pros., Moscow 119049, Russia. Phone/fax: +7 (499) 236-76-17



© NUST MISIS, Moscow, 2023

© Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy, 2023



Articles are available under Creative Commons Attribution Non-Commercial No Derivatives

Металлургия цветных металлов

- 5 Нгуен Хю Хоанг, Бажин В.Ю.
Совершенствование системы контроля и управления параметрами электролитического рафинирования меди
- 17 Жук С.И., Минченко Л.М., Суздальцев А.В., Исаков А.В., Зайков Ю.П.
Электроосаждение кремния из расплавов $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ и $\text{KF-KCl-KI-K}_2\text{SiF}_6$

Металлургия редких и благородных металлов

- 27 Зелях Я.Д., Воинков Р.С., Тимофеев К.Л., Мальцев Г.И.
Получение концентрата родия из цементата золота

Литейное производство

- 38 Баженов В.Е., Колтыгин А.В., Никитина А.А., Белов В.Д., Лазарев Е.А.
Эффективность многопоточных вычислений в системах компьютерного моделирования литейных процессов
- 54 Жилин С.Г., Богданова Н.А., Комаров О.Н.
Исследование процессов формирования пористых выплавляемых моделей, применяемых для изготовления высокоточного литья

Обработка металлов давлением

- 67 Сидельников С.Б., Колосков С.С., Довженко Н.Н., Горбунов Ю.А., Ворошилов Д.С.
Применение моделирования при проектировании инструмента для прессования полых профилей из алюминиевых сплавов
- 79 Монахов А.Д., Гуляев М.М., Гладышева Н.Е., Коптельцева О.Ю., Автаев В.В., Яковлев Н.О., Гулина И.В.
Применение метода корреляции цифровых изображений для построения диаграмм деформирования в истинных координатах

Metallurgy of Nonferrous Metals

- 5 Nguyen Huy Hoang, Bazhin V.Yu.
Improvement of the control system and management of parameters of electrolytic refining of copper
- 17 Zhuk S.I., Minchenko L.M., Suzdaltsev A.V., Isakov A.V., Zaikov Yu.P.
Silicon electrodeposition from the $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ and $\text{KF-KCl-KI-K}_2\text{SiF}_6$ melts

Metallurgy of Rare and Precious Metals

- 27 Zelyakh Ya.D., Voinkov R.S., Timofeev K.L., Maltsev G.I.
Production of rhodium concentrate from gold cementate

Foundry

- 38 Bazhenov V.E., Koltigin A.V., Nikitina A.A., Belov V.D., Lazarev E.A.
The efficiency of multithreaded computing in casting simulation software
- 54 Zhilin S.G., Bogdanova N.A., Komarov O.N.
Investigation of the processes of formation of porous investment models used for the manufacture of high-precision castings

Pressure Treatment of Metals

- 67 Sidelnikov S.B., Koloskov S.S., Dovzhenko N.N., Gorbunov Yu.A., Voroshilov D.S.
Using simulation to design tool for pressing of hollow profiles from aluminum alloys
- 79 Monakhov A.D., Gulyaev M.M., Gladysheva N.E., Kopteltseva O.Yu., Avtaev V.V., Yakovlev N.O., Gulina I.V.
Using the method of correlation of digital images for plotting stress-strain curves in true coordinates

УДК 54.084

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-5-16>

Научная статья

Research article



Совершенствование системы контроля и управления параметрами электролитического рафинирования меди

Нгуен Хю Хоанг, В.Ю. Бажин

Санкт-Петербургский горный университет

199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2

✉ Владимир Юрьевич Бажин (bazhin-alfoil@mail.ru)

Аннотация: Использование современных автоматизированных систем управления в производстве катодной меди обеспечивает возможность удаленного доступа к ресурсам для контроля и регулирования параметрами электролитического процесса, что определяет показатели эффективности производства при снижении энергетических затрат. Важными параметрами в электролитическом рафинировании меди являются температура и состав электролита, скорость его циркуляции, уровень шлама, частота замыканий между электродами и плотность тока, которые напрямую влияют на количество и объем катодного осадка. Наличие коротких замыканий на ванне обуславливается ростом дендритов, что влечет за собой необходимость контролировать напряжение, состав и температуру электролита и периодически анализировать состав и накопление объема шламового осадка на дне электролизера. Интенсификация процесса электролиза происходит в основном за счет повышения плотности тока, снижения межэлектродного расстояния, улучшения качества электродов, совершенствования системы циркуляции электролита при дальнейшей механизации и автоматизации самого процесса и его вспомогательных операций, ведущих к повышению производительности. Целью данной работы являлось расширение функций автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) за счет внедрения датчиков контроля уровня шламового осадка для снижения безвозвратных потерь при наличии замыканий дендритного осадка на электроды в нижней донной части электролизера с использованием нового программного обеспечения. Рассмотрен способ контроля уровня шламового осадка для предотвращения коротких замыканий и разработана программа контроля при помощи датчиков уровня поплавкового типа. Данное мероприятие при внедрении позволит снизить расход электроэнергии на 15–20 %, что может быть полезным для внедрения в цехах электролитического производства меди на предприятии «Медеплавильный завод» (г. Лаокай, Социалистическая Республика Вьетнам).

Ключевые слова: катодная медь, шламовый осадок, электроды, замыкание, датчик, электролит, система контроля, электролитическое рафинирование.

Для цитирования: Нгуен Хю Хоанг, Бажин В.Ю. Совершенствование системы контроля и управления параметрами электролитического рафинирования меди. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(3):5–16. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-5-16>

Improvement of monitoring and control system for copper electrolytic refining parameters

Nguyen Huy Hoang, V.Yu. Bazhin

Saint Petersburg Mining University

2, 21st Line, St. Petersburg, 199106, Russia

✉ Vladimir Yu. Bazhin (bazhin-alfoil@mail.ru)

Abstract: The utilization of modern automated control systems in copper cathode production offers the opportunity for remote access to control and regulate the electrolytic process parameters. This, in turn, enhances production efficiency while reducing energy costs. The significant parameters in copper electrolytic refining encompass the temperature and composition of the electrolyte, the circulation rate

of the electrolyte, the level of sludge, and the frequency of short circuits occurring between the electrodes and the current density. These parameters directly impact the quantity and volume of cathode sludge. The occurrence of short circuits within the bath arises from the growth of dendrites, necessitating the monitoring of voltage, composition, and temperature of the electrolyte. Regular analysis of the electrolyte's composition and the accumulation of sludge volume at the bottom of the electrolyzer is also necessary. The intensification of the electrolysis process primarily involves increasing the current density, reducing the electrode spacing, enhancing the quality of electrodes, improving the electrolyte circulation system, and further mechanizing and automating the process and its auxiliary operations. These efforts contribute to increased productivity. The objective of this study is to expand the capabilities of automated process control systems by incorporating sludge level control sensors. This aims to mitigate irrecoverable losses resulting from dendritic sludge short circuits on the electrodes located in the lower section of the electrolyzer, utilizing new software. A sludge level control method to prevent short circuits has been investigated, and control software employing float-type level sensors has been developed. This measure is projected to decrease energy consumption by 15–20 % and can be effectively implemented in the production of electrolytic copper at the copper smelting plant in Lao Cai, Vietnam.

Key words: copper cathode, sludge sediment, electrodes, short circuit, sensor, electrolyte, control system, electrolytic refining.

For citation: Nguyen Huy Hoang, Bazhin V.Yu. Improvement of monitoring and control system for copper electrolytic refining parameters. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(3):5–16. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-5-16>

Введение

Повышение эффективности работы энергоемких металлургических производств является первостепенной задачей для дальнейшего развития устойчивой работы минерально-сырьевого комплекса. С другой стороны, излишнее увлечение новыми приемами цифровой трансформации может только усложнить поставленные задачи по энергетической эффективности крупнотоннажных производств [1; 2].

Анализ существующих систем контроля и управления, применяемых на предприятиях по производству катодной меди, указывает на недостаточность количества регулируемых параметров для устойчивой работы электролизеров [3–5]. Для более эффективного управления производственным процессом необходим ввод новых функциональных точек контроля с дополнительными датчиками. Это, в некоторой степени, относится и к действующим производствам по получению катодной меди, например к электролитическим производствам меди на предприятии «Медеплавильный завод» (г. Лаокай, Социалистическая Республика Вьетнам) [6; 7].

В рамках выполняемой работы необходимо решить задачи по расширению функциональных свойств автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) и внести соответствующие корректировки в блоки базы данных (БД) на основе полученных математических моделей для управления и оптимизации процессов, связанных с образованием шламового осадка в нижней части электролитической ячейки. В данном случае необходимо установить блок согласования показателей датчика температуры, контроллера уровня электролита и поплавкового регулятора с учетом их взаимного влияния для сопоставления

полученных данных со стандартными параметрами в целях выявления аномалий в ходе процесса. Такое решение направлено на настройку дополнительных устройств в рамках существующей параметризации для достижения оптимальных условий процесса. В частности, необходима функция раннего обнаружения короткого замыкания электродов из-за различного типа нарушений для своевременного предупреждения оператора об отклонении и для более быстрой обработки данных для последующего управляющего воздействия, направленного на разрушение и ликвидацию локальных мест срастания дендритов с учетом их объема и количества в нижней части ванны. Во время увеличения уровня осадка за счет попадания частиц шлама в межэлектродное расстояние происходит изменение концентрации электролита.

Таким образом, в данной работе необходимо решить вопросы расширения функций АСУ ТП за счет установки датчиков контроля уровня осадка для снижения безвозвратных потерь путем уменьшения количества замыканий дендритного осадка на электродах в нижней донной части электролизера, а также установки дополнительного датчика контроля состава электролита.

Регулируемые технологические параметры электролитического рафинирования меди

Электролитическое получение меди является физико-химическим процессом, протекающим при большом массиве регулируемых параметров, от которых зависит ход технологического процесса, и характеризуется существенным количеством скрытых показателей, влияющих на протекание

электрохимических процессов при существующих проблемах с адекватной идентификацией различных стадий процесса [8–10]. К основным входным параметрам этого процесса относят, в первую очередь, содержание в электролите ионов меди, концентрацию серной кислоты и их соответствие выходным параметрам, которые определяют производительность и выход по току [11–13]. Таким образом, эффективность электролитического рафинирования меди во многом зависит от состояния электролизеров (ванн) относительно шламообразования в верхней и нижней частях электродов. Если дендритные замыкания в верхней части ячейки можно увидеть и зарегистрировать через тепловизионную камеру, то отложения на электродах в нижней части ванны представляют собой своеобразный «черный ящик».

В ходе технологического процесса необходимы контроль и анализ во всем объеме электролитической ячейки текущих изменений следующих параметров (с учетом дополнительных условий контроля в стандартной АСУ ТП) [14–16]:

- 1) химический анализ содержания меди в электролите и серной кислоты;
- 2) текущая температура электролита;
- 3) скорость циркуляции электролита;
- 4) сила тока на серии;
- 5) плотность тока на электродах;
- 6) напряжение электролизной ячейки;
- 7) уровень шлама при контроле через поплавковый погружной датчик;
- 8) концентрация хлорид-иона в электролите;
- 9) давление и расход пара;
- 10) передача и транспортирование части рабочего электролита на слив;
- 11) смешивание электролита после нескольких периодов циркуляций через расходные и запасные баки;
- 12) непрерывное расчетное дозирование добавок серной кислоты и сульфата меди в через дозаторы;
- 13) разбавление и изменение концентрации электролита отработанной промывной водой и конденсатом при вводе в электролит серной кислоты;
- 14) катодная плотность тока;
- 15) загрузка и установка анодов через заданный период и время их растворения в результате электролиза.

Также необходим анализ взаимосвязи между всеми рабочими параметрами, который свидетельствует о необходимости уточнения и ввода дополнительных данных — таких, как содержание ионов меди, уровень электролита и шламового осадка.

Все системы контроля и управления производством должны учитывать входные технологические параметры, обеспечивающие высокое качество и чистоту выпускаемой продукции — катодной меди. При электролитическом рафинировании меди отсутствует наличие функциональных связей между количеством образующегося осадка на электродах и шлама на дне ванны с количеством и объемом дендритных нарастаний и замыканий на электродах, особенно после их разрушений, что приводит к изменению концентрации электролита в ванне. В известных работах [17–19] предлагается множество способов определения значений входных параметров для устойчивого управления процессом электролиза, но в основном с использованием текущих данных (БД) предприятий [20–22].

В ходе работы были получены математические модели для нескольких сценариев процесса на различных его стадиях во время образования осадка на дне электролизной ячейки.

1-й сценарий — образование налипания в нижней части электродов. Этот механизм связан с попаданием отдельных частиц осадка на нижнюю часть поверхности электродов при неконтролируемой высоте осадка при разрушении дендритного срастания в верхней части катода. «Взмучивание» электролита приводит к изменению его содержания, особенно в нижней части ванны.

2-й сценарий — подъем верхних слоев осадка к поверхности анодов и катодов с образованием срастаний между электродами. Причина — высокая турбулентность электролита и самого шламового осадка.

3-й сценарий — полное замыкание между электродами при касании шламового осадка их нижних частей. Причина заключается в том, что не контролируется высота слоя шламового осадка в электролизной ячейке и не учитывается амплитуда движения электролита и шлама.

Как правило, по статистическим данным, на предприятии по производству катодной меди электролитическим способом за 24 ч происходит до 15–20 случаев по различным сценариям, но наиболее часто наблюдается 1-й сценарий (до 10 случаев в сутки). На рис. 1, 2 представлены модели для всех трех сценариев

Параметрический анализ процесса электролиза помогает определить взаимосвязь между входными данными (БД) процесса электролиза (межэлектродное расстояние, сила тока, плотность тока, сопротивление электролита с учетом концентрации ионов меди) и их влиянием на такие выходные

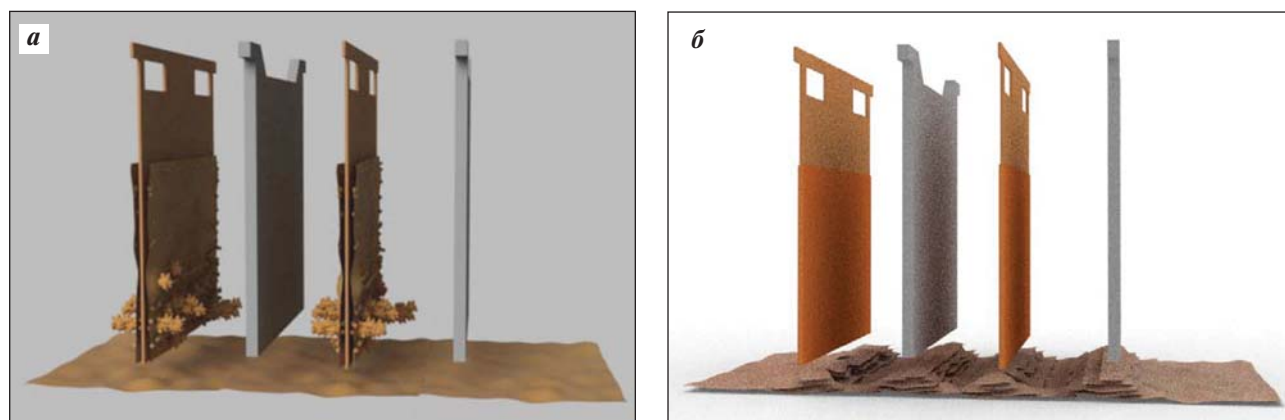


Рис. 1. Модель образования и изменения уровня шламового осадка при средней (а) и высокой (б) турбулентности электролита

Fig. 1. Model of sludge formation and level change at medium (а) and high (б) electrolyte turbulence



Рис. 2. Модель полного замыкания электродов при касании осадка нижней части электродов

Fig. 2. Model of complete short-circuiting of the electrodes when the sludge touches the lower part of the electrodes

показатели электролитического рафинирования, как выход по току и производительность [23; 24]. Но при этом необходимы учет и контроль дополнительных параметров процесса, например уровня шлама на дне ванны и показателя pH [25].

В этой связи при построении математической модели использовался параметрический анализ процесса электролитического рафинирования меди (процессы 1.1, 1.2 и 2 на рис. 3) [26–28] как вспомогательный прием для вычисления и анализа управляющих воздействий при возникающей производственной ситуации (по сценариям) в соответствии с полученной блок-схемой.

Для блок-схемы и расчетной математической модели процесса были приняты следующие показатели: входные параметры по составу элект-

ролита — содержание серной кислоты $C_{H_2SO_4} = 150$ г/л; концентрация сульфата меди $C_{CuSO_4} = 279,78$ г/л; содержание меди $C_{Cu} = 50$ г/л; при заданном составе электролита получены: выход по току $\eta_{Cu}^* = 96\%$ и производительность $Пр_{Cu}^* = 50$ т/сут; $d_{Пр}$, d_{Cu} — соответственно производительность процесса и выход по току для электролитических процессов 1.1 и 1.2, которые отличаются по значению; в данном случае управляющие воздействия — плотность тока (D) и скорость циркуляции (V).

Известна разработка математической модели процесса электролитического рафинирования меди [3], в рамках которой получены многопараметрические математические модели с использованием множественного регрессионного анализа [29–31]. Для корректировки АСУ ТП и контроля осадка с учетом текущего значения выхода по току можно применить уравнение (1), а для производительности — уравнение (2):

$$\begin{aligned} \eta_{Cu} = & 885,52052 + 0,01869V + 0,01048D^2 - \\ & - 5,79232D + 1,43 \cdot 10^{-4}(C_{H_2SO_4})^2 - \\ & - 0,01231C_{H_2SO_4} + 0,09 \cdot 10^{-5}(C_{Cu})^2 - 4,98 \cdot 10^{-3}C_{Cu} + \\ & + 3,5 \cdot 10^{-4}(C_{H_2SO_4})^2 - 0,07688C_{CuSO_4}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Пр_{Cu} = & -122,6664 + 0,0145V - 2,4 \cdot 10^{-3}D^2 + \\ & + 1,30096D + 3,6 \cdot 10^{-4}(C_{H_2SO_4})^2 - 0,09653C_{H_2SO_4} + \\ & + 4,4 \cdot 10^{-5}(C_{Cu})^2 - 2,7 \cdot 10^{-3}C_{Cu} + \\ & + 2,1 \cdot 10^{-4}(C_{CuSO_4})^2 - 0,0436C_{CuSO_4}. \end{aligned} \quad (2)$$

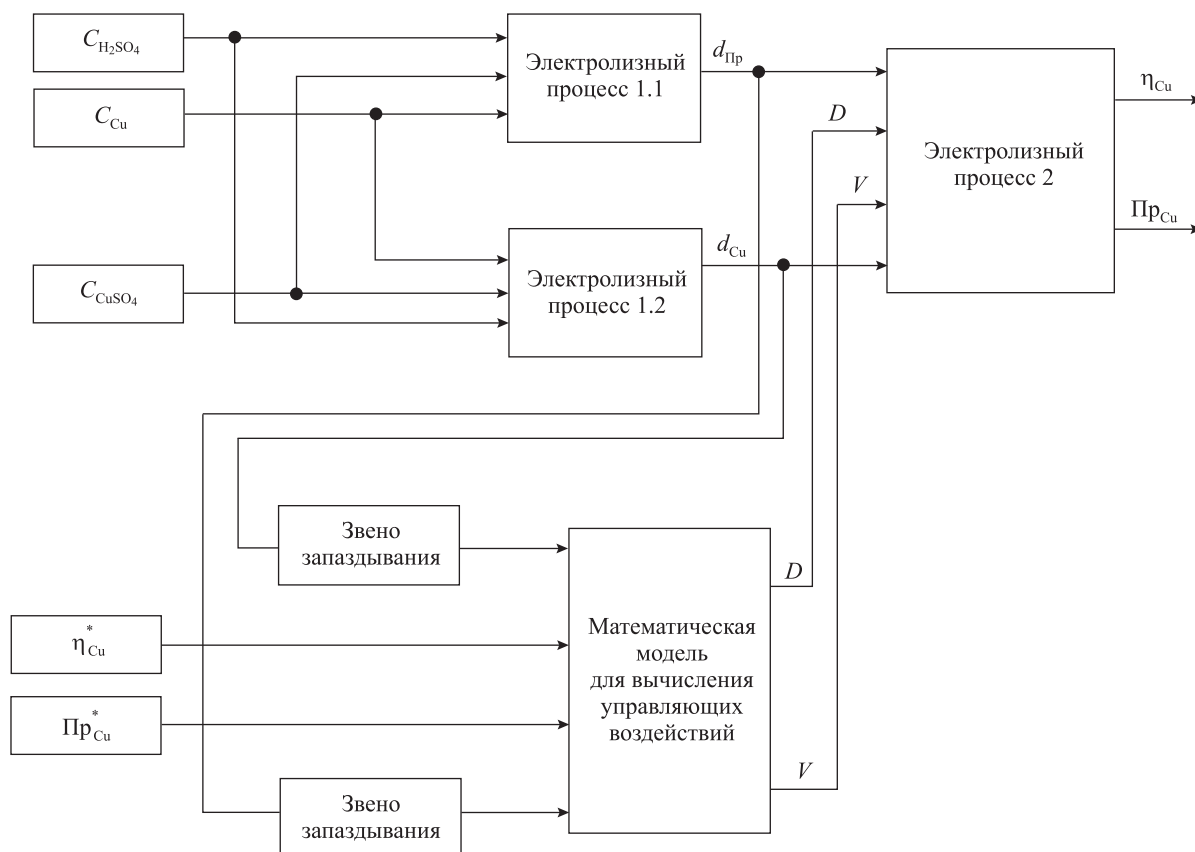


Рис. 3. Блок-схема математической модели параметрического анализа электролитического производства катодной меди

Fig. 3. Block diagram of the mathematical model for the parametric analysis of cathode copper electrolytic production

Тогда дополнительное параметрирование отражает истинные значения выхода по току и производительности с учетом обнаруженных отклонений при последующей корректировке технологического режима через управляющее воздействие (см. блок-схему на рис. 3). Блок-схема основана на математической модели процесса электролитического рафинирования и модели функциональных связей текущих значений управляющих величин (плотности тока D и скорости циркуляции V) путем сравнения значений производительности (Пр_{Cu}) и выхода по току (η_{Cu}) при согласовании с заданными параметрами процессов 1.1 и 1.2 с учетом коэффициента запаздывания. В отличие от существующей модели были внесены корректировки в соответствии с предполагаемыми тремя механизмами образования шламового осадка и дендритными срастаниями на электродах.

С помощью установленного режима контроля и управления при условиях (1) и (2) на основе выполненной математической модели процесса электро-

литического рафинирования меди и блок-схемы может быть получена зависимость плотности тока и сопротивления от межэлектродного расстояния (рис. 4). Ее данные указывают на то, что диапазон изменения плотности тока находится в рациональных пределах $D = 250\div 300 \text{ А/м}^2$, а межэлектродное расстояние изменяется в интервале $0,045\text{—}0,055 \text{ м}$.

При оценке влияния плотности тока выявлено, что номинальная производительность достигает оптимального значения, когда управляющее воздействие D находится в диапазоне $260\text{—}280 \text{ А/м}^2$ (рис. 5).

Основываясь на проведенном параметрическом анализе, можно обосновать ввод дополнительных входных параметров процесса электролиза.

Значение содержания ионов меди также является очень важным фактором. По мере роста концентрации Cu^{2+} увеличивается выход по току и снижается напряжение на ванне, когда уменьшается уровень осадков. Высокая концентрация меди позволяет повысить выход по току. Обычно

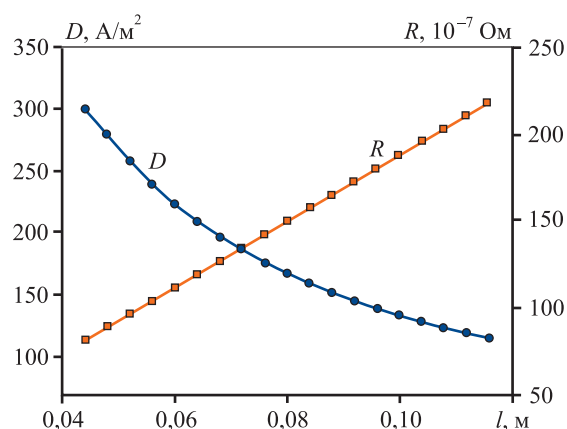


Рис. 4. Влияние межэлектродного расстояния на плотность тока и сопротивление

Fig. 4. Influence of inter-electrode distance on current density and resistance

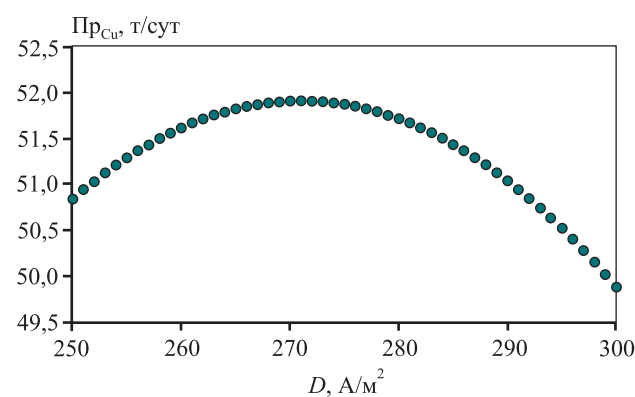


Рис. 5. Зависимость производительности процесса от плотности тока

Fig. 5. Dependence of the process productivity on the current density

концентрацию меди поддерживают, в пересчете на двухвалентный катион меди, на уровне 40–60 г/л.

Необходимо отметить, что содержание серной кислоты существенно сказывается на выходе по току и расходе электроэнергии. Как правило, ее уровень поддерживают в интервале $C_{H_2SO_4} = 100\div150$ г/л.

Рост температуры влияет на увеличение выхода по току, но при снижении напряжения на ванне повышаются значения электропроводности электролита. В диапазоне температур 20–70 °С наблюдается общая тенденция увеличения дисперсности, при этом физические свойства электролита ухудшаются и начинает растворяться катодный осадок. Поэтому температуру электролита поддерживают на уровне 50–60 °С, а его циркуляцию в ваннах проводят для поддержания в нем заданной

температуры, снижения расслоения электролита из-за различных плотностей растворов $CuSO_4$ и H_2SO_4 и его составляющих и стабилизации процесса перемешивания электролита для насыщения прикатодного слоя ионами меди [4]. Из полученных расчетных данных следует, что скорость циркуляции электролита необходимо выдерживать постоянной на уровне 20 л/мин.

Совершенствование системы контроля и управления процессом электролиза при вводе дополнительных параметров

При электролитическом рафинировании меди контролируется масса анодов и катодов, анодных остатков, катодного скрапа, исходных катодов, применяемых реагентов; вычисляется объем выводимого из циркуляции электролита и вводимых объемов серной кислоты; определяется уровень электролита в баковой аппаратуре и т.д. Наибольшее значение имеет контроль за составом и температурой электролита, а также процесс обнаружения коротких замыканий между анодами и катодами при расчетных значениях скорости циркуляции электролита и дополнительном контроле содержания электролита и уровня шлама на дне ванны.

Для контроля содержания меди и кислоты в электролите применяются малогабаритные анализаторы (типа МАК-1 и МАК-2). Для определения расхода пара, воды, электролита используют дифманометры с регистраторами, а температуру измеряют термометрами сопротивления. Применение датчиков температуры с дистанционным управлением позволило полностью автоматизировать регулирование температуры электролита [32; 33].

Для обнаружения и устранения коротких замыканий, приводящих к нарушениям нормального подвода тока к электроду и снижению выхода по току, используют различные методы. Находят применение гауссметры, термочувствительные краски, инфракрасные датчики. Представляет большой интерес для внедрения способ обнаружения коротких замыканий с помощью установленной на мостовом кране, обслуживающем электролизные ванны, камеры с датчиком инфракрасного излучения (тепловизора) [34–37]. С использованием современных методов трудозатраты на контроль за короткими замыканиями сокращаются до 30 % по сравнению с традиционными системами контроля. Выход по току повышается на 2 %.

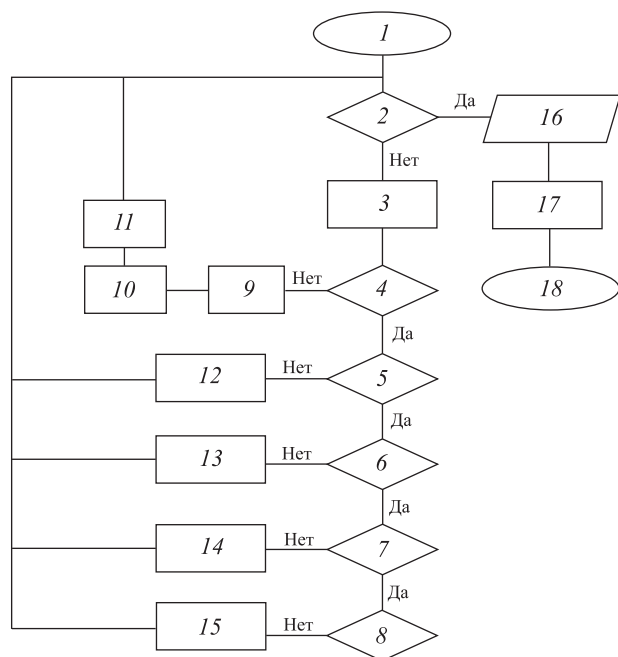


Рис. 6. Блок-схема алгоритма работы программы ЭВМ

Fig. 6. Block diagram of the software algorithm

На основании вышеперечисленных факторов создана программа для ЭВМ, позволяющая более эффективно контролировать технологические характеристики электролиза меди. Алгоритм работы программы показан на рис. 6.

На блок-схеме приняты следующие обозначения для передачи входных данных и управляющих воздействий:

1 — начало процесса (ввод параметров в базу данных);

2 — проверка длительности процесса (τ , мин) и окончательный тайминг (при достижении 48 ч процесс считается завершенным);

3 — сбор следующих текущих данных от датчиков:

- температура электролита (t , °C);
- напряжение (U , В);
- уровень шлама ($H_{\text{ш}}$, м);
- уровень электролита (H_3 , м);
- концентрация серной кислоты в электролите ($C_{\text{H}_2\text{SO}_4}$, кг/м³);

4 — проверка температуры электролита в допустимых пределах $t_3 < 85$ °C;

5 — проверка напряжения между электродами при необходимом значении $U = 0,314$ В; напряжение имеет функцию отклика, который на практике не регулируется;

6 — проверка уровня шлама в допустимых пре-

делах $H_{\text{ш}} < 0,4$ м (нет замыкания в нижней части электрода);

7 — проверка уровня электролита;

8 — проверка концентрации серной кислоты в электролите;

9 — начало сканирования тепловизором поверхности ячейки (в ванне);

10 — определение зон перегрева электролита (с короткими замыканиями); указать на экране номера катода и анода;

11 — устранить короткое замыкание и зафиксировать время (тайминг);

12 — направить шлам на слив в приемник;

13 — добавить электролит до заданного целевого уровня;

14 — добавить серной кислоты в электролит до целевого значения концентрации;

15 — вывод на экран отчета о процессе изменения параметров электролиза;

16 — завершение процесса корректировки параметров электролиза;

17 — стабилизация процесса и вывод на нормальный технологический режим;

18 — регулятор переточной системы для удаления шлама.

На рис. 7 представлена схема цифровой автоматизации электролитической ванны для рафинирования меди.

На рис. 8 показан скриншот разработанной программы контроля шламового осадка и дендритных срастаний.

В соответствии с изменениями, происходящими на электролизере, может варьироваться межэлектродное расстояние, а следовательно, и устав-ка по напряжению. Дополнительно, при обнаружении значительных отклонений, может быть изменена и амперная нагрузка.

В результате, в ходе изучения проблем устойчивой работы электролизных ячеек, была создана система контроля и управления основными параметрами процесса производства катодной меди. Программное обеспечение состоит из следующих продуктов:

- блок питания BMXCPS3500;
- процессорный модуль «Modicon M580 P58 2040»;
- модуль дискретного ввода BMXDDI 1602, число дискретных входов 16;
- модуль аналогового входа-выхода BMXAMM0600, число дискретных входов 8 в соответствии с действиями алгоритма;
- модуль дискретного выхода BMXDDO 1602, число аналоговых входов 16.

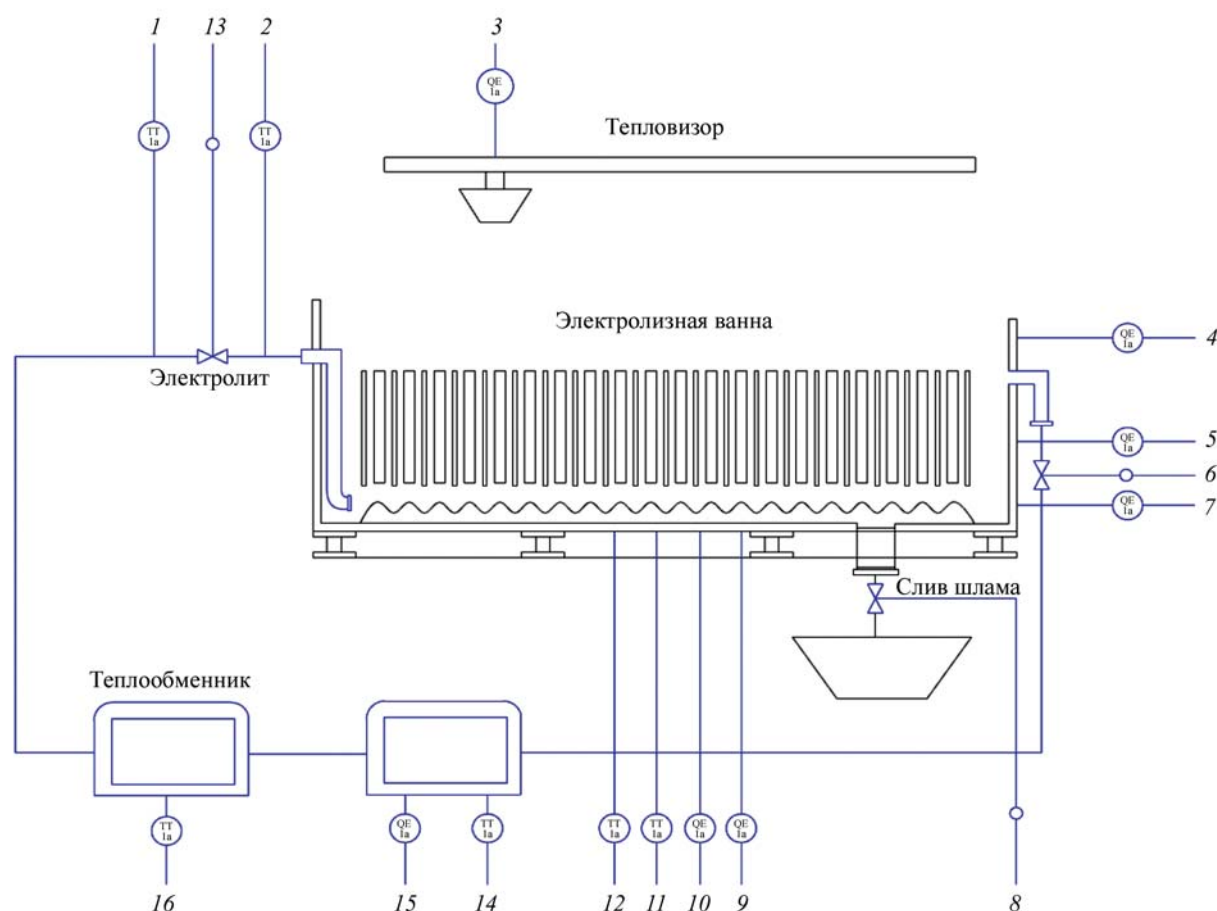


Рис. 7. Схема цифровой автоматизации электролитической ванны для рафинирования меди

Fig. 7. Diagram of digital automation of the electrolysis bath for copper refining

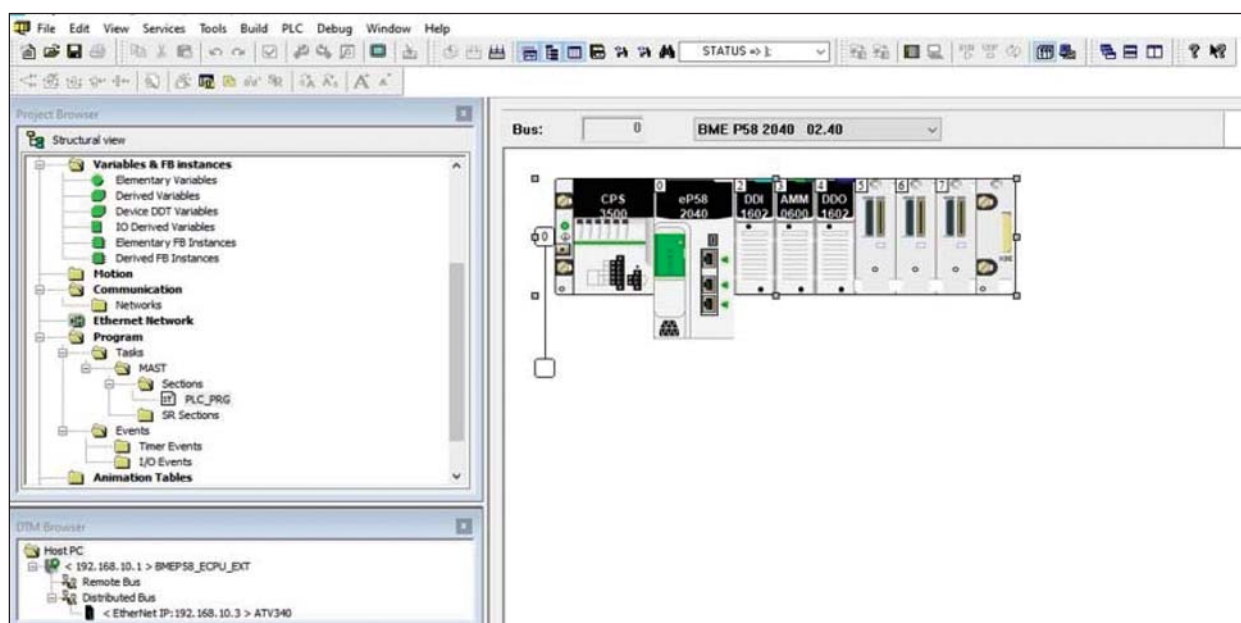


Рис. 8. Скриншот разработанной программы контроля шламового осадка и дендритных срастаний

Fig. 8. Screen shot of the developed software for sludge and dendritic accretions control

Программное обеспечение разработано в среде «Unity XL Pro» от компании «Schneider Electric» (Франция) и русифицировано для применения в среде SE (System Electric).

Дополнительные функции управления процессом через АСУ ТП позволяют более эффективно и своевременно устранять технологические отклонения. Повышение частоты замены катодов и проведения операции шламоудаления приводят к снижению экономических показателей процесса.

Заключение

Установлено, что интенсификация процесса электролиза происходит в основном за счет повышения значения плотности тока и улучшения работы системы циркуляции электролита для поддержания постоянной концентрации ионов меди при стабилизации температуры электролита.

Для дополнительного контроля за процессом обоснована необходимость внедрения датчиков уровня шламового осадка для снижения безвозвратных потерь катодной меди при отсутствии замыканий дендритного осадка на электроды в нижней донной части электролизера. Построены модели образования катодного осадка (шлама) и дендритных замыканий на электродах. Анализ возможных проблем и отклонений, связанных с образованием шламового осадка, дал возможность смоделировать ряд возможных сценариев процесса.

Разработанный алгоритм управления и программа ЭВМ для дополнительных действий в системе АСУ ТП позволяют снизить энергетические потери (на 10–15 %) и повысить выход по току (на 2 %).

Данные разработки будут полезны для внедрения в существующие системы АСУ ТП электролитического рафинирования меди для предприятия «Медеплавильный завод» (г. Лаокай, Социалистическая Республика Вьетнам).

Список литературы/References

1. Litvinenko V., Bowbrick I., Naumov I., Zaitseva Z. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*. 2022;338:130530. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130530>
2. Litvinenko V.S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector. *Natural Resources Research*. 2020;29:1521–1541. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09568-4>
3. Potekhin D.V., Galkin S.V. Use of machine learning technology to model the distribution of lithotypes in the permo-carboniferous oil deposit of the usinskoye field. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:41–51. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.101>
4. Qingyu Zeng, Chun Li, Yi Meng, Jun Tie, Rentao Zhao, Zhifang Zhang. Analysis of interelectrode short-circuit current in industrial copper electrorefining cells. *Measurement*. 2020;164:108015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108015>
5. Mansouri N., Khayati G.R., Mohammad Hasani Zade, Mohammad Javad Khorasani S., Kafi Hernashki R. A new feature extraction technique based on improved owl search algorithm: a case study in copper electrorefining plant. *Neural Computing and Applications*. 2022;34:7749–7814. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06881-z>
6. Таранцева К.Р., Фаюстова Ю.А. Эффективность очистки сточных вод от ионов железа, меди и никеля сорбентом из шлама водоочистки. *Экология и промышленность России*. 2023;27(2):22–25. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-2-22-25>
7. Tarantseva K., Fayustova Yu. Efficiency of wastewater treatment from iron, copper and nickel ions by sorbent from water purification sludge. *Ecology and Industry of Russia*. 2023;27(2):22–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-2-22-25>
8. Мансурова О.К., Читкова Я.В. Исследование процессов при электролитическом рафинировании меди. В сб.: *Инновационные научные исследования: теория, методология, практика: Материалы XX Междунар. науч.-практ. конференции* (Пенза, 23 февраля 2020 г.). Пенза: Наука и Просвещение, 2020. С. 47–52.
9. Shestakov A.K., Petrov P.A., Nikolaev M.Yu. Automatic system for detecting visible emissions in a potroom of aluminum plant based on technical vision and a neural network. *Metallurgist*. 2023;66:1308–1319. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01445-z>
10. Мастюгин С.А., Волкова Н.А., Набойченко С.С., Ласточкина М.А. Шламы электролитического рафинирования меди и никеля. Екатеринбург: УрФУ, 2013. 256 с.
11. Худяков П.Ю., Федорова С.В., Симонов А.Ю., Старцев И.М., Лаптев В.А. Автоматическая система идентификации коротких замыканий в электролизных ваннах. *Датчики и системы*. 2020;(9-10(251)):61–66. <https://doi.org/10.25728/datsys.2020.9-10.11>
12. Khudyakov P.Yu., Fedorova S.V., Simonov A.Yu., Startsev I.M., Laptev V.A. Automatic short circuit identification system in electrolysis baths. *Datchiki i Sistemy (Sensors and Systems)*. 2020;(9-10(251)):61–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.25728/datsys.2020.9-10.11>

11. Вольхин А.И., Чухланцев Н.М., Плеханов И.Д., Спирин В.Е., Серикова В.В., Сизов В.А., Винник В.И.. Устройство для обнаружения коротких замыканий в ваннах электролиза меди: Патент 55779 (РФ). 2006.
12. Горонько В.А. Устройство для определения тока короткого замыкания в электролизных ваннах: Патент 140216 (СССР). 1960.
13. Захаров Л.А., Мартышев Д.А., Пономарева И.Н. Прогнозирование динамического пластового давления методами искусственного интеллекта. *Записки Горного института*. 2022;253:23–32. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.11>
Zakharov L., Martyshev D., Ponomareva I.N. Predicting dynamic formation pressure using artificial intelligence methods. *Journal of Mining Institute*. 2022;253:23–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.11>
14. Салимжанова Е.В., Девочкин А.И., Юдин Е.В., Карпушова Д.Д. Разработка и внедрение технических решений по приведению качества катодной меди полярного деления в соответствие со стандартом Лондонской биржи металлов. *Цветные металлы*. 2018;6:44–51. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.06.06>
Salimzhanova E.V., Devochkin A.I., Yudin E.V., Karpushova D.D. Development and introduction of technical solutions to bring the quality of polar division cathode copper to conformity with London Metal Exchange standard. *Tsvetnye Metally*. 2018;6:44–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.06.06>
15. Mohammad Reza Shojaei, Gholam Reza Khayati, Seyed Mohammad Javad Korasani, Roya Kafi Harnashki. Investigating the nodulation mechanism of copper cathode based on microscopic approach: As a punch failure factor. *Engineering Failure Analysis*. 2022;133:105970. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105970>
16. Zakaev D., Nikolaichuk L., Irina F. Problems of oil refining industry development in Russia. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2020;13(2):267–270. <https://doi.org/10.37624/IJERT/13.2.2020.267-270>
17. Jingya Zhao, Yi Meng, Chun Li, Jun Tie. The effect of nodulation on the distribution of concentration and current density during copper electrolytic refining. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2285:012015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2285/1/012015>
18. Газалеева Г.И., Назаренко Л.Н., Шигаева В.Н. Схема технологического процесса обогащения черновых концентратов, содержащих мелкие шламы оловянных и медных минералов. *Обогащение руд*. 2018;(6(378)):20–26. <https://doi.org/10.17580/or.2018.06.04>
Gazaleeva G.I., Nazarenko L.N., Shigaeva V.N. Process flow design for upgrading rough concentrates containing fine slimes of tin and copper minerals. *Obogashchenie Rud*. 2018;(6(378)):20–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2018.06.04>
19. Ding L., Li Q., Yuan J., Dong X., Peng D., Li B., Li H., Xue Y., Niu Y. Characteristic and control of electrochemical oscillation at the anode during electrolytic refining copper. *International Journal of Electrochemical Science*. 2020;15(9):9532–9542. <https://doi.org/10.20964/2020.09.85>
20. Selivanov E.N., Sergeeva S.V., Korolev A.A., Timofeev K.L., Krayukhin S.A., Pikulin K.V. Impurity distribution during electrolytic refining of antimony. *Metallurgist*. 2021;64:1198–1207. <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01105-0>
21. Boikov A.V., Payor V.A., Savelev R.V. Technical vision system for analyzing the mechanical characteristics of birk materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;944:012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012021>
22. Шклярский Я.Э., Батуева Д.Е. Разработка алгоритма выбора режимов работы комплекса электроснабжения с ветродизельной электростанцией. *Записки Горного института*. 2022;253:115–126. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.7>
Shklyarskiy Y.E., Batueva D.E., Operation mode selection algorithm development of a wind-diesel power plant supply complex. *Journal of Mining Institute*. 2022;253:115–126. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.7>
23. Ding L., Cheng J., Wang T., Zhao J., Chen C., Niu Y. Continuous electrolytic refining process of cathode copper with non-dissolving anode. *Minerals Engineering*. 2019;135:21–28. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.02.032>
24. McNulty B.A., Jowitt S.M., Belousov I. The importance of geology in assessing by- and coproduct metal supply potential; a case study of antimony, bismuth, selenium, and tellurium within the copper production stream. *Economic Geology*. 2022;117(6):1367–1385. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4919>
25. Correa P.P., Cipriano A., Nunez F., Salas J.C., Lobel H. Forecasting copper electrorefining cathode rejection by means of recurrent neural networks with attention mechanism. *IEEE Access*. 2021;9:79080–79088. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3074780>
26. Zhang J., Chen H., Fan B., Shan H., Chen Q., Jiang C., Hou G., Tang Y. Study on the relationship between crystal plane orientation and strength of electrolytic copper foil. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;884:10–16. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161044>
27. Ostanin N.I., Rudoy V.M., Demin I.P., Ostanina T.N., Nikitin V.S. Statistical analysis of the distribution of im-

- purities during copper electrorefining. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021;62(5):501–507.
<https://doi.org/10.3103/S1067821221050102>
28. Boikov A.V., Savelev R.V., Payor V.A., Potapov A.V. Evaluation of bulk material behavior control method in technological units using DEM. Part 2. *CIS Iron and Steel Review*. 2020;20:3–6.
<https://doi.org/10.17580/cisr.2020.02.01>
 29. Васильева Н.В., Бойков А.В., Ерохина О.О., Трифонов А.Ю. Автоматизированная оцифровка круговых диаграмм. *Записки Горного института*. 2021;247:82–87. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.9>
Vasilyeva N.V., Boikov A.V., Erokhina O.O., Trifonov A.Yu. Automated digitization of radial charts. *Journal of Mining Institute*. 2021;247:82–87. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.9>
 30. Кашин Д.А., Кульчицкий А.А. Контроль качества металлургических брикетов на основе изображений брикетированной металлошихты. *Цветные металлы*. 2022;9(957):92–98.
<https://doi.org/10.17580/tsm.2022.09.13>
Kashin D.A., Kulchitskiy A.A. Image-based quality monitoring of metallurgical briquettes. *Tsvetnye Metally*. 2022;9(957):92–98. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17580/tsm.2022.09.13>
 31. Sharikov Y.V., Cabascando V.E.Q. Mathematical modeling of mass, heat and fluid flow in a reverberatory furnace for melting nickel-containing raw materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1753:1–8.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012064>
 32. Bian Y., Su L., Yu Z., Lv Z., Chen H., Zhou Y., Lin M. Graphite/copper phthalocyanine composite cathode for overcharge protection and gas evolution suppression in aluminum-ion batteries at room temperature. *Electrochimica Acta*. 2019;332:1–23.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135188>
 33. Sonawane J.M., Pant D., Ghosh P.C., Adeloju S.B. Polyaniline—copper composite: A non-precious metal cathode catalyst for low-temperature fuel cells. *Energy Fuels*. 2021;35(4):3385–3395.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c04152>
 34. Van Doremalen R.F.M., Van Netten J.J., Van Baal J.G., Vollenbroek-Hutten M.M.R., Van der Heijden F. Validation of low-cost smartphone-based thermal camera for diabetic foot assessment. *Diabetes Research and Clinical Practice*. 2019;149:132–139.
<https://doi.org/10.1016/j.diabres.2019.01.032>
 35. Han Ji-H., Khoo E., Bai P., Bazant M.Z. Overlimiting current and control of dendritic growth by surface conduction in nanopores. *Scientific Reports*. 2014;4(7056):1–8.
<https://doi.org/10.1038/srep07056>
 36. Зубов В.П., Тхан Ван Зуи, Федоров А.С. Технология подземной разработки мощных пластов угля с низкими прочностными характеристиками. *Уголь*. 2023;(5):37–45.
<http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-37-45>
Zubov V.P., Than Van Duy, Fedorov A.C. Technology of underground mining of thick coal seams with low strength properties. *Ugol'*. 2023;(5):37–45. (In Russ.).
<http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-37-45>
 37. Пряхин Е.И., Трошина Е.Ю. Изучение технологических и эксплуатационных особенностей высокотемпературостойких композитных пленок для лазерной маркировки деталей из черных сплавов. *Черные металлы*. 2023;(4):74–80.
<https://doi.org/10.17580/chm.2023.04.12>
Pryakhin E.I., Troshina E.Yu. Study of technological and operational features of high-temperature-resistant composite films for laser marking of parts made of ferrous alloys. *Chernye metally*. 2023;(4):74–80. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17580/chm.2023.04.12>

Информация об авторах

Нгуен Хю Хоанг — аспирант кафедры автоматизации технологических процессов и производств Санкт-Петербургского горного университета.

<https://orcid.org/0000-0001-7025-8654>

E-mail: huyhoangmta45@gmail.com

Владимир Юрьевич Бажин — д.т.н., проф., заведующий кафедрой металлургии Санкт-Петербургского горного университета.

<https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

E-mail: bazhin-alfoil@mail.ru

Information about the authors

Nguyen Huy Hoang — Postgraduate Student of the Department of automation of technological processes and production, Saint Petersburg Mining University.

<https://orcid.org/0000-0001-7025-8654>

E-mail: huyhoangmta45@gmail.com

Vladimir Yu. Bazhin — Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of metallurgy, Saint Petersburg Mining University.

<https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

E-mail: bazhin-alfoil@mail.ru

Вклад авторов

Нгуен Хю Хоанг — проведение экспериментов, написание программы и части статьи.

В.Ю. Бажин — определение цели работы, написание части статьи, участие в обсуждении результатов.

Contribution of the authors

Nguyen Huy Hoang — conducting experiments, writing the software and part of the article.

V.Yu. Bazhin — determination of the purpose of the work, writing part of the article, participation in the discussion of the results.

Статья поступила в редакцию 30.03.2023, доработана 14.04.2023, подписана в печать 20.04.2023

The article was submitted 30.03.2023, revised 14.04.2023, accepted for publication 20.04.2023

УДК 544.654; 546.831

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-17-26>

Научная статья

Research article



Электроосаждение кремния из расплавов $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ и $\text{KF-KCl-KI-K}_2\text{SiF}_6$

С.И. Жук^{1,2}, Л.М. Минченко¹, А.В. Суздальцев^{1,2}, А.В. Исаков¹, Ю.П. Зайков^{1,2}¹ Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН
620137, Россия, г. Екатеринбург, ул. Академическая, 20² Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

✉ Андрей Викторович Суздальцев (suzdaltsev_av@ihte.uran.ru, a.v.suzdaltsev@urfu.ru)

Аннотация: Кремний и материалы на его основе широко используются в металлургии, микроэлектронике и других развивающихся отраслях промышленности. Области применения синтезируемого кремния зависят от его морфологии и чистоты. В данной работе методами вольтамперометрии, гальваностатического электролиза и сканирующей электронной микроскопии изучено влияние поверхностно-активной добавки KI в расплав (мол.%) $66,5\text{KF}-33,3\text{KCl}-0,23\text{K}_2\text{SiF}_6$ при температуре 750°C на кинетику электровосстановления ионов кремния и морфологию получаемых на стеклоглеродном катоде кремниевых осадков. Показано, что введение в расплав $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ йодида калия в количестве 2 мол.% приводит к изменению межфазного натяжения на границе стеклоглерод–расплав–атмосфера, а именно к снижению смачиваемости стеклоглерода расплавом, в результате чего реальная рабочая поверхность, а соответственно, и катодный ток уменьшаются при сохранении плотности тока. С учетом подобного воздействия и алгебраической оценки влияния формы мениска расплава сделано предположение, что добавка KI практически не сказывается на кинетике катодного процесса. При этом отмечено заметное влияние добавок KI на морфологию электроосаждаемого кремния. При электролизе расплава $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ на стеклоглероде формируются волокнистые осадки кремния произвольной формы, в то время как добавление 2 и 4 мол.% йодида калия в расплав приводит к агломерации и сглаживанию осадков кремния при прочих равных условиях электролиза (катодная плотность тока – $0,02\text{ А/см}^2$, время электролиза – 2 ч). Полученные результаты указывают на возможность регулирования морфологии электроосаждаемого кремния с целью дальнейшего его применения в той или иной сфере.

Ключевые слова: кремний, вольтамперометрия, электроосаждение, морфология, расплав KF-KCl .

Благодарности: Анализы осадков кремния были выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования «Состав вещества» Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН.

Для цитирования: Жук С.И., Минченко Л.М., Суздальцев А.В., Исаков А.В., Зайков Ю.П. Электроосаждение кремния из расплавов $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ и $\text{KF-KCl-KI-K}_2\text{SiF}_6$. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(3):17–26.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-17-26>

Silicon electrodeposition from the $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ and $\text{KF-KCl-KI-K}_2\text{SiF}_6$ melts

S.I. Zhuk^{1,2}, L.M. Minchenko¹, A.V. Suzdaltsev^{1,2}, A.V. Isakov¹, Yu.P. Zaikov^{1,2}¹ Institute of High-Temperature Electrochemistry of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
20 Akademicheskaya str., Ekaterinburg, 620137, Russia² Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Eltsin
19 Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia

✉ Andrey V. Suzdaltsev (suzdaltsev_av@ihte.uran.ru, a.v.suzdaltsev@urfu.ru)

Abstract: Silicon and silicon-based materials find extensive applications in metallurgy, microelectronics, and other emerging industries. The field of use of synthesized silicon varies based on its morphology and purity. This study employs voltammetry, galvanostatic electrolysis,

and scanning electron microscopy to examine the impact of KI surfactant (in mol %) to $66.5\text{KF}-33.3\text{KCl}-0.23\text{K}_2\text{SiF}_6$ melt at 750°C on the electrowinning kinetics of silicon ions and the morphology of silicon deposits formed on a glassy carbon electrode. The findings demonstrate that the addition of potassium iodide to the $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ melt at a concentration of 2 mol % induces changes in interfacial tension at the boundary between the glassy carbon, melt, and atmosphere. Consequently, the wetting of the glassy carbon with the melt decreases, leading to a reduction in the actual working surface area and, consequently, a decrease in cathode current while maintaining current density. Taking into account this effect and employing an algebraic estimation of the influence of the melt meniscus shape, it is postulated that the addition of KI does not significantly affect the kinetics of the cathode process. Nevertheless, the impact of KI addition on the morphology of electrodeposited silicon is mentioned. During the electrolysis of the $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ melt, fibrous silicon deposits with arbitrary shapes are formed on the glassy carbon electrode, whereas the addition of 2 and 4 mol % of potassium iodide to the melt leads to the agglomeration and smoothing of silicon deposits under the same electrolysis conditions (cathode current density: 0.02 A/cm^2 , electrolysis duration: 2 h). The obtained results indicate the potential to manipulate the morphology of electrodeposited silicon for specific applications in various fields..

Keywords: silicon, voltammetry, electrodeposition, morphology, KF-KCl melt.

Acknowledgments: The analysis of silicon deposits was conducted using the equipment available at the “Substance composition” Core facilities center, Institute of High Temperature Electrochemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences.

For citation: Zhuk S.I., Minchenko L.M., Suzdaltsev A.V., Isakov A.V., Zaikov Yu.P. Silicon electrodeposition from the $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ and $\text{KF-KCl-KI-K}_2\text{SiF}_6$ melts. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(3):17–26.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-17-26>

Введение

В современной промышленности кремний и материалы на его основе играют большую роль. Кремний широко используется для изготовления сплавов на основе черных и цветных металлов, функциональных порошковых материалов, в фотоэлектрических преобразователях и электронике [1–3]. Значительная емкость кремния по литью позволяет применять композитные материалы на его основе в качестве анодного материала в литий-ионных источниках тока [4].

Для получения кремния с заданными свойствами, морфологией (сплошные осадки, нано- и микроразмерные нити, волокна, трубки) и содержанием микропримесей могут быть использованы способы электрохимического осаждения кремния из расплавленных солей и ионных жидкостей [5–14]. Электрохимические методы применяются для получения и переработки широкого спектра материалов в расплавленных солях [15–20], при этом позволяя управлять процессом электроосаждения путем изменения плотности катодного тока, катодного перенапряжения, температуры процесса и состава расплава [21–23].

В лабораторной практике одними из наиболее часто используемых электролитов для получения кремния являются расплавы на основе водорастворимой системы KF-KCl [8–12], позволяющие вести электролиз в диапазоне температур $650\text{--}750^\circ\text{C}$. К настоящему времени хорошо изучена кинетика катодного процесса в зависимости от температуры, концентрации кремнийсодержащих электроактивных ионов, материала подложки и условий поляризации. Получены экспериментальные партии осадков кремния при различных

параметрах электролиза и предложена диаграмма [12], характеризующая влияние этих параметров на морфологию осадков кремния. В исследуемом расплаве в диапазоне концентраций K_2SiF_6 до 5 мас.% на графите могут быть получены сплошные, пористые, а также развитые осадки кремния в виде волокон произвольной формы и упорядоченных субмикронных частиц. Формированию сплошного осадка способствует низкая катодная плотность тока, в то время как ее увеличение приводит к разрыхлению осадка. Последнее может быть обусловлено:

- превышением скорости роста имеющихся зародышей над скоростью роста новых;

- преимущественным осаждением кремния на поверхности зародышей ввиду возникающих диффузионных ограничений по доставке электроактивных ионов к поверхности катода;

- соосаждением калия и его интеркаляцией в графит.

На вероятность соосаждения калия указывает тот факт, что на серебряном электроде сплошные осадки кремния были получены при более высоких катодных плотностях тока [12]. Это подтверждает отмеченную выше возможность управления морфологией осаждаемого кремния при электролизе расплавленных солей путем изменения параметров процесса.

Кроме того, регулирование морфологией осадков кремния может осуществляться посредством введения добавок, оказывающих влияние на физико-химические свойства электролита. В первую очередь, это касается изменения электропроводности и поверхностного натяжения расплава. Так,

в работах [24–26] для электроосаждения кремния предложено использовать расплавленные электролиты на основе иодидов ($\text{KF-KCl-KI-K}_2\text{SiF}_6$, $\text{NaI-KI-K}_2\text{SiF}_6$). Однако концентрация иодидов в данных системах составляет 75 мол.% и выше, что затрудняет понимание влияния иодида как на кинетику и механизм восстановления кремнийсодержащих электроактивных ионов, так и на морфологию получаемых при электролизе осадков.

В данной работе было исследовано влияние KI на кинетику катодного процесса на стеклоуглероде в расплаве KF-KCl и морфологию осадков, получаемых при электролизе.

Эксперимент

Для измерений и электроосаждения использовали соли квалификации ХЧ (ОАО «Вектон», г. Санкт-Петербург), которые предварительно очищали от примесей путем гидрофторирования (KF , K_2SiF_6) [9], йодирования (KI) [20], а также предварительного потенциостатического очистного электролиза расплава солей [27]. Электрохимические измерения и электроосаждение кремния проводили в атмосфере аргона в герметичной реторте из нержавеющей стали (рис. 1), которую размещали в шахтной печи сопротивления. Контейнером для электролита служил стеклоуглеродный тигель, помещенный в графитовый стакан. Для сохранения атмосферы аргона при добавке в расплав KI в конструкции ячейки было предусмотрено шлюзовое устройство. Рабочим электродом служил стеклоуглеродный электрод. Монокристаллический кремний использовали в качестве квазиэлектрода сравнения и вспомогательного электрода. Токосводами для электродов были вольфрамовые стержни. Температуру расплава задавали и поддерживали равной 750 ± 2 °С, используя Pt/Pt–Rh термодпары и терморегулятор ТП703 (НПК «Варта», г. Санкт-Петербург).

Вольт-амперные зависимости фиксировали на стеклоуглеродном электроде в расплаве (мол.%) $66,5\text{KF}-33,3\text{KCl}-0,23\text{K}_2\text{SiF}_6$ при температуре 750 °С с помощью потенциостата-гальваностата «AutoLab 302N» (Metrohm, Нидерланды). Для оценки влияния KI на смачивание стеклоуглеродного электрода расплавом $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ измерения были выполнены с полупогруженным электродом, при этом погружение меняли от 5 до 15 мм. Электролиз расплава (мол.%) $66,5\text{KF}-33,3\text{KCl}-0,23\text{K}_2\text{SiF}_6$ с добавками 2 и 4 мол.% KI вели при одинаковой катодной плотности тока ($0,02 \text{ А/см}^2$)

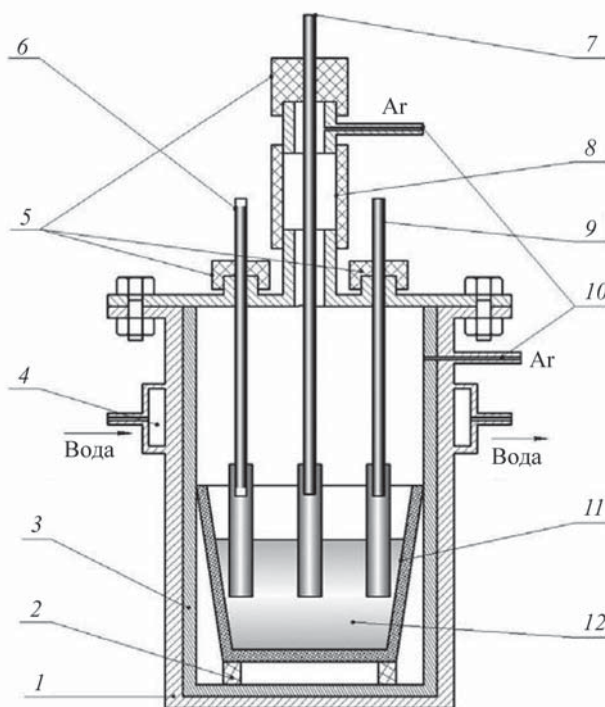


Рис. 1. Схема экспериментальной ячейки

1 – реторта из нержавеющей стали; 2 – графитовая подставка; 3 – никелевый стакан; 4 – кожух охлаждения; 5 – уплотнения из вакуумной резины; 6 – электрод сравнения; 7 – рабочий электрод; 8 – шлюз; 9 – вспомогательный электрод; 10 – каналы подвода/отвода инертного газа; 11 – стеклоуглеродный тигель; 12 – расплав

Fig. 1. Schematic view of experimental cell

1 – stainless-steel retort; 2 – graphite stand; 3 – nickel screen; 4 – cooling shell; 5 – rubber seals; 6 – quasi-reference electrode; 7 – working electrode; 8 – gateway; 9 – auxiliary electrode; 10 – inlet/outlet channels of inert gas; 11 – glassy carbon crucible; 12 – melt

и одинаковом погружении стеклоуглеродных катодов (15 мм).

Содержание кремния в расплаве до и после электролиза контролировали методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой с использованием спектрометра «iCAP 6300 Duo Spectrometer» (Thermo Scientific, США). Морфологию осадков кремния изучали при помощи сканирующего электронного микроскопа JMS-5900LV (Jeol, Великобритания), а фазовый состав — посредством дифрактометра «Rigaku D/MAX-2200VL/PC» (Rigaku, Япония).

Результаты и их обсуждение

Электрохимические измерения. На рис. 2 приведены вольт-амперные зависимости, полученные на стеклоуглеродном катоде в расплаве KF-KCl —

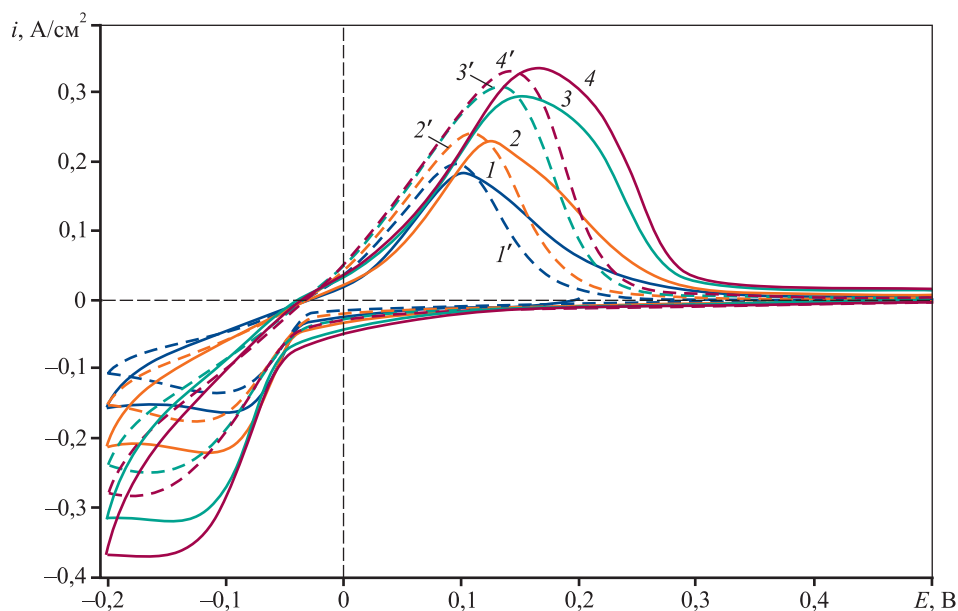


Рис. 2. Вольт-амперные зависимости, полученные на стеклогуглероде при температуре 750 °С в расплавах (мол.%) 66,5KF–33,3KCl–0,23K₂SiF₆ (1–4) и 65,2KF–32,6KCl–2,0KI–0,23K₂SiF₆ (1'–4')

Скорость развертки потенциала, В/с: 1, 1' – 0,1; 2, 2' – 0,2; 3, 3' – 0,4; 4, 4' – 0,7

Fig. 2. Current voltage dependencies obtained on glassy carbon at 750 °С in 66.5KF–33.3KCl–0.23K₂SiF₆ (1–4) and 65.2KF–32.6KCl–2.0KI–0.23K₂SiF₆ (1'–4') melts (mol.%)

Potential scanning rate, V/s: 1, 1' – 0.1; 2, 2' – 0.2; 3, 3' – 0.4; 4, 4' – 0.7

K₂SiF₆ при температуре 750 °С с добавкой 2 мол.% KI и без нее.

На зависимостях можно видеть один катодный и один анодный пики, характеризующие процессы электровосстановления ионов кремния и окисления электроосажденного кремния. Причем наличие одного катодного пика свидетельствует о протекании исследуемого катодного процесса в одну стадию: $\text{Si}^{4+} + 4e^- = \text{Si}^0$, а несимметричность анодного пика может указывать на двустадийное окисление кремния, окисление кремния до разных электроактивных ионов и на замедленную диффузию кремнийсодержащих ионов в приэлектродном слое. При увеличении скорости развертки потенциал пика катодной плотности тока смещается в отрицательную область, что характерно для электрохимических реакций, протекающих по механизму квазиобратимой или необратимой электрохимической реакции. При потенциалах отрицательнее –0,2 В наблюдается волна, связанная с началом электровосстановления катионов калия.

Аналогичные вольт-амперные зависимости получены в расплаве $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ с добавкой 2 мол.% KI. Это указывает на сохранение механизма исследуемого процесса в целом. Отличиями

зависимостей, полученных в расплаве с добавкой KI, являются меньшие катодные токи и связанные с этим эффектом менее растянутые по оси потенциалов анодные пики, характеризующие кинетику анодного растворения кремния. Основной

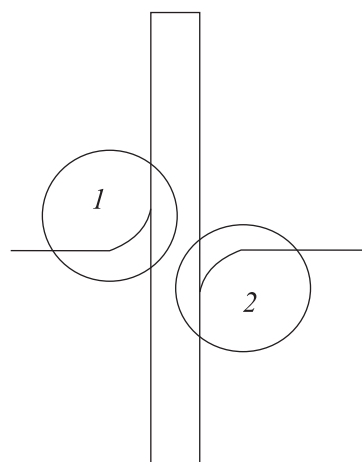


Рис. 3. Схематическое отображение изменения формы мениска при добавлении KI в расплав $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ 1 – без KI; 2 – 2 мол.% KI

Fig. 3. Changes in meniscus shape upon KI addition to $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ melt

1 – w/o KI; 2 – 2 mol.% KI

причиной снижения катодных токов может являться изменение угла смачивания стеклоуглерода расплавом при добавлении йодида калия, что обусловлено изменением межфазного натяжения на границе стеклоуглерод/расплав KF–KCl–K₂SiF₆ при добавлении в него KI. В этом случае добавка KI может оказывать вышеотмеченное влияние не на катодный ток, а на поверхность рабочего стеклоуглеродного электрода. Схематически этот эффект изображен на рис. 3.

Анализ влияния KI. Для учета влияния формирующегося в ходе поляризации мениска на трехфазной границе электрод–расплав–атмосфера на реальную площадь контакта электрод–электролит были получены вольт-амперные зависимости при разных погружениях рабочего электрода в расплав. По полученным токам катодных пиков оценивали ошибку измерения реальной площади электрода, обусловленную возникновением мениска расплава на трехфазной границе. Для этого использовали выражения

$$I_1/(S_1 + \Delta S) = I_2/(S_2 + \Delta S) = I_3/(S_3 + \Delta S), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta S &= (I_1 S_2 - I_2 S_1)/(I_2 - I_1) = \\ &= (I_1 S_3 - I_3 S_1)/(I_3 - I_1) = (I_2 S_3 - I_3 S_2)/(I_3 - I_2), \quad (2) \end{aligned}$$

где I_1, I_2, I_3 — токи катодного пика при погружениях электрода 5, 10 и 15 мм соответственно, А; S_1, S_2, S_3 — измеренные рабочие площади электрода при тех же погружениях, см²; ΔS — ошибка измерения реальной площади электрода, обусловленная возникновением мениска расплава на трехфазной границе, см².

На рис. 4 приведены зависимости плотности тока катодных пиков от скорости развертки потенциала при разных погружениях стеклоуглеродного электрода. Так, при его погружении на глубину 5 мм в расплав без KI рассчитанная с учетом ΔS величина пика катодной плотности тока имеет максимальное значение, которое уменьшается по мере увеличения глубины погружения электрода. При этом в расплаве, содержащем 2 мол.% KI, наблюдали обратную зависимость. Это позволяет сделать вывод, что добавление KI приводит к уменьшению угла смачивания стеклоуглеродного электрода (см. рис. 3).

Оцененные по выражениям (1) и (2) относительные изменения реальной площади рабочего электрода, обусловленные формированием мениска расплава на электроде при его поляризации, составили +12,9 % для расплава KF–KCl–K₂SiF₆

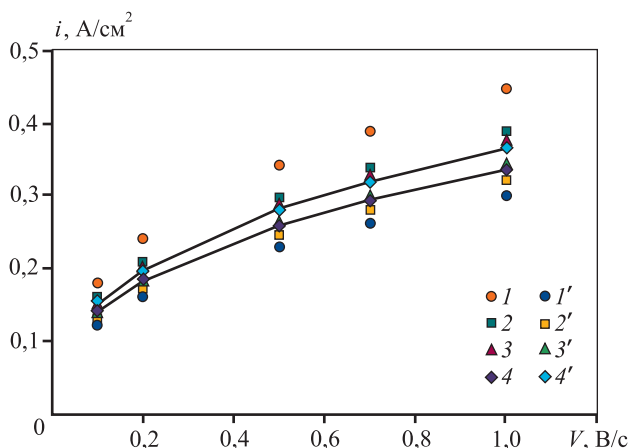


Рис. 4. Зависимости плотности тока катодных пиков от скорости развертки потенциала при разных погружениях (I, I' — 5 мм; $2, 2'$ — 10 мм; $3, 3'$ — 15 мм; $4, 4'$ — рассчитанные с учетом ΔS) стеклоуглеродного электрода в расплаве KF–KCl–K₂SiF₆ с добавкой 2 мол.% KI (I' – $4'$) и без нее (I – 4)

Fig. 4. Current density of cathode peaks as a function of potential scanning rate with various immersions (I, I' — 5 mm; $2, 2'$ — 10 mm; $3, 3'$ — 15 mm; $4, 4'$ — calculated with accounting for ΔS) of glassy carbon in KF–KCl–K₂SiF₆ melt with addition of 2 mol.% KI (I' – $4'$) and without it (I – 4)

и –10,9 % для этого же расплава с добавкой 2 мол.% KI при прочих равных условиях. С учетом явлений смачиваемости реальные значения пиков катодной плотности тока в расплаве KF–KCl–K₂SiF₆ при содержаниях йодида калия 0 и 2 мол.% различаются на 9 % (см. рис. 4), что не превышает предела погрешности измерений. Другими словами, на основании вольт-амперных измерений можно сделать заключение, что добавка KI в размере 2 мол.% практически не оказывает влияние на скорость электроосаждения кремния. Более существенное влияние KI может наблюдаться при формировании зародышей кремния, что, в свою очередь, будет обуславливать морфологию осадка.

Электроосаждение кремния из расплавов KF–KCl–KI–K₂SiF₆. Для определения влияния йодидной добавки на морфологию получаемых осадков кремния были проведены эксперименты по электроосаждению кремния из расплава KF–KCl–K₂SiF₆ без добавок и с добавкой 2 и 4 мол.% KI. Во всех случаях температура расплава составляла 750 °С, а электролиз осуществляли в гальваностатическом режиме на одинаково подготовленные стеклоуглеродные пластины при плотности катодного тока 0,02 А/см² в течение 120 мин.

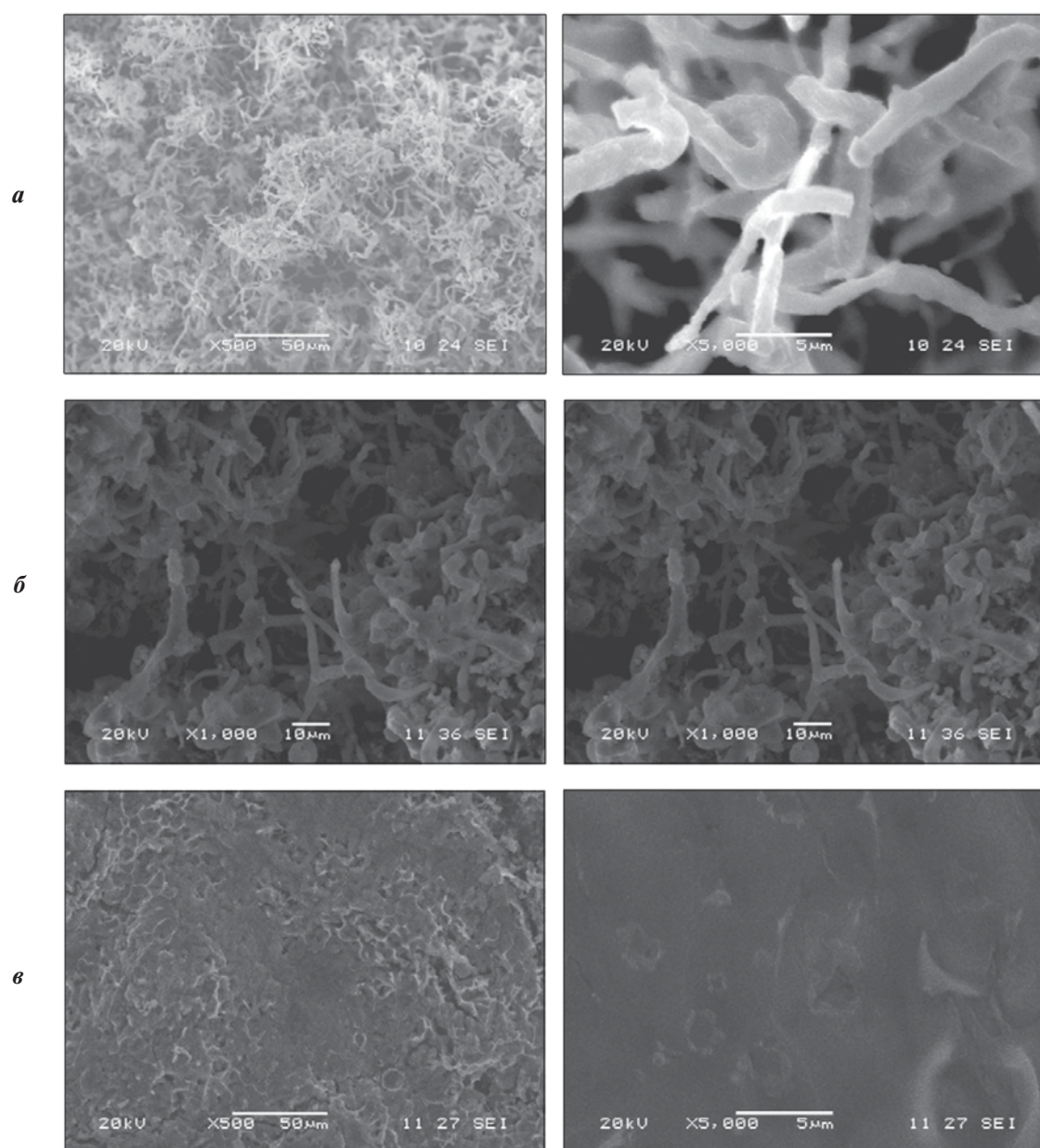


Рис. 5. Микрофотографии осадков кремния, полученных при электролизе расплава $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ на стеклогугроде при катодной плотности тока $0,02 \text{ A/cm}^2$ и температуре 750°C

Содержание KI, мол. %: *a* – 0; *б* – 2; *в* – 4

Fig. 5. SEM-images of silicon deposits obtained upon electrolysis of $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ melt on glassy carbon at cathode current density of 0.02 A/cm^2 and at 750°C

KI content, mol. %: *a* – 0; *б* – 2; *в* – 4

На рис. 5 приведены микрофотографии полученных осадков кремния. Осадок, полученный в расплаве без KI, представлен волокнами произвольной формы со средним диаметром 1–2 мкм. При добавлении в расплав йодида калия в количестве 2 и 4 мол.% можно наблюдать агломерацию волокон кремния вплоть до формирования сплошного осадка кремния. По данным энергодисперсионного анализа, осадки были представлены

кремнием и кислородом (до 5 мас.% в пересчете на диоксид кремния). Подобные результаты были получены при анализе осадка рентгенофазовым методом (см. рис. 6).

Таким образом, приведенные результаты электрохимических измерений и экспериментов по электроосаждению кремния указывают на существенное влияние йодида на морфологию осадков кремния. А именно, при добавлении и

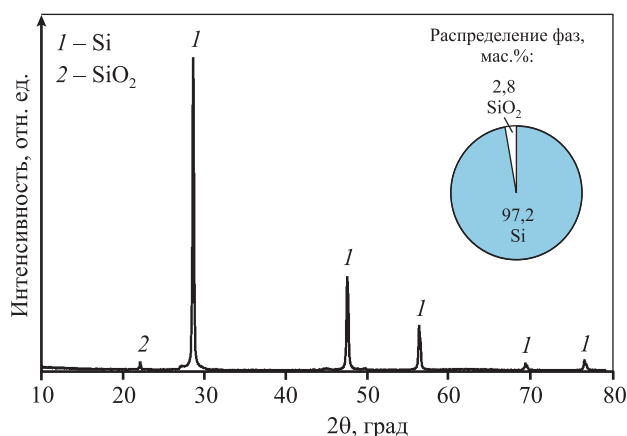


Рис. 6. Дифрактограмма типичного осадка кремния, полученного при электролизе расплава $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ с добавкой KI

Fig. 6. Diffraction pattern of typical silicon deposit obtained upon electrolysis of $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ melt with KI addition

повышении концентрации йодида в расплаве следует ожидать сглаживание осадка при прочих равных условиях.

Заключение

Методами вольтамперометрии, гальваностатического электролиза и сканирующей электронной микроскопии изучено влияние поверхностно-активной добавки KI в расплав (мол.%) $66,5\text{KF}-33,3\text{KCl}-0,23\text{K}_2\text{SiF}_6$ при температуре 750°C на кинетику электровосстановления ионов кремния и морфологию получаемых на стеклоуглеродном катоде кремниевых осадков.

Показано, что добавление в расплав $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ йодида калия в количестве 2 мол.% приводит к изменению межфазного натяжения на границе стеклоуглерод—расплав—атмосфера. А именно, наблюдается снижение смачиваемости стеклоуглерода исследуемым расплавом, в результате чего реальная рабочая поверхность и катодный ток уменьшаются при сохранении плотности тока. С учетом подобного влияния и алгебраической оценки изменения формы мениска расплава сделано предположение, что добавка KI практически не сказывается на кинетике катодного процесса. При этом в ходе электролиза расплава $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ на стеклоуглероде формируются волокнистые осадки кремния произвольной формы, а добавление 2 и 4 мол.% йодида калия в расплав приводит к агломерации и сглаживанию осадков кремния при прочих равных условиях электролиза

(катодная плотность тока 20 мА/см^2 , время электролиза 2 ч).

Полученные результаты указывают на возможность регулирования морфологии электроосаждаемого кремния с целью дальнейшего его применения в той или иной сфере.

Список литературы/References

1. Немчинова Н.В., Бузикова Т.А. Исследование фазового состава печных шлаков кремниевого производства. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2017;(1):31–39.
Nemchinova N.V., Buzikova T.A. Study of the phase-and-chemical composition of silicon production furnace slags. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2017;(1):31–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-31-39>
2. Тимофеев П.А., Тимофеев А.Н. Термодинамическая оценка возможности осаждения боридов кремния из их галогенидов. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2017;1:58–63.
Timofeev P.A., Timofeev A.N. Thermodynamic assessment of capability for deposition of silicon borides from their halogenides. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2017;(1): 58–63. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2017-1-58-63>
3. Gevel T., Zhuk S., Leonova N., Leonova A., Trofimov A., Suzdaltsev A., Zaikov Yu. Electrochemical synthesis of nano-sized silicon from $\text{KCl-K}_2\text{SiF}_6$ melts for powerful lithium-ion batteries. *Applied Sciences*. 2021;11(22): 10927. <https://doi.org/10.3390/app112210927>
4. Wang F., Li P., Li W., Wang D. Electrochemical synthesis of multidimensional nanostructured silicon as a negative electrode material for lithium-ion battery. *ACS Nano*. 2022;16:7689–7700.
<https://doi.org/10.1021/acsnano.1c11393>
5. Suzdaltsev A.V. Silicon electrodeposition for microelectronics and distributed energy: a mini-review. *Electrochem*. 2022;3(4):760–768.
<https://doi.org/10.3390/electrochem3040050>
6. Dong Y., Slade T., Stolt M.J., Li L., Girard S.N., Mai L., Jin S. Low-temperature molten-salt production of silicon nanowires by the electrochemical reduction of CaSiO_3 . *Angewandte Chemie*. 2017;129:14645–14649.
<https://doi.org/10.1002/ange.201707064>
7. Zou X., Ji L., Yang X., Lim T., Yu E.T., Bard A.J. Electrochemical formation of a p-n junction on thin film silicon deposited in molten salt. *Journal of American Chemical Society*. 2017;139:16060–16063.
<https://doi.org/10.1021/jacs.7b09090>
8. Zaykov Y.P., Zhuk S.I., Isakov A.V., Grishenkova O.V., Isaev V.A. Electrochemical nucleation and growth of

- silicon in the $\text{KF-KCl-K}_2\text{SiF}_6$ melt. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2015;19:1341–1345.
<https://doi.org/10.1007/s10008-014-2729-z>
9. Жук С.И., Гевел Т.А., Зайков Ю.П. Влияние материала подложки на кинетику и механизм электроосаждения кремния из расплава $\text{KCl-KF-K}_2\text{SiF}_6$. *Расплавы*. 2021;(4):354–364.
Zhuk S.I., Gevel T.A., Zaikov Yu.P. Effect of the substrate material on kinetics and mechanism of electrodeposition from the $\text{KCl-KF-K}_2\text{SiF}_6$ melt. *Rasplavy*. 2021;(4):354–364. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0235010621040101>
 10. Yasuda K., Maeda K., Hagiwara R., Homma T., Nohira T. Silicon electrodeposition in a water-soluble KF-KCl molten salt: Utilization of SiCl_4 as Si source. *Journal of the Electrochemical Society*. 2017;164:D67–D71.
<https://doi.org/10.1149/2.0641702jes>
 11. Padamata S.K., Saevarsdottir G. Silicon electrowinning by molten salts electrolysis. *Frontiers in Chemistry*. 2023;11:1133990.
<https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1133990>
 12. Parasotchenko Yu.A., Pavlenko O.B., Suzdaltsev A.V., Zaikov Yu.P. Electrochemical nucleation of silicon in the low-temperature $\text{LiCl-KCl-CsCl-K}_2\text{SiF}_6$ melt. *Journal of the Electrochemical Society*. 2023;170(2):022505.
<https://doi.org/10.1149/1945-7111/acbabf>
 13. Gevel T., Zhuk S., Suzdaltsev A.V., Zaikov Yu.P. Study into the possibility of silicon electrodeposition from a low-fluoride $\text{KCl-K}_2\text{SiF}_6$ melt. *Ionics*. 2022;28:3537–3545. <https://doi.org/10.1007/s11581-022-04573-9>
 14. Павленко О.Б., Устинова Ю.А., Жук С.И., Суздальцев А.В., Зайков Ю.П. Электроосаждение кремния из расплавов на основе легкоплавкой системы LiCl-KCl-CsCl . *Расплавы*. 2022;(1):49–60.
Pavlenko O.B., Ustinova Yu.A., Zhuk S.I., Suzdaltsev A.V., Zaikov Yu.P. Silicon electrodeposition from low-melting LiCl-KCl-CsCl melts. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2022;(8):818–824.
<https://doi.org/10.1134/S0036029522080109>
 15. Савченков С.А., Бажин В.Ю., Бричкин В.Н., Косов Я.И., Уголков В.Л. Технологические особенности синтеза лигатур магний–неодим. *Металлург*. 2019;(4):71–77.
Savchenkov S.A., Bazhin V.Y., Brichkin V.N., Kosov Y.I., Ugolkov V.L. Production features of magnesium-neodymium master alloy synthesis. *Metallurgist*. 2019;63(3-4): 394–402.
<https://doi.org/10.1007/s11015-019-00835-6>
 16. Морачевский А.Г. Физико-химические исследования процессов утилизации свинцовых аккумуляторов (Обзор). *Журнал прикладной химии*. 2014;87(3):273–290.
Morachevskii A.G. Physicochemical studies of utilization of lead batteries. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2014;87(3):241–257.
<https://doi.org/10.1134/S107042721403001X>
 17. Шуров Н.И., Храмов А.П., Зайков Ю.П., Ковров В.А., Суздальцев А.В. О механизме восстановления оксидов в расплавах хлорида кальция. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2015;(2):14–19.
Shurov N.I., Khramov A.P., Zaikov Yu.P., Kovrov V.A., Suzdaltsev A.V. Reduction mechanism of oxides in calcium chloride melts. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2015;56:267–271.
<https://doi.org/10.3103/S1067821215030207>
 18. Ясинский А.С., Поляков П.В., Ключанцев А.Б. Динамика движения анодного газа в высокотемпературной суспензии «криолитовый расплав-глинозем». *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2017;(1):13–18.
Yasinsky A.S., Polyakov P.V., Klyuchantsev A.B. Anode gas dynamics in high-temperature cryolite melt-alumina slurry. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2017;(1):13–18. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-13-18>
 19. Сизяков В.М., Бажин В.Ю., Власов А.А., Фешенко Р.Ю., Храпкова А.Н. О взаимодействии глиноземной шихты с криолитоглиноземным расплавом. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2014;(3):24–28.
Sizyakov V.M., Bazhin V.Yu., Vlasov A.A., Feshchenko R.Yu., Khrapkova A.N. On interdependence of alumina charge with cryolite-alumina melt. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2014;(3):24–28. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2014-3-24-28>
 20. Zaikov Yu., Batukhtin V., Shurov N., Suzdaltsev A. High-temperature electrochemistry of calcium. *Electrochemical Materials & Technologies*. 2022;1(1):20221007.
<https://doi.org/10.15726/elmattech.2022.1.007>
 21. Трофимова Т.С., Даринцева А.Б., Останина Т.Н., Рудой В.М., Ильина И.Е. Влияние структуры и морфологии пористых осадков на основе никеля на их электрокаталитические свойства при получении водорода. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2021;15(4):57–67.
Trofimova T.S., Darintseva A.B., Ostanina T.N., Rudoi V.M., Il'ina I.E. Effect of the structure and morphology of Ni-based porous deposits on their electrocatalytic activity towards hydrogen evolution reaction. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2021;15(4):57–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2021-4-57-67>
 22. Лебедев В.А., Поляков В.В. Электродные процессы при получении микродисперсного порошка титана объемным электролитическим восстановлением его ионов натрием, растворенным в рас-

- плавле $\text{BaCl}_2\text{—CaCl}_2\text{—NaCl}$, в отсутствие галогенидов титана в исходном расплаве. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2022;16(4):4–14.
- Lebedev V.A., Polyakov V.V. Electrode processes in the production of microdispersed titanium powder by volumetric electrolytic reduction of its ions with sodium dissolved in the $\text{BaCl}_2\text{—CaCl}_2\text{—NaCl}$ melt in the absence of titanium halides in the initial melt. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2022;16(4):4–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2022-4-14>
23. Никитин В.С., Останина Т.Н., Кумков С.И., Рудой В.М., Останин Н.И. Определение периода наращивания рыхлого осадка цинка с использованием методов интервального анализа. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2020;(1):11–21.
- Nikitin V.S., Ostanina T.N., Kumkov S.I., Rudoy V.M., Ostanin N.I. Determination of the growth time period of loose zinc deposit using interval analysis methods. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2020;(1):11–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2020-11-21>
24. Laptev M.V., Khudorozhkova A.O., Isakov A.V., Grishenkova O.V., Zhuk S.I., Zaikov Y.P. Electrodeposition of aluminum-doped thin silicon films from a $\text{KF-KCl-KI-K}_2\text{SiF}_6\text{—AlF}_3$ melt. *Journal of Serbian Chemical Society*. 2021;86):1075–1087. <https://doi.org/10.2298/JSC200917065L>
25. Abdurakhimova R.K., Laptev M.V., Leonova N.M., Leonova A.M., Schmygalev A.S., Suzdaltsev A.V. Electroreduction of silicon from the $\text{NaI-KI-K}_2\text{SiF}_6$ melt for lithium-ion power sources. *Chimica Techno Acta*. 2022;9(4):20229424. <https://doi.org/10.15826/chimtech.2022.9.4.24>
26. Isakov A., Laptev M., Khudorozhkova A., Grishenkova O., Zaikov Y., Khvostov S., Kinev E., Rychkov V. Neutron transmutation doping of thin silicon films electrodeposited from the $\text{KF-KCl-KI-K}_2\text{SiF}_6$ melt. *Journal of the Electrochemical Society*. 2020;167(8):082515. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab933c>
27. Филатов А.А., Николаев А.Ю., Суздальцев А.В., Заиков Ю.П. Извлечение циркония из его оксида при электролизе расплавов $\text{KF-AlF}_3\text{—Al}_2\text{O}_3\text{—ZrO}_2$. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2022;28(3):13–20. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2022-3-13-20>
- Filatov A.A., Nikolaev A.Y., Suzdaltsev A.V., Zaikov Y.P. Extraction of zirconium from its oxide during the electrolysis of $\text{KF-AlF}_3\text{—Al}_2\text{O}_3\text{—ZrO}_2$ melts. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2022;63(4):379–384. <https://doi.org/10.3103/S106782122204006X>

Информация об авторах

Сергей Иванович Жук — мл. науч. сотрудник лаборатории электродных процессов Института высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук (ИВТЭ УрО РАН); мл. науч. сотрудник научной лаборатории электрохимических устройств и материалов Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ).

<https://orcid.org/0000-0003-2889-7318>

E-mail: ZhukSI83@mail.ru

Людмила Михайловна Минченко — к.х.н., инженер лаборатории электродных процессов ИВТЭ УрО РАН.

<https://orcid.org/0000-0001-6067-5251>

E-mail: l.minchenko@ihte.uran.ru

Андрей Викторович Суздальцев — д.х.н., вед. науч. сотрудник лаборатории электродных процессов ИВТЭ УрО РАН; заведующий научной лабораторией электрохимических устройств и материалов УрФУ.

<https://orcid.org/0000-0003-3004-7611>

E-mail: suzdaltsev_av@ihte.uran.ru, a.v.suzdaltsev@urfu.ru

Information about the authors

Sergey I. Zhuk — Junior Researcher of the Laboratory of Electrode Processes, Institute of High-Temperature Electrochemistry of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IHTE UB RAS); Junior Researcher of the Laboratory of Electrochemical Devices and Materials, Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Eltsin (UrFU).

<https://orcid.org/0000-0003-2889-7318>

E-mail: ZhukSI83@mail.ru

Lyudmila M. Minchenko — Cand. Sci. (Chem.), Engineer of the Laboratory of Electrode Processes, IHTE UB RAS.

<https://orcid.org/0000-0001-6067-5251>

E-mail: l.minchenko@ihte.uran.ru

Andrey V. Suzdaltsev — Dr. Sci. (Chem.), Leading Researcher of the Laboratory of Electrode Processes, IHTE UB RAS; Head of the Laboratory of Electrochemical Devices and Materials, UrFU.

<https://orcid.org/0000-0003-3004-7611>

E-mail: suzdaltsev_av@ihte.uran.ru, a.v.suzdaltsev@urfu.ru

Андрей Владимирович Исаков — к.х.н., заведующий лабораторией электрокристаллизации и высокотемпературной гальванотехники ИВТЭ УрО РАН.
<https://orcid.org/0000-0002-0192-3048>
E-mail: ihte_uran@mail.ru

Юрий Павлович Зайков — д.х.н., проф., научный руководитель ИВТЭ УрО РАН; заведующий кафедрой технологии электрохимических производств УрФУ.
<https://orcid.org/0000-0001-6138-3955>
E-mail: zaikov@ihte.uran.ru

Andrey V. Isakov — Cand. Sci. (Chem.), Head of the Laboratory of Electrocrystallization and High-Temperature Electroplating, Ihte UB RAS.
<https://orcid.org/0000-0002-0192-3048>
E-mail: ihte_uran@mail.ru

Yuriy P. Zaikov — Dr. Sci. (Chem.), Prof., Scientific Supervisor of the Ihte UB RAS; Head of the Department of Technology of Electrochemical Production, UrFU.
<https://orcid.org/0000-0001-6138-3955>
E-mail: zaikov@ihte.uran.ru

Вклад авторов

С.И. Жук — приготовление электролитов, электрохимические измерения, электроосаждение, оформление результатов исследований, участие в написании статьи.

Л.М. Минченко — изготовление установки, микроскопический анализ, электроосаждение.

А.В. Суздальцев — постановка цели работы, написание текста статьи.

А.В. Исаков — обсуждение результатов исследований.

Ю.П. Зайков — общее руководство исследованиями.

Contribution of the authors

S.I. Zhuk — preparation of electrolytes, electrochemical measurements, electrodeposition, registration of the research results, participation in the writing of the article.

L.M. Minchenko — installation manufacturing, microscopic analysis, electrodeposition.

A.V. Suzdaltsev — definition the purpose of the work, writing the text of the article.

A.V. Isakov — discussion of the research results.

Yu.P. Zaikov — general management of research.

Статья поступила в редакцию 14.02.2023, доработана 03.04.2023, подписана в печать 07.04.2023

The article was submitted 14.02.2023, revised 03.04.2023, accepted for publication 07.04.2023

УДК 661.897

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-27-37>

Научная статья

Research article



Получение концентрата родия из цементата золота

Я.Д. Зелях¹, Р.С. Воинков^{1,2}, К.Л. Тимофеев^{1,2}, Г.И. Мальцев¹

¹АО «Уралэлектромедь»

624091, Россия, Свердловская обл., г. Верхняя Пышма, Успенский пр-т, 1

²Технический университет Уральской горно-металлургической компании

624091, Россия, Свердловская обл., г. Верхняя Пышма, Успенский пр-т, 3

✉ Яков Дмитриевич Зелях (zyad@elem.ru)

Аннотация: Проведены исследования по совершенствованию технологии переработки цементата производства золота (ЦПЗ), образующегося в аффинажном отделении химико-металлургического цеха АО «Уралэлектромедь», с целью повышения степени извлечения целевых металлов в товарные продукты, диверсификации производства, получения экономического эффекта за счет увеличения содержания драгоценных металлов (ДМ) в индивидуальных концентратах. Оптимизация технологии переработки ЦПЗ предусматривает интенсификацию процессов выщелачивания исходного материала и фильтрации полученной пульпы для увеличения показателей извлечения в раствор золота, металлов платиновой группы (МПГ) и снижения находящихся в обороте ДМ, что позволит получить индивидуальные продукты (черновые ДМ) с минимальными материальными затратами и трудоемкостью. Повысить содержание родия в концентрате и сократить его количество в обороте при переработке цементата возможно путем предварительного окислительного обжига при температуре свыше 500 °С, при которой на поверхности родия образуется труднорастворимый триоксид Rh_2O_3 , не растворяющийся в «царской водке», что позволяет выделить его в виде индивидуального продукта. Установлено влияние температуры и состава газовой фазы при проведении окислительного обжига исходного сырья ($t = 500\text{--}750$ °С) на состав концентрата триоксида родия (15÷45 % Rh_2O_3). Разработана и опробована в промышленном варианте схема переработки цементата производства золота, которая позволяет селективно получить несколько продуктов: осажденное золото ($\text{Au} \geq 98$ %), осажденное серебро ($\text{Ag} \geq 98$ %), концентрат МПГ ($\text{Pt} \geq 45$ % и $\text{Pd} \geq 15$ %), концентрат родия ($\text{Rh} = 15\text{--}45$ %).

Ключевые слова: цементат производства золота, цементация, драгоценные металлы, обжиг, выщелачивание, родий, концентрат металлов платиновой группы.

Для цитирования: Зелях Я.Д., Воинков Р.С., Тимофеев К.Л., Мальцев Г.И. Получение концентрата родия из цементата золота. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(3):27–37. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-27-37>

Preparation of rhodium concentrate from gold cementate

Ya.D. Zelyakh¹, R.S. Voinkov^{1,2}, K.L. Timofeev^{1,2}, G.I. Maltsev¹

¹JSC Uralelectromed

1 Uspenskiy prosp., Verkhnyaya Pyshma, Sverdlovsk region, 624091, Russia

²Technical University of Ural Mining and Metallurgical Company

3 Uspenskiy prosp., Verkhnyaya Pyshma, Sverdlovsk region, 624091, Russia

✉ Yakov D. Zelyakh (zyad@elem.ru)

Abstract: This article describes studies on improving reprocessing technology gold production cementate (GPC) formed in refining section of chemical metallurgical shop at JSC Uralelectromed, in order to increase the extraction rate of targeted metals into marketable products, diversification of production, achievement of economic effect due to increasing content of precious metals (PM) in individual concentrates.

The optimization of GPC reprocessing technology includes intensification of leaching of initial material and filtration of produced pulp, in order to increase the extraction of gold and platinum group metals (PGM) into solution and decrease the circulated PM. This would allow individual products (crude PM) to be obtained with minimum material loss and labor consumption. It is possible to increase rhodium content in concentrate and to reduce its circulation by preliminary oxidizing annealing at the temperature above 500 °C. At this temperature hardly soluble trioxide Rh_2O_3 is formed on rhodium surface, insoluble in aqua regia, thus allowing it to deposit in the form of individual product. The influence of temperature and composition of gaseous phase was established upon oxidizing annealing of initial raw stuff ($t = 500\text{--}750\text{ }^\circ\text{C}$) on the composition of rhodium trioxide concentrate (15+45 % Rh_2O_3). Reprocessing flowchart of gold production cementate was developed and tested on commercial scale, allowing for the simultaneous production of several products: deposited gold ($\text{Au} \geq 98\%$), deposited silver ($\text{Ag} \geq 98\%$), PGM concentrate ($\text{Pt} \geq 45\%$ and $\text{Pd} \geq 15\%$), rhodium concentrate ($\text{Rh} = 15\text{--}45\%$).

Keywords: precipitate of gold recovery, precipitation, precious metals, annealing, leaching, rhodium, concentrate of platinum group metals.

For citation: Zelyakh Ya.D., Voinkov R.S., Timofeev K.L., Maltsev G.I. Preparation of rhodium concentrate from gold cementate. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(3):27–37. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-27-37>

Введение

В рудах Урала содержание платиновых металлов невелико, но при этом из исходного сырья в анодную медь, как правило, извлекается не менее 97 % платиноидов. В технологической цепочке производства меди в ОАО УГМК платиноиды в составе черновой меди поступают в АО «Уралэлектромедь» — головное предприятие компании, которое является одним из крупнейших в России медеаффинировочных производств, постоянно модернизирующим свою технологию. При электроаффинировании меди образуется шлам, содержащий драгоценные металлы (ДМ), %: 0,35–0,48 Au, 8,66–11,31 Ag, 0,002–0,004 Pt, 0,025–0,052 Pd, 0,0009–0,0025 Rh [1–3]. В последующем ДМ концентрируются в сплаве серебряно-золотом (ССЗ), который поступает на аффинирование [4–8]. На рис. 1 приведена принципиальная технологическая схема переработки ССЗ в АО «Уралэлектромедь». Продуктами аффинирования являются золото и серебро в слитках, а также концентраты металлов платиновой группы (КМПГ) в виде осадка катодного и порошка (КМПГ-ОК и КМПГ-П соответственно).

Растущее потребление металлов платиновой группы (МПГ) на фоне повышения их стоимости все больше увеличивает интерес к исследованиям селективного получения аффинированных платиновых металлов, включая рассмотрение возможности селективного выделения платиновых металлов из поликомпонентного сырья техногенного производства на примере цементата производства золота (ЦПЗ) [9–13].

Цементат производства золота образуется в аффинажном отделении (АФО) химико-металлургического цеха (ХМЦ) при восстановлении ДМ железосодержащими материалами из отработанных растворов осаждения золота оборотного и

КМПГ-порошка, а также промывных вод системы пылегазоулавливания плавильного передела. Содержание основных компонентов ЦПЗ следующее, %: 12–30 Au, 2–6 Ag, 14–32 Pt, 5–15 Pd, 2–8 Rh, 25–35 примеси. Примеси в ЦПЗ представлены Cu, Se, Te, Fe и S в количестве до 10 % каждой, а также другими элементами [14–17].

Для повышения извлечения ценных компонентов и комплексности использования образующихся промпродуктов осуществляют переработку ЦПЗ как с коллективным извлечением примесей, так и с селективным выделением драгоценных металлов [18; 19]. Состав полученных продуктов и эффективность их извлечения зависят, в частности, от природы и свойств растворителя [20–22]. Получение индивидуальных продуктов высокой чистоты сопровождается обилием стадий перечистки и сложностью аппаратного оформления процесса [23]. В АО «Уралэлектромедь» в настоящее время реализована схема переработки ЦПЗ (рис. 2).

Необходимо отметить повышенную продолжительность (от 4 до 6 ч) стадии растворения цементатов, которая прямо пропорциональна содержанию недрагоценных металлов, — это сопровождается снижением показателей прямого извлечения металлов в целевые продукты (до 50 % Au, 40 % Pt, 60 % Pd) и сопряжено с длительным временем фильтрации пульпы после растворения ЦПЗ в растворе «царской водки» (от 0,5 до 2 ч) из-за аморфной структуры материала.

Качественный фазовый анализ исходного цементата представлен на рис. 3. При изучении фазовой структуры исследуемого материала была установлена возможность наличия аморфных фаз (гало с центральной точкой $2\theta \sim 46,89^\circ$) — до 36 %, обусловленного рассеянием от неупорядоченных

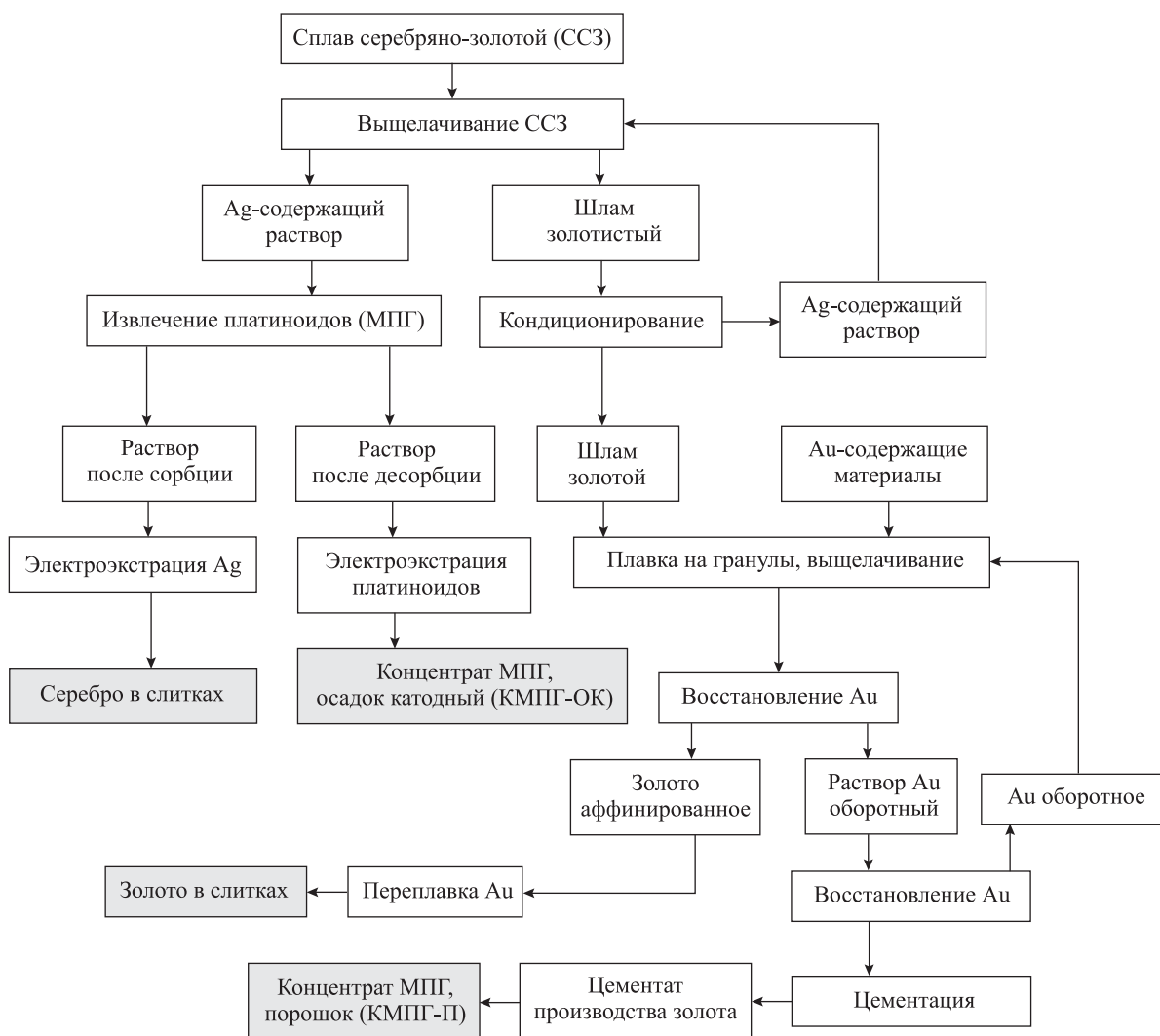


Рис. 1. Принципиальная схема аффинажа ДМ в АО «Уралэлектромедь»

Fig. 1. Flowchart of PM refining at AO Uralektromed

фаз. Выраженные линии на дифрактограмме, возможно, принадлежат AgAu.

Оптимизация технологии переработки ЦПЗ предусматривает окислительный обжиг, ведущий к интенсификации процессов выщелачивания исходного материала и фильтрации полученной пульпы с целью повышения показателей извлечения в раствор золота и МПП и снижения находящихся в обороте драгоценных металлов, что позволит получить индивидуальные продукты (черновые ДМ), а также диверсифицировать производство (получение концентрата родия).

По существующей технологии родий распределяется между нерастворимым остатком после выщелачивания ЦПЗ (извлекается ~40 % Rh) и кон-

центратом платиноидов в виде порошка (КМПП-П, ~60 % Rh), получаемым цементацией. Содержание родия в концентрате составляет 2–8 %. Повысить содержание родия в КМПП-порошке и сократить его количество в обороте при переработке ЦПЗ возможно путем предварительного окислительного обжига при температуре свыше 500 °С, при которой на поверхности родия образуется малорастворимый триоксид Rh_2O_3 , не растворяющийся в «царской водке», что позволяет выделить его в виде индивидуального продукта [24–29].

Цель настоящей работы заключалась в совершенствовании технологии переработки цементата производства золота с дополнительным получением черновых металлов (серебро — $Ag \geq 98\%$, концентрат родия — $Rh = 15\div 45\%$) и сохранением

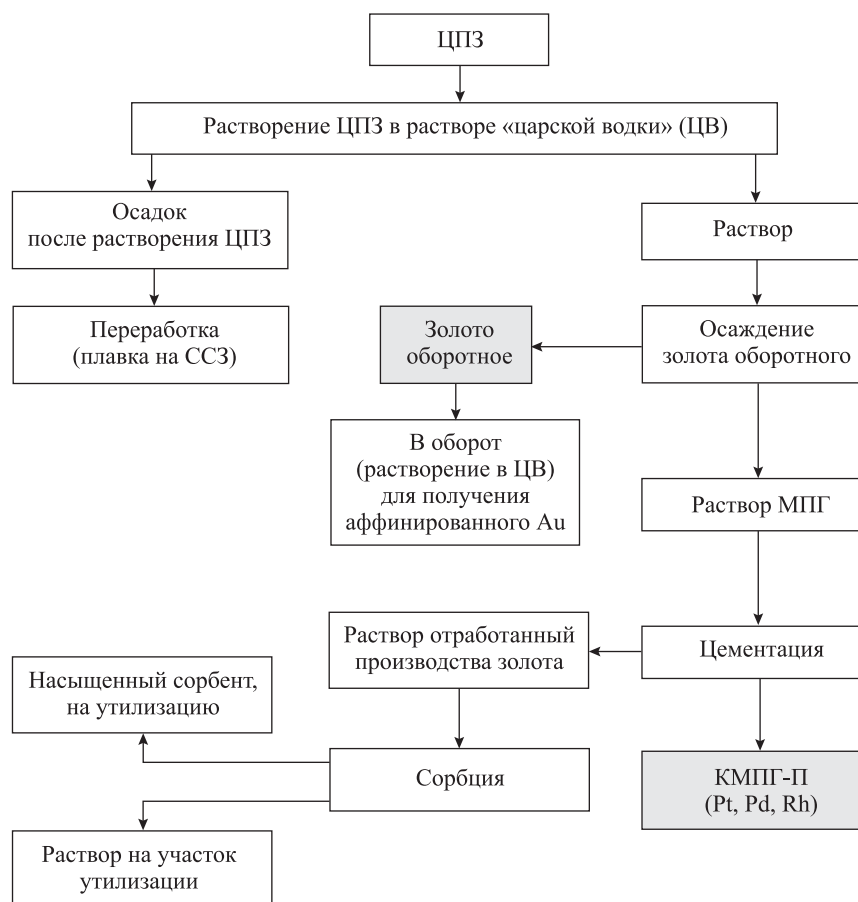


Рис. 2. Принципиальная существующая схема переработки ЦПЗ

Fig. 2. Existing flowchart of GPC reprocessing

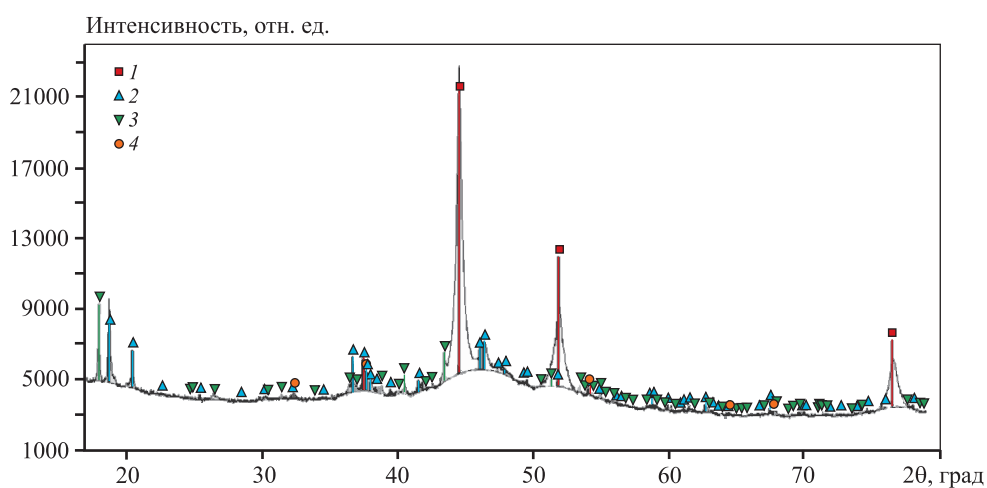


Рис. 3. Качественный фазовый анализ пробы «ЦПЗ исходный» (DiffracSuite EVA v6.0; ICDD PDF-2 2019, фрагмент дифрактограммы)

1 – AuAg; 2 – атаканит $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$; 3 – боталлакит $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$; 4 – хлораргирит AgCl

Fig. 3. Qualitative phase analysis of initial GPC

(DiffracSuite EVA v6.0; ICDD PDF-2 2019, diffraction pattern fragment)

1 – AuAg; 2 – atacamite $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$; 3 – botallackite $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$; 4 – chlorargyrite AgCl

качества золота ($\text{Au} \geq 98 \%$) и концентрата МПГ ($\text{Pt} \geq 45 \%$ и $\text{Pd} \geq 15 \%$).

Методика исследований

Для оценки возможности получения концентрата с повышенным содержанием родия была проведена серия экспериментов согласно доработанной технологической схеме, представленной на рис. 4.

Эксперименты отличались условиями проведения окислительного обжига (табл. 1): обжиг в опыте 1 выполняли в лабораторной муфельной печи и сравнивали его результаты с данными при переработке исходного материала (опыт 1.1, см. табл. 2); опыты 2, 3 проводили в промышленных условиях — электропечь косвенного нагрева; высота слоя материала не более 2 см. Параметры других технологических операций были идентичны.

Выщелачивание ЦПЗ после обжига осуществляли в лабораторных и промышленных реакторах при температуре $85\text{--}95^\circ\text{C}$ и $\text{Ж} : \text{Т} = 5$ смесью кислот состава, об. %: $85\text{--}95 \text{ HCl}$, $5\text{--}15 \text{ HNO}_3$.

Химический анализ промпродуктов выполняли атомно-эмиссионным спектральным методом с индуктивно-связанной плазмой с использованием оптико-эмиссионного спектрометра «Spectroblue» (Spectro Analytical Instruments, Германия), готовую продукцию изучали атомно-эмиссионным спектральным методом с искровым источником возбуждения спектра на эмиссионном спектрометре «Spectrolab M12» (Германия).

Образцы цементата и продукты его обжига также исследовали рентгенофазовым анализом (РФА) на дифрактометре «Bruker D8 Advance» (Bruker Corp., США) в диапазоне углов дифракции $2\theta = 15\text{--}80^\circ$ в CoK_α -излучении с шагом $0,025^\circ$ с использованием позиционно-чувствительного детектора

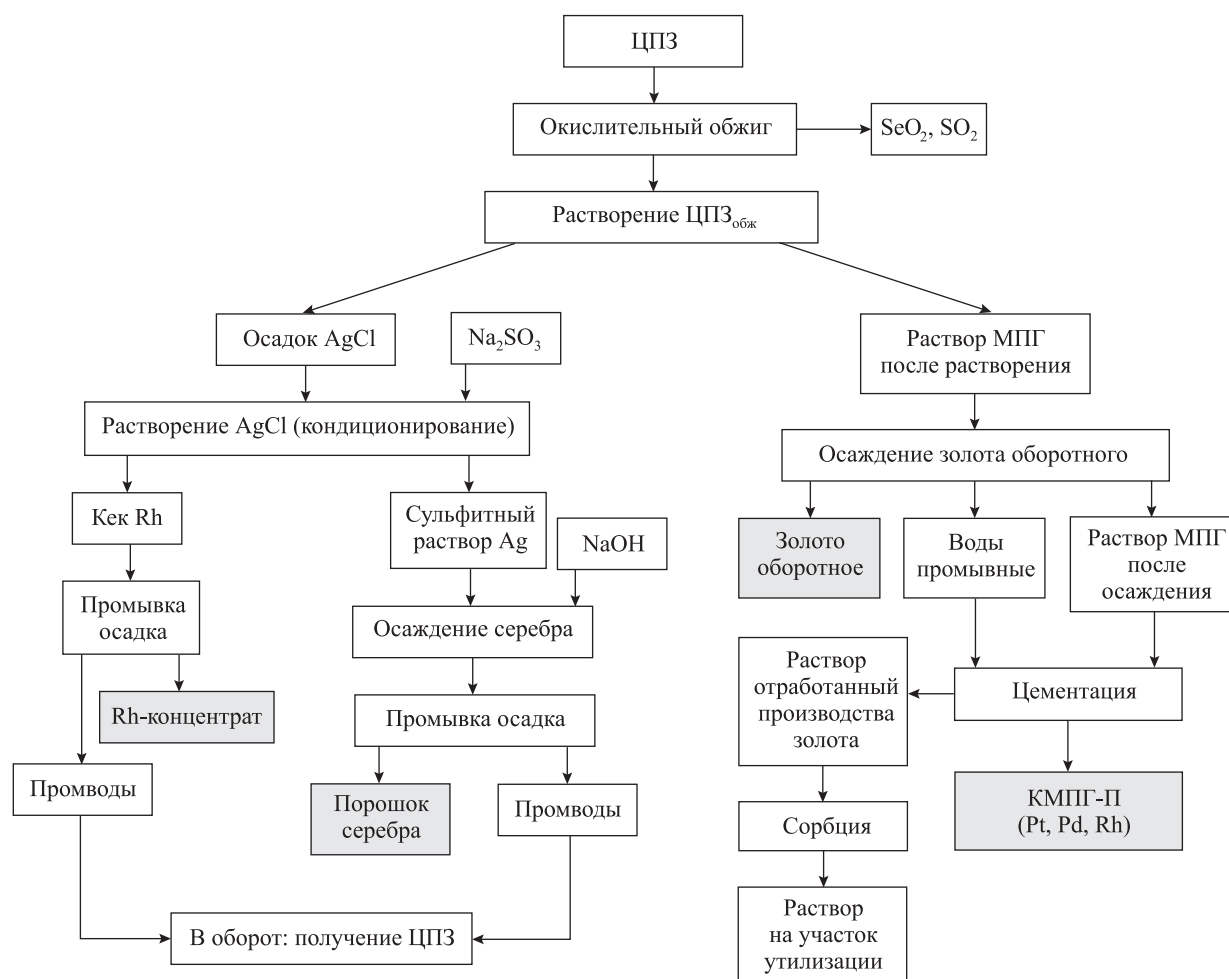


Рис. 4. Предлагаемая технологическая схема переработки ЦПЗ

Fig. 4. Proposed flowchart of GPC reprocessing

Таблица 1. Технологические параметры обжига ЦПЗ

Table 1. Technological parameters of GPC annealing

№ опыта	<i>t</i> , °С	Продолжительность, ч	Масса ЦПЗ, кг	Условия проведения обжига
1.1	—	—	0,2	Лабораторные, без операции предварительного обжига
1	750	10–12	0,2	Лабораторные, периодическая подача воздуха (0,05 н.м ³ /ч)
2	500	8–10	28,1	Промышленные, подача чистого кислорода (20 н.м ³ /ч)
3	620	24–30	20,7	Промышленные, периодическая подача воздуха (5 н.м ³ /ч)
4	720	8–10	25,6	Промышленные, подача чистого кислорода (20 н.м ³ /ч)
5	720	12–14	21,5	Промышленные, периодическая подача воздуха (5 н.м ³ /ч)

«LynxEye»; общее время записи дифрактограммы составляло 7,5 ч, эквивалентное время на шаг — 1860 с. Качественный фазовый анализ осуществляли с помощью пакета «Bruker DiffracSuite EVA v6.0» и базы данных эталонных дифракционных спектров ICDD PDF-2 (v. 2019). Количественный фазовый анализ проводили в пакете полнопрофильного анализа «Bruker TOPAS 5.0» по методу Ритвельда; кристаллические структуры взяты из открытой базы данных «Crystallography Open Database» (Кембриджский университет, Великобритания). Микрофотографии образцов получены на электронном микроскопе «Tescan Vega» (Tescan, Чехия) с увеличением 60× и 400×.

Результаты и их обсуждение

При выщелачивании обожженных материалов отмечается сокращение на 50–70 % и продолжительности самого растворения материалов, и времени фильтрации полученных пульп (рис. 5), что связано с изменением структуры осадка (рис. 6 — лабораторные эксперименты). Несмотря на дополнительную операцию обжига длительностью 8–16 ч, технология не приводит к увеличению незавершенного производства, позволяет сократить количество повторных растворов и вывести до 5 % родия из оборота. В табл. 2 приведены степени выщелачивания металлов в раствор в каждом из экспериментов.

Качественный фазовый анализ ЦПЗ после обжига представлен на рис. 6. Наблюдается изменение структуры осадка, о чем свидетельствуют данные РФА. Согласно дифрактограмме, идентифицировано образование кристаллов, существенно сократилась доля аморфных фаз. Результаты

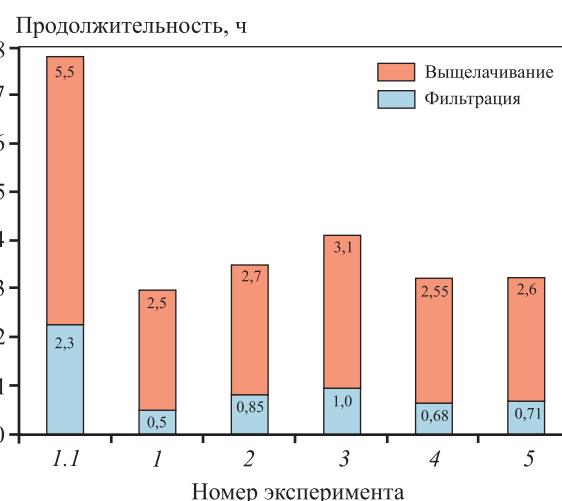


Рис. 5. Зависимость продолжительности стадий выщелачивания и фильтрации от условий предварительного обжига

Fig. 5. Duration of leaching and filtration stages as a function of conditions of preliminary annealing

Таблица 2. Степень выщелачивания металлов в раствор, %

Table 2. Degree of metal leaching into solution, %

№ опыта	Au	Ag	Pt	Pd	Rh
1.1	80	9	77	74	62
1	99,99	4	86	82	30
2	99,99	3	99,99	99,99	50
3	99,99	1,5	88	72	34
4	99,99	2,6	95,7	86,2	32
5	99,99	1,8	96,4	90,1	33

микрорентгеноспектрального анализа также подтверждают сделанные заключения: в сравнении с исходным цементатом (рис. 7, а) в продукте после обжига (рис. 7, б) идентифицируются четко различимые кристаллы макалпинита Cu_3TeO_6 , образующегося в результате окислительного обжига. Возможность формирования этих кристаллов показана в работе [30]. Дополнительным под-

тверждением приведенных выводов об изменении структуры осадка являются практические результаты по скорости фильтрации цементата до и после обжига.

Ни состав газовой фазы (кислород, воздух или кислородно-воздушная смесь (КВС)), ни режим подачи газа (0,05–20 н.м³/ч) не оказали заметного воздействия на эффективность окисления родия

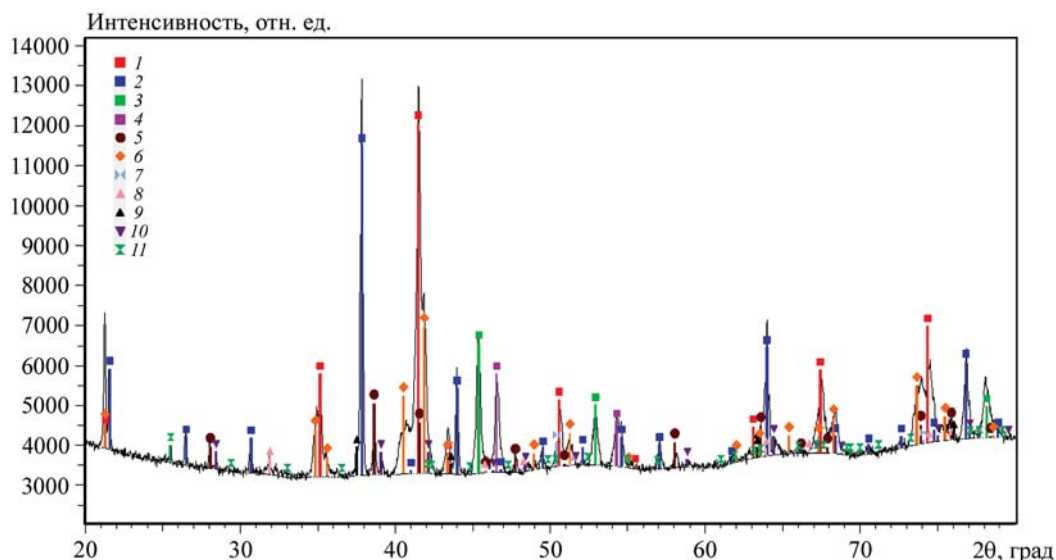


Рис. 6. Качественный фазовый анализ пробы «ЦПЗ после обжига» (DiffracSuite EVA v6.0; ICDD PDF-2 2019, фрагмент дифрактограммы)

Фазы: 1 – манганат железа Fe_2MnO_4 ; 2 – медно-никелевый оксид теллура $\text{Cu}_2\text{Ni}(\text{TeO}_6)$; 3 – $\text{Au}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}$; 4 – платина Pt; 5 – гематит Fe_2O_3 ; 6 – феррит меди CuFe_2O_4 ; 7 – ферроплатина $\text{Fe}_{0.75}\text{Pt}_{0.25}$; 8 – рутил TiO_2 ; 9 – AgO ; 10 – $(\text{Cr}_{0.88}\text{Ti}_{0.12})_2\text{O}_3$; 11 – кристобалит SiO_2

Fig. 6. Qualitative phase analysis of GPC after annealing (DiffracSuite EVA v6.0; ICDD PDF-2 2019, diffraction pattern fragment)

Phases: 1 – iron manganate Fe_2MnO_4 ; 2 – copper nickel tellurium oxide $\text{Cu}_2\text{Ni}(\text{TeO}_6)$; 3 – $\text{Au}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}$; 4 – platinum Pt; 5 – hematite Fe_2O_3 ; 6 – copper ferrite CuFe_2O_4 ; 7 – propatagium $\text{Fe}_{0.75}\text{Pt}_{0.25}$; 8 – rutile TiO_2 ; 9 – AgO ; 10 – $(\text{Cr}_{0.88}\text{Ti}_{0.12})_2\text{O}_3$; 11 – cristobalite SiO_2

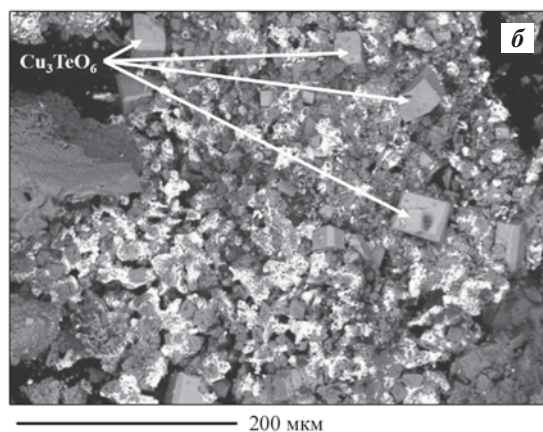
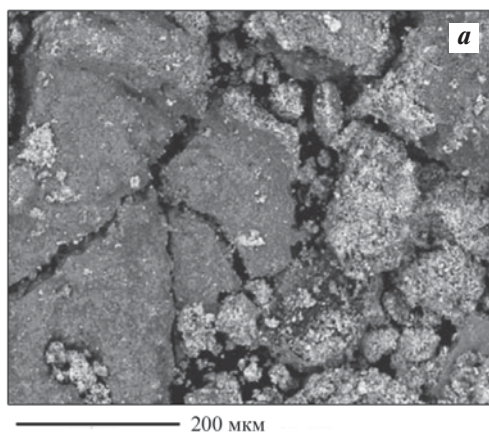


Рис. 7. Микрофотографии ЦПЗ до (а) и после (б) обжига

Fig. 7. GPC micro images before (a) and after (b) annealing

Таблица 3. Содержание ДМ (%) в золоте оборотном и КМПГ

Table 3. PM content (%) in recirculated gold and PGM

№ опыта	Au	Ag	Pt	Pd	Rh
1.1	99,6/0,46	0,022/1,01	0,017/32,53	0,029/11,5	0,045/9,12
1	99,3/—	0,020/0,005	0,178/46,15	0,199/22,70	0,001/2,10
2	98,9/0,012	0,257/0,720	0,234/38,80	0,010/15,12	0,010/3,10
3	99,4/0,056	0,015/0,329	0,045/48,13	0,105/19,79	0,000/2,52
4	98,6/0,021	0,153/0,56	0,184/45,7	0,095/20,1	0,011/2,15
5	99,01/0,015	0,104/0,43	0,078/44,5	0,102/19,97	0,009/2,42

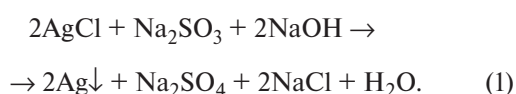
Примечание: числитель — золото оборотное, знаменатель — КМПГ.

ввиду избытка окислителя. Состав газа в промышленных экспериментах был обусловлен технологическими особенностями и параметрами используемых печей обжига. На эффективность окисления родия в наибольшей степени влияла температура, при $t = 750$ °С растворяется лишь 30 % Rh. Существенное различие степеней извлечения ДМ в раствор обусловлено не только температурой обжига, но и различным содержанием металлов-примесей (Cu, Te, Fe, Sb) в разных партиях ЦПЗ, влияние которых будет оценено в дальнейших исследованиях.

Из растворов выщелачивания проведено удаление избытка азотной кислоты путем добавления раствора этилового спирта при нагревании. В табл. 3 приведены составы золота оборотного и КМПГ. Извлечение ДМ (Au, Pt, Pd, Rh) из раствора выщелачивания в конечные продукты составило более 99 %.

Нерастворимый остаток операции растворения ЦПЗ после обжига в «царской водке» состоит, в основном, из хлорида серебра (AgCl) и оксида родия (Rh₂O₃). Увеличение содержания родия в твердой фазе было достигнуто за счет выщелачивания нерастворимого остатка раствором сульфата натрия. В раствор при этом переходит серебро в опытах 1/2/3 с концентрациями, г/дм³: 9,18/9,2/7,9; извлечение серебра составляет, %: 99,99/99,99/75. Конечный твердый остаток является родиевым концентратом (табл. 4), пригодным для последующей переработки с получением металлического родия.

Из полученных сульфитных растворов кондиционирования серебро восстанавливали до металлического добавлением едкого натра:



Результаты анализа осадка серебра представлены в табл. 5.

Условия обжига и данные по содержанию родия в продуктах различных стадий приведены на рис. 8 и в табл. 6.

Видно, что эффективность окисления родия напрямую зависит от температурного режима обжига: увеличение температуры обжига от 500 до 750 °С повышает содержание родия в концентрате от 15 до 45 %.

Таблица 4. Содержание ДМ в концентрате родия, %

Table 4. PM content in rhodium concentrate, %

№ опыта	Rh	Au	Ag	Pt	Pd
1.1	8,4	0,1	0,15	3,5	2,8
1	45,00	0,15	0,250	1,17	0,58
2	20,08	1,07	0,543	3,96	6,16
3	15,10	0,54	5,200	1,600	11,7
4	40,25	0,96	1,2	1,512	8,92
5	37,89	0,85	1,08	2,08	9,07

Таблица 5. Содержание ДМ в осадке серебра, %

Table 5. PM content in silver residue, %

№ опыта	Au	Ag	Pt	Pd	Rh
1.1	0,05	85,1	2,3	1,58	0,45
1	—	99,59	0,00	0,00	0,00
2	0,18	94,61	0,77	0,15	0,30
3	2,34	86,80	1,70	0,68	0,39
4	0,26	92,48	0,89	0,57	0,05
5	0,34	93,26	1,04	0,39	0,12

Таблица 6. Концентрация родия в исходном цементате и продуктах его переработки, %

Table 6. Rhodium concentration in initial cementate and products of its reprocessing, %

Номер опыта	Условия обжига ЦПЗ		Цементат исходный	Цементат после обжига	Остаток ЦВ-растворения*	Концентрат родия**
	t , °C	Газ				
1.1	Без обжига		7,00	7,00	10,29	8,40
1	750	KBC	7,00	9,30	31,95	45,00
2	500	O ₂	2,33	2,95	11,00	15,00
3	620	KBC	4,40	5,20	14,00	20,00
4	720	O ₂	5,07	10,27	26,83	40,25
5	720	KBC	6,52	8,68	23,72	37,89

* Остаток материала после царско-водочного растворения.
 ** Полученный концентрат родия после проведения операций согласно схеме на рис. 4.

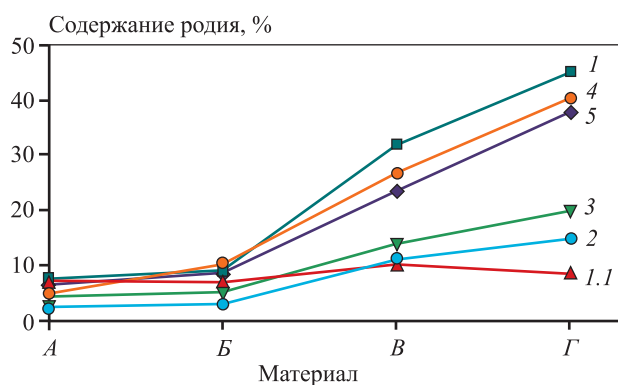


Рис. 8. Зависимость содержания родия в продуктах переработки ЦПЗ, обожженного при различных условиях

Материал: А – ЦПЗ исходный; Б – ЦПЗ после обжига; В – нерастворимый остаток выщелачивания ЦПЗ; Г – концентрат родия
 t , °C: 1.1 – без обжига; 1 – 750, KBC; 2 – 500, O₂; 3 – 620, KBC; 4 – 720, O₂; 5 – 720, KBC

Fig. 8. Rhodium content in GPC reprocessing products annealed under various conditions

Material: A – initial GPC; B – GPC after annealing; B – insoluble residue of GPC leaching; G – rhodium concentrate
 t , °C: 1.1 – w/o annealing; 1 – 750, OAM; 2 – 500, O₂; 3 – 620, OAM; 4 – 720, O₂; 5 – 720, OAM

Заключение

Разработана и опробована технологическая схема переработки коллективного цементата производства золота, содержащего драгоценные металлы, получаемого в АО «Уралэлектромедь». Выявлена зависимость степени окисления родия от температуры предварительного обжига цементата: ее повышение от 500 до 750 °C увеличивает содер-

жание целевого металла в товарном продукте (концентрате) с 15 до 45 % Rh. Оптимальные параметры проведения предварительного окислительного обжига — температура 750 °C, продолжительность 2 ч.

Предложенная технологическая схема переработки ЦПЗ позволяет выделить в индивидуальные продукты серебро ($Ag \geq 98\%$) и концентрат родия ($Rh = 15\div 45\%$) с сохранением качества золота ($Au \geq 98\%$) и концентрата МПГ ($Pt \geq 45\%$, $Pd \geq 15\%$).

В качестве дальнейшего направления развития этой темы предполагаются проведение исследований по аффинажу концентрата родия, уточнение оптимальных условий его переработки и реализация технологии в промышленном масштабе.

Список литературы/References

- Nagai H., Shibata E., Nakamura T. Development of methods for concentration and dissolution of Rh and Ru from copper slime. *Hydrometallurgy*. 2017;169:282–289. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.01.004>
- Crundwell F.K., Moats M.S., Ramachandran V., Robinson T.G., Davenport W.G. Extractive metallurgy of nickel, cobalt and platinum group metals. Chapter 37. Refining of the platinum-group metals. Elsevier Ltd., 2011. P. 489–534. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63541-8>
- Nakhjiri A.T., Sanaeepur H., Amooghin A.E., Shirazi M.M.A. Recovery of precious metals from industrial wastewater towards resource recovery and environmental sustainability: A critical review. *Desalination*. 2022;527:115510. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115510>

4. Hayashibe Y. Reference module in chemistry, molecular sciences and chemical engineering. In: *Precious Metals*. Elsevier Ltd., 2005. P. 277–287.
5. Мастюгин С.А., Волкова Н.А., Набойченко С.С., Ласточкина М.А. Шламы электролитического рафинирования меди и никеля. Екатеринбург: УрФУ, 2013. 256 с.
6. Mulwanda J., Dorfling C. Recovery of dissolved platinum group metals from copper leach solutions by precipitation. *Minerals Engineering*. 2015;80:50–56. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.07.002>
7. Boduen A.Y., Fokina S.B., Polezhaev S.Yu. The hydrometallurgical pretreatment of a refractory gold sulfide concentrate. In: *Innovation-based development of the mineral resources sector: challenges and prospects: Proceedings of the 11th Russian-German raw materials conference (Potsdam, Germany, 7–8 Nov. 2018)*. London: CRC Press, 2018. P. 331–340. <https://doi.org/10.1201/9780429022388>
8. Королев А.А., Краюхин С.А., Мастюгин С.А., Гибадуллин Т.З., Лебедь А.Б. Способ получения серебра и металлов платиновой группы: Пат. 2680552 (РФ). 2018.
9. Zotova I.E., Fokina S.B., Boduen A.Ya., Petrov G.V. Sorption concentration of ruthenium from sulfuric solutions. *Non-Ferrous Metals*. 2019;(1):12–15. <https://doi.org/10.17580/nfm.2019.01.02>
10. Aghaei E., Alorro R.D., Encila A.N., Yoo K. Magnetic adsorbents for the recovery of precious metals from leach solutions and wastewater. *Metals*. 2017;7(12):529. <https://doi.org/10.3390/met7120529>
11. Александрова Т.Н., О'Коннор С. Переработка платинометаллических руд в России и Южной Африке: состояние и перспективы. *Записки Горного института*. 2020;244:462–473. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.9>
Aleksandrova T.N., O'Connor C. Processing of platinum group metal ores in Russia and South Africa: current state and prospects. *Journal of Mining Institute*. 2020;244:462–473. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.9>
12. Jacek Sitko. Analysis of selected technologies of precious metal recovery processes. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering* 2019;2(1):72–80. <https://doi.org/10.2478/mape-2019-0007>
13. Kobylanski A., Zhukova V., Petrov G., Boduen A. Challenges in processing copper ores containing sulfosalts. In: *Scientific and practical studies of raw material issues: Proceedings of the Russian-German raw materials dialogue: A collection of young scientists papers and discussion (19 Nov. 2019)*. London: CRC Press, 2020. P. 120–126. <https://doi.org/10.1201/9781003017226-18>
14. Лебедь А.Б., Мальцев Г.И., Мамяченков С.В. Аффинаж золотосеребряных сплавов на ОАО «Уралэлектромедь». Екатеринбург: УрФУ, 2015. 159 с.
15. Лебедь А.Б., Скороходов В.И., Кремко Е.Г., Волкова Н.А., Мастюгин С.А., Горяева О.Ю., Рычков Д.М. Способ выделения платиновых металлов: Пат. 2111272 (РФ). 1998.
16. Polvanov S., Ergashev N., Khodzhiev M., Tashmurtov A. Study of obtaining accompanying elements in the processing of gold-bearing ores of the muruntau deposit. *Universum: Engineering Sciences*. 2022;7(100):20–24. <https://doi.org/10.32743/UniTech.2022.100.7.14079>
17. Кононова О.Н., Мельников А.М., Борисова Т.В. Способ разделения платины (II, IV), родия (III) и никеля (II) в хлоридных растворах: Пат. 2527830 (РФ). 2010.
18. Гинзбург С.И., Езерская Н.А., Прокофьева И.В., Федоренко Н.В., Шленская В.И., Бельский Н.К. Аналитическая химия платиновых металлов. М.: Наука, 1972. 616 с.
19. Плеханов К.А., Ашихин В.В., Шевелева Л.Д., Лебедь А.Б., Краюхин С.А., Скопин Д.Ю. Способ выделения платиновых металлов: Пат. 2238244 (РФ). 2002.
20. Huang Z.S., Yang T.Z. Comparative study on refractory gold concentrate kinetics and mechanisms by pilot scale batch and continuous bio-oxidation. *Minerals*. 2021;11(12):1343. <https://doi.org/10.3390/min11121343>
21. Rinne M., Elomaa H., Seisko S., Lundstrom M. Direct cupric chloride leaching of gold from refractory sulfide ore: process simulation and life cycle assessment. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2021;43(5):598–609. <https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1910510>
22. Масленицкий И.Н., Чугаев Л.В. Металлургия благородных металлов. М.: Металлургия, 1987. 432 с.
23. Меретуков М.А., Орлов А.М. Металлургия благородных металлов. Зарубежный опыт. М.: Металлургия, 1991. 416 с.
24. Kepp K.P. Chemical causes of metal nobleness. *ChemPhysChem*. 2020;21(5):360–369. <https://doi.org/10.1002/cphc.202000013>
25. Федоров И.А. Родий. М.: Наука, 1966. 276 с.
26. Бимиш Ф. Аналитическая химия благородных металлов. Пер. с англ. под ред. С.И. Гинзбург. М.: Мир, 1969. 592 с.
27. Kunitomori K., Oyanagi H., Shindo H., Ishigaki T., Uchijima T. Structural transformation and catalytic behaviors of rhodium ternary oxides during calcination and reduction treatments. *Studies in Surface Science and Catalysis*. 1993;75:2039–2042. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(08\)64220-2](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(08)64220-2)

28. Šarić A., Popović S., Trojko R., Music S. The thermal behavior of amorphous rhodium hydrous oxide. *Journal of Alloys and Compounds*. 2001;320(1):140–148. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(01\)00938-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(01)00938-0)
29. Barclay G.A., Broadbent R.F., Kingston J.V., Scollary G.R. The thermal behaviour of some rhodium complexes. *Thermochimica Acta*. 1974;10(1):73–83. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(74\)85025-2](https://doi.org/10.1016/0040-6031(74)85025-2)
30. Ниценко А.В., Володин В.Н., Линник К.А., Тулеу-
тай Ф.Х., Бурабаева Н.М. Дистилляционное извле-
чение теллура из теллурида меди в оксидных фор-
мах. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2022;28(4):
45–54. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2022-4-45-54>
Nitsenko A.V., Volodin V.N., Linnik K.A., Tuleutay F.K.,
Burabaeva N.M. Distillation recovery of tellurium from
copper telluride in oxide forms. *Izvestiya. Non-Ferrous
Metallurgy*. 2022;28(4):45–54. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2022-4-45-54>

Информация об авторах

Яков Дмитриевич Зелях — вед. инженер-технолог
Исследовательского центра АО «Уралэлектромедь».
<https://orcid.org/0000-0003-0486-9363>
E-mail: zyad@elem.ru

Роман Сергеевич Воинков — к.т.н., начальник Исследо-
вательского центра АО «Уралэлектромедь»; доцент
кафедры металлургии Технического университета
Уральской горно-металлургической компании (УГМК).
<https://orcid.org/0000-0001-6697-1596>
E-mail: r.voinkov@elem.ru

Константин Леонидович Тимофеев — д.т.н., начальник тех-
нического отдела АО «Уралэлектромедь»; доцент кафе-
дры металлургии Технического университета УГМК.
<https://orcid.org/0000-0002-9525-6476>
E-mail: K.Timofeev@elem.ru

Геннадий Иванович Мальцев — д.т.н., ст. науч. сотрудник,
гл. специалист Исследовательского центра АО «Урал-
электромедь».
<https://orcid.org/0000-0002-0750-0070>
E-mail: mgi@elem.ru

Information about the authors

Yakov D. Zelyakh — Leading Process Engineer of the Research
Center of JSC «Uralelectromed».
<https://orcid.org/0000-0003-0486-9363>
E-mail: zyad@elem.ru

Roman S. Voinkov — Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research
Center of JSC «Uralelectromed»; Associate Professor
of the Department of Metallurgy of the Technical University
of the Ural Mining and Metallurgical Company (UMMC).
<https://orcid.org/0000-0001-6697-1596>
E-mail: r.voinkov@elem.ru

Konstantin L. Timofeev — Dr. Sci. (Eng.), Head of the Techni-
cal Department of JSC «Uralelectromed»; Associate Profes-
sor of the Department of Metallurgy of the Technical Univer-
sity of the UMMC.
<https://orcid.org/0000-0002-9525-6476>
E-mail: K.Timofeev@elem.ru

Gennady I. Maltsev — Dr. Sci. (Eng.), Senior Scientific Offi-
cer, Chief Specialist of the Research Center of JSC «Ural-
electromed».
<https://orcid.org/0000-0002-0750-0070>
E-mail: mgi@elem.ru

Вклад авторов

Я.Д. Зелях — формирование основной концепции, под-
готовка экспериментов, проведение экспериментов,
проведение расчетов, анализ результатов исследований,
подготовка текста статьи, формулировка выводов.

Р.С. Воинков — обеспечение ресурсами, формирование
основной концепции, постановка цели и задачи исследо-
вания, подготовка текста, формулировка выводов.

К.Л. Тимофеев — научное руководство, корректировка
текста, корректировка выводов.

Г.И. Мальцев — научное руководство, проведение расче-
тов, подготовка текста статьи.

Contribution of the authors

Ya.D. Zelyakh — formulated the main concept, prepared
the experiments, calculations, analysis of research results,
wrote the manuscript, formulated conclusions.

R.S. Voinkov — provided resources, formulated the main con-
cept, formulated the target and objective of the study, wrote
the manuscript, formulated conclusions.

K.L. Timofeev — scientific advising, revised the manuscript,
revised the conclusions.

G.I. Mal'tsev — scientific advising, calculations, wrote the ma-
nuscript.

Статья поступила в редакцию 27.12.2022, доработана 05.04.2023, подписана в печать 10.04.2023

The article was submitted 27.12.2022, revised 05.04.2023, accepted for publication 10.04.2023

УДК 621.74

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-38-53>

Научная статья

Research article



Эффективность многопоточных вычислений в системах компьютерного моделирования литейных процессов

В.Е. Баженов¹, А.В. Колтыгин¹, А.А. Никитина¹, В.Д. Белов¹, Е.А. Лазарев²

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1

² ПАО «ОДК-Кузнецов»
443009, Россия, г. Самара, ул. Заводское шоссе, 29

✉ Вячеслав Евгеньевич Баженов (V.E.Bagenov@gmail.com)

Аннотация: Применение систем компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) становится обязательным при разработке литейной технологии в авиации и других наукоемких областях техники. В связи с увеличением числа расчетных ядер в современных процессорах актуальным становится осуществление многопоточных вычислений. В работе оценивалась эффективность многопоточных вычислений при моделировании литейных процессов с помощью конечно-элементных СКМ ЛП «ProCast» и «ПолигонСофт», использующих архитектуры параллельных расчетов с распределенной (DMP) и общей (SMP) памятью соответственно. Для вычислений применяли компьютеры на базе платформ от компаний «Intel» и «AMD». Число расчетных потоков варьировали от 4 до 32. Эффективность оценивали по приросту скорости расчета заполнения и затвердевания отливки «ГП25» из сплава МЛ10, а также решения сложной задачи моделирования заполнения и затвердевания корпусных отливок из никелевого жаропрочного сплава с учетом радиационного теплообмена. Показано, что минимальное время расчета в СКМ ЛП «ProCast» наблюдается при использовании 16 вычислительных потоков. Причем это характерно для обеих вычислительных систем (на процессорах «Intel» и «AMD»), и увеличение числа потоков выше этого предела не имеет практического смысла. Снижение производительности в данном случае может быть связано с наличием малопроизводительных энергоэффективных ядер в случае применения системы на процессоре «Intel», а также полной загрузки физических ядер и уменьшением частоты ядер для системы на процессоре от «AMD». Распараллеливание задачи моделирования в СКМ ЛП «ПолигонСофт» менее эффективно, чем в СКМ ЛП «ProCast», вследствие реализации архитектуры с общей памятью. В то же время, несмотря на значительную разницу в эффективности распараллеливания, задача затвердевания отливки «ГП25» в СКМ ЛП «ПолигонСофт» и «ProCast» решается за достаточно близкое время.

Ключевые слова: компьютерное моделирование литейных процессов, многопоточные вычисления, ProCast, ПолигонСофт, SMP, DMP.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках постановления Правительства № 218 по соглашению о предоставлении субсидии № 075-11-2022-023 от 06.04.2022 г. «Создание технологии изготовления уникальных крупногабаритных отливок из жаропрочных сплавов для газотурбинных двигателей, ориентированной на использование отечественного оборудования и организацию современного ресурсоэффективного, компьютероориентированного литейного производства».

Для цитирования: Баженов В.Е., Колтыгин А.В., Никитина А.А., Белов В.Д., Лазарев Е.А. Эффективность многопоточных вычислений в системах компьютерного моделирования литейных процессов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(3):38–53. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-38-53>

The efficiency of multithreaded computing in casting simulation software

V.E. Bazhenov¹, A.V. Kolytgin¹, A.A. Nikitina¹, V.D. Belov¹, E.A. Lazarev²

¹ National University of Science and Technology «MISIS»
4 Leninskiy Prospekt, Moscow, 119049, Russia

² PJSC «UEC-Kuznetsov»
29 Zavodskoe Shosse, Samara, 443009, Russia

✉ Viacheslav E. Bazhenov (V.E.Bazhenov@gmail.com)

Abstract: The utilization of computer simulation software for casting process simulation is becoming essential in the advancement of casting technology in aviation and other high-tech engineering fields. With the increase in the number of computational cores in modern CPUs, the use of multi-threaded computations is becoming increasingly relevant. In this study, the efficiency of multi-threaded computations in modeling casting processes was evaluated using finite element method casting simulation software ProCast and PolygonSoft, which utilize parallel computing architectures with distributed (DMP) and shared (SMP) memory, respectively. Computations were performed on Intel and AMD-based computers, varying the number of computational threads from 4 to 32. The calculation efficiency was evaluated by measuring the calculation speed increase in the filling and solidification of GP25 castings made of ML10 alloy, as well as the complex task of filling and solidification modeling nickel superalloy casing castings with radiation heat transfer simulation. The results indicate that the minimum computation time in ProCast software is observed when using 16 computational threads. This pattern holds true for both computing systems (Intel and AMD processors), and increasing the number of threads beyond this point does not make a practical difference. The performance decrease in this scenario can be attributed to the low-performance energy-efficient cores in systems based on Intel processors or the decrease in core frequency and full loading of physical cores in systems based on AMD processors. Multi-threading the modeling task in PolygonSoft software is less efficient than in ProCast, which is a result of the shared-memory architecture used in PolygonSoft. Despite the significant difference in parallel efficiency, the task of GP25 casting solidification in both PolygonSoft and ProCast is solved in a time close enough to be considered sufficient.

Keywords: casting simulation, multithreaded computing, ProCast, PolygonSoft, SMP, DMP.

Acknowledgments: This research received financial support from the Ministry of Science and Higher Education in the Russian Federation (Agreement No. 075-11-2022-023 from 06 April 2022) under the program “Scientific and technological development of the Russian Federation” according to governmental decree No. 218 dated 9 April 2010.

For citation: Bazhenov V.E., Kolytgin A.V., Nikitina A.A., Belov V.D., Lazarev E.A. The efficiency of multithreaded computing in casting simulation software. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(3):38–53. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-38-53>

Введение

Развитие компьютерных технологий привело к применению математического моделирования в различных областях техники и технологии, в том числе и литейном производстве. Разработано множество систем компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП), помогающих успешно решать задачи, с которыми технологи-литейщики сталкиваются в повседневной практике. Сегодня математическое моделирование является обязательным этапом разработки литейной технологии, особенно в авиации и других наукоемких областях техники, способствуя уменьшению затрат на стадии подготовки производства.

Современные системы инженерного анализа (CAE — computer-aided engineering), и СКМ ЛП в том числе, поддерживают многопоточные вы-

числения, что позволяет значительно снизить длительность расчетов. На начальном этапе параллеливание вычислительной задачи осуществлялось с помощью распределенных вычислений, где «виртуальный суперкомпьютер» представлен в виде кластеров, соединенных посредством локальной сети (Grid computing, от английского grid — сеть). Сейчас же в большей степени используются облачные вычисления, реализуемые на удаленных суперкомпьютерах, или, гораздо чаще, вычисления на многоядерных пользовательских системах [1]. Это стало возможно благодаря прогрессу в области компьютерных наук, в частности за счет разработки все более эффективных процессоров, где применяются многоядерные вычислительные блоки [2]. Также интересным является направление, связанное с вычислениями на графических

процессорах, но для СКМ ЛП оно в данный момент не развито [3–5].

Традиционно параллельные вычисления можно разделить на два типа по аппаратной реализации: архитектуры с использованием распределенной памяти (DMP — distributed memory processing), где для каждого вычислительного ядра выделяется свой объем памяти, и архитектуры с общей памятью (SMP — shared memory processing), где все ядра имеют доступ к одной и той же общей памяти (рис. 1) [4; 6]. Управление передачей данных между вычислительными узлами осуществляется с помощью интерфейса передачи сообщений (MPI — message passing interface) [7].

Сравнение архитектур SMP и DMP показывает, что последняя (DMP) более эффективна. Так, в работе [8] оценивали эффективность параллельных вычислений задачи моделирования псевдокипящего слоя. При реализации архитектуры SMP прирост скорости для 32 вычислительных потоков в сравнении с одним потоком оказался 14-кратным, в то время как DMP-архитектура позволила получить в аналогичных условиях 27-кратный прирост, что очень близко к теоретически возможному значению, равному 32.

Чаще всего суммарное увеличение скорости вычислений меньше, чем сумма производительности отдельных ядер [9]. В программе моделирования процессов сварки и термообработки SYSWeld (ESI Group) DMP-архитектура позволила при использовании 8 потоков получить 5-кратное повышение скорости расчета [10]. Но при дальнейшем увеличении числа потоков эффективность распараллеливания задачи снизилась. Так, в случае

32 потоков прирост производительности составил всего 9 крат, и она оказалась практически в 4 раза меньше теоретически возможной. В работе [11] с помощью программного обеспечения для инженерного моделирования ANSYS (ANSYS, Inc.) моделировали литые пластмассы с использованием от 1 до 4 вычислительных потоков. Повышение производительности составило 1,5–2,1 крат для двух потоков и 3,1–3,4 крат — для четырех. При решении различных задач моделирования в ANSYS 17 с помощью различного количества потоков (до 28) было показано, что для большинства рассмотренных задач рост производительности происходит до момента участия 16 потоков [12]. Дальнейшее увеличение числа потоков практически никак не влияет на производительность, а в некоторых задачах даже приводит к ее снижению. В целом полученный прирост производительности далек от теоретически возможного, так как в среднем не превышает 7 крат при использовании 28 потоков. В работе [5] при моделировании в программе для решения задач механики деформируемого твердого тела, механики жидкости и газа, а также теплопереноса LS-DYNA (ANSYS, Inc.) было получено 6-кратное повышение скорости расчета при наличии 8 потоков.

Не всегда скорость вычислений определяется производительностью процессора и количеством вычислительных потоков. В работе [12] показано, что при замене жесткого диска HDD на твердотельный накопитель SATA SSD наблюдается 4-кратный прирост производительности, а с применением более быстрого NVME SSD-накопителя — 7-кратный. Увеличение объема оперативной памяти также способствует приросту производи-

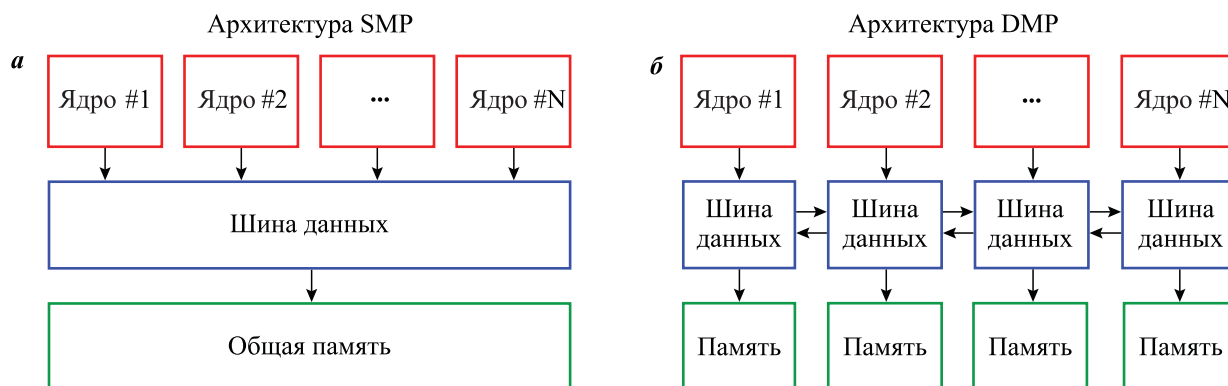


Рис. 1. Архитектуры параллельных вычислений по принципу SMP (а) и DMP (б)

Fig. 1. Schemes of parallel computing based on the SMP (a) and DMP (б) architectures

тельности, но не столь значительному. Данные по влиянию количества элементов в расчетной сетке на повышение скорости расчета неоднозначны [11].

Есть примеры осуществления параллельных расчетов и в СКМ ЛП. Так, в работе [13] с помощью компьютерных кластеров, соединенных с помощью локальной сети, решалась задача моделирования процесса непрерывного литья слитков с использованием программы «ProCast» (ESI Group). Было установлено, что размер сетки не оказывает значительного влияния на эффективность распараллеливания расчетов. Основываясь на результатах, касающихся эффективности организации параллельных вычислений, показано, что решатель «ProCAST» имеет низкие затраты вычислительных мощностей на связь и синхронизацию вычислительных потоков, поскольку его эффективность для 8 вычислительных потоков падает всего до 70 % от теоретически возможного по сравнению с однопоточным вычислением. В работе [2] также моделировали непрерывную разливку слитка в программе «ProCast 2013.5». Применяли как распределенные вычисления по сети, так и облачную вычислительную платформу. Было показано, что использование 2, 4 и 8 потоков позволило снизить время расчета соответственно на 71, 219 и 421 % в сравнении с однопоточным вариантом расчета. То есть с увеличением числа потоков прирост производительности снижается. Авторы [2] указывают, что это вызвано растущими затратами на связь, возникающими из-за необходимости обмена информацией между отдельными процессами решателя.

Таким образом, распараллеливание расчетов, в том числе при решении задач в СКМ ЛП, позволяет значительно повысить их эффективность путем снижения затрачиваемого на них времени. К сожалению, работы [2] и [13] были написаны в 2014–2015 гг., и на сегодняшний день возможности параллельных вычислений значительно выросли за счет появления многоядерных процессоров, способных работать на 32 и более потоках.

При моделировании литейных процессов наиболее часто применяют следующие методы численного решения: метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР) и метод конечных объемов (МКО). МКР (а также МКО) существенно уступает МКЭ по адекватности (достоверности) решения, требуемым ресурсам вычислительной техники, скорости расчетов, возможности эффективно организовать анализ решения после расчетов [14]. В связи с этим в данной работе ис-

пользовали СКМ ЛП, где для решения задачи моделирования применяется МКЭ.

Целью настоящей работы являлся сравнительный анализ эффективности многопоточных вычислений при моделировании литейных процессов с помощью СКМ ЛП «ProCast» [15; 16] и «ПолигонСофт» [17–19], использующих МКЭ и архитектуры параллельных расчетов DMP и SMP соответственно [13].

Материалы и методика исследования

Моделирование процессов заполнения и затвердевания производили в системах компьютерного моделирования литейных процессов «ProCast 2022» (ESI Group, Франция) и «ПолигонСофт 2022» (СиСофт, Россия). Определяли время выполнения задачи моделирования, варьируя количество расчетных потоков. В СКМ ЛП «ProCast» для расчета заполнения и затвердевания используется метод конечных элементов. При расчете затвердевания теплопередача вычисляется с помощью уравнения теплопроводности Фурье с учетом выделения теплоты кристаллизации. Расчет заполнения формы расплавом происходит с помощью уравнения Навье—Стокса. При расчете заполнения применяется ньютоновская модель вязкости с алгоритмом движения свободной поверхности, определяемым импульсом, учитывающая сохранение массы [20]. Дополнительная информация и уравнения представлены в работах [21–23]. В СКМ ЛП «ПолигонСофт» расчет затвердевания происходит также с использованием метода конечных элементов и решения уравнения Фурье [24].

Вычисления производили на двух компьютерах, первый из которых был собран на базе платформы от компании «Intel» (США), а второй — на базе платформы от компании «AMD» (США). Характеристики компьютеров представлены в табл. 1. Количество расчетных потоков для системы на базе платформы «Intel» задавали равным 4, 8, 12, 16, 20 и 24, а для системы на платформе от «AMD» — 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28 и 32. Во время решения задач моделирования контролировали температуру процессоров — она была ниже предельной, и троттлинга (сброса частоты работы процессора при его перегреве) не наблюдалось. При работе компьютера часть вычислительных ресурсов расходуется на работу операционной системы (ОС) и фоновых программ. Предполагается, что для используемых в работе компьютеров влияние ОС незначительно, так как процессоры имеют большое число вычис-

Таблица 1. Комплектующие, используемые при сборке компьютеров для моделирования

Table 1. Hardware of computers used for simulation

Наименование	Система на платформе «Intel»	Система на платформе «AMD»
Процессор	Intel Core I9 12900KF (16 ядер, 24 потока)	AMD Ryzen 9 5950X (16 ядер, 32 потока)
Материнская плата	Gygabyte Gaming X (LGA1700, Z690)	MSI MAG Torpedo (AM4, X570)
Оперативная память	Kingston DIMM DDR5 5200 МГц, CL40, 64 Гб (2 планки)	Kingston DIMM DDR4, 3600 МГц, CL18, 64 Гб (2 планки)
Система охлаждения	Система жидкостного охлаждения NZXT Kraken X73	Система воздушного охлаждения ID-Cooling SE-207 XT
Твердотельный накопитель	Samsung 980 Pro, M.2 NVME, 1000 Гб	Samsung 970 EVO, M.2 NVME, 500 Гб

лительных ядер, объем оперативной памяти для работы ОС избыточен и, что немаловажно, система работает на быстрых SSD M.2 NVME твердотельных накопителях. Также во время проведения расчетов на компьютерах не запускали сторонних приложений, чтобы минимизировать их влияние на время выполнения расчетов.

Большая часть вычислений производилась для отливки «ГП25», изготавливаемой из магниевого сплава МЛ10 в формах из холоднотвердеющей смеси на фурановой основе с чугунными холодильниками. Отливка представляет собой тонкостенную корпусную деталь, ее конфигурация представлена в работе [25]. Теплофизические свойства сплава МЛ10 рассчитывали с помощью термодинамической базы программы «ProCast» для условий неравновесной кристаллизации по модели Шейля—Гулливера, а свойства чугунных холодильников брали из базы данных программы «ProCast». Теплофизические характеристики холоднотвердеющей смеси были взяты из работы [26], коэффициент теплопередачи между отливкой и формой — из работы [27], а между отливкой и холодильниками — из работы [28]. Время заполнения формы металлом было задано равным 40 с. Температура заливки расплава и температура формы составляли 720 и 20 °С соответственно. Время выполнения задачи моделирования заполнения формы расплавом и задачи моделирования затвердевания отливки определяли по отдельности, так как в первом случае количество задействованных элементов расчетной сетки меняется по ходу процесса заполнения, а во втором — является постоянным. Предположительно, это может влиять на длительность выполнения расчета при различном числе задействованных потоков.

Моделировали заполнение и затвердевание трех крупногабаритных корпусных отливок (диа-

метром от 705 до 1136 мм) из никелевого жаропрочного сплава ВЖЛ14Н-ВИ в керамических формах методом литья по выплавляемым моделям. В данном случае процесс расчета был многостадийным, включающим в себя охлаждение литейного блока в печи перед заливкой, заливку расплава в форму и последующее охлаждение. Также в процессе расчета учитывался радиационный теплообмен. Данные отливки моделировали с целью определения эффективности распараллеливания сложной многостадийной задачи моделирования. Теплофизические свойства сплава ВЖЛ14Н-ВИ рассчитывали с помощью термодинамической базы программы «ProCast» для условий неравновесной кристаллизации по модели Шейля—Гулливера. Теплофизические характеристики керамики, из которой изготавливалась форма, стальных элементов конструкции печи, утеплителя, а также подушки, на которую устанавливалась форма, были взяты из базы данных материалов программы «ProCast». Граничные условия также брали из базы данных этой программы, используя настройки (Workflow) для процесса литья по выплавляемым моделям. Температура заливки расплава и начальная температура формы составляли 1450 и 950 °С соответственно.

Расчетную сетку генерировали в генераторе сеток «Visual Mesh» (модуль программы «ProCast»). Эта же сетка использовалась и для моделирования в программе «ПолигонСофт». Для отливки ГП25 генерировали сетку с различными заданными расстояниями между опорными точками, используемыми при генерации 2D-сетки. Эти расстояния, которые обычно называют размером расчетного элемента, были заданы равными 3, 4, 5, 6, 8 и 10 мм. Расчетные сетки, построенные с такими размерами расчетных элементов, далее будут обозначаться L3, L4, L5, L6, L8 и L10 соответственно. При этом

Таблица 2. Характеристики сеточных моделей, использованных для моделирования

Table 2. The mesh parameters used for simulation

Отливка	Размер элемента сетки, заданный при ее генерации, мм			Количество расчетных 3D-элементов, млн шт.
	Отливка	Прибыль	Форма	
ГП25 (L10)	10	20	50	0,73
ГП25 (L8)	8	16	40	0,98
ГП25 (L6)	6	12	30	1,62
ГП25 (L5)	5	10	25	2,35
ГП25 (L4)	4	8	20	3,82
ГП25 (L3)	3	6	15	7,37
Корпус 1	3–70	3–70	3–70	7,32
Корпус 2	3–70	3–70	3–70	3,52
Корпус 3	3–70	3–70	3–70	4,94

для прибыли и формы размер элемента отливки увеличивали в 2 и 5 раз соответственно (см. табл. 2). Таким образом, для сеток размерами L3–L10 количество расчетных тетраэдральных элементов составило от 7,37 до 0,73 млн элементов.

Что же касается расчетной сетки для крупногабаритных корпусных отливок из никелевого жаропрочного сплава ВЖЛ14Н-ВИ, то размер элементов варьировался от 3 мм для отливки до 70 мм для пространства печи.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены время расчета заполнения отливки ГП25 в программе «ProCast» на платформах «Intel» и «AMD» и прирост скорости расчета в процентах в зависимости от количества потоков, задействованных в расчете. Результаты показаны для элементов расчетной сетки размером L3–L10.

При использовании компьютера на платформе «Intel» (рис. 2, а) можно видеть, что кривая времени расчета имеет минимум, который наблюдается для всех использованных расчетных сеток, независимо от количества расчетных элементов в них. Минимальное время расчета отмечено в случае 16 потоков. Дальнейшее расширение числа расчетных потоков до 20 и 24 не только не приводит к снижению времени расчета, но даже увеличивает его. Оно повышается также при возрастании числа элементов в расчетной сетке.

Прирост скорости расчета, представленный на рис. 2, б, позволяет судить о том, что при использовании 8 потоков вместо 4 он составляет 66–77 %, а для 16 потоков — равен 144–172 %.

В большинстве случаев больший прирост производительности наблюдается для сетки с меньшим размером расчетных элементов и большим их количеством соответственно. Штрихпунктирная линия на графике показывает максимальный теоретический прирост производительности, как если бы увеличение производительности при использовании N расчетных потоков было бы равно производительности одного потока, умноженной на N . Таким образом, максимальное теоретическое повышение производительности в случае 8 и 16 потоков должно составлять 100 и 300 % соответственно. Можно видеть, что с увеличением числа расчетных потоков отклонение прироста производительности от теоретически возможного становится все больше, а при их количестве выше 16 (20 и 24) происходит снижение производительности.

С одной стороны, уменьшение эффективности расчета при повышении числа потоков наблюдалось и в других работах для расчетов в совершенно различных программах [2; 5; 8; 10–13], но с другой стороны, проявление этого обстоятельства после порога в 16 расчетных потоков выглядит несколько странно. Чтобы понять возможные причины снижения производительности при использовании более чем 16 расчетных потоков, следует рассмотреть особенности применяемого процессора «Intel I9 12900KF». Известно, что в этом процессоре имеются 8 высокопроизводительных ядер (обозначаются Р, от слова performance — производительный) и 8 энергоэффективных ядер (обозначаются Е, от слова efficient — эффективный). Ядра Р, в свою очередь, способны делить расчет на 2 потока, и таким обра-

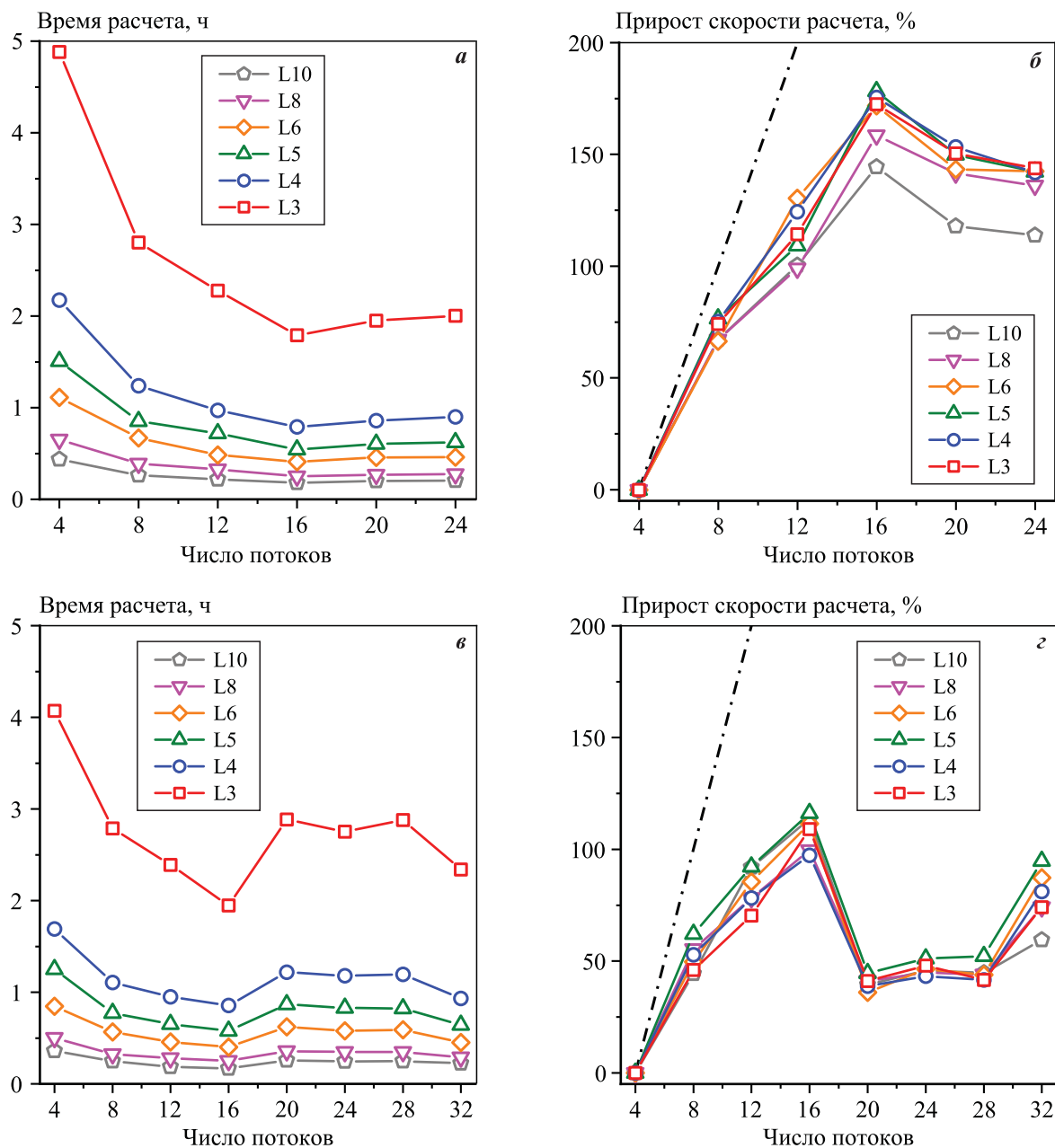


Рис. 2. Длительность расчета заливки отливки «ГП25» в программе «ProCast» (**а, в**) и прирост скорости расчета (**б, г**) в зависимости от количества потоков, задействованных в расчете при использовании компьютеров на базе платформ «Intel» (**а, б**) и «AMD» (**в, г**) и расчетных сеток L3–L10 (см. табл. 2)

Fig. 2. The calculation time of GP25 casting filling in ProCast (**a, v**) and the calculation speed growth (**b, g**) depending on the number of threads involved in the calculation, when using computers based on the platforms from Intel (**a, b**) and AMD (**v, g**) and L3–L10 simulation meshes (see Table 2)

зом суммарно обеспечивается 16 Р и 8 Е потоков. Производительность ядер Р значительно больше производительности ядер Е.

В табл. 3 представлены количество задействованных логических ядер в зависимости от выбранного числа потоков для расчета и их рабочая частота. Частоту определяли по прошествии

5 мин после запуска задачи. Можно видеть, что в случае 4 расчетных потоков используются как производительные Р-ядра, так и малопроизводительные энергоэффективные ядра. Также следует отметить, что даже при расчете с 4 потоками задействуются 12 производительных логических ядер и 7 энергоэффективных, т.е. большинство ядер. Это

Таблица 3. Задействованное в расчете количество потоков, загрузка ядер и частота

Table 3. The number of threads involved in the calculation, cores load and frequency

Количество потоков	Intel					AMD				
	Ядра Р		Ядра Е		Частота ядер Р/Е, ГГц	CCX #0		CCX #1		Частота ядер, ГГц
	Кол-во (16 макс.)	Загрузка, %	Кол-во (8 макс.)	Загрузка, %		Кол-во (16 макс.)	Загрузка, %	Кол-во (16 макс.)	Загрузка, %	
4	12	13	7	25	4,9–5,0 / 3,7–3,9	16	13	11	13	4,63
8	9	36	5	23	4,9 / 3,7	16	26	14	25	4,58
12	11	49	8	46	4,9 / 3,7	16	51	8	25	4,41
16	16	100	0	0	4,9 / 3,7–3,9	16	53	16	51	4,30
20	16	100	4	50	4,9 / 3,7	16	100	4	26	4,42
24	16	100	8	100	4,9 / 3,7	16	100	8	52	4,31
28	—	—	—	—	—	16	100	12	76	4,19
32	—	—	—	—	—	16	100	16	100	4,08

реализуется путем переброски задачи между логическими ядрами, так как физическое Р-ядро состоит из 2 логических ядер. Только при использовании 4 расчетных потоков частота отдельных физических ядер поднимается до 5 и 3,9 ГГц (для ядер Р и Е соответственно). Именно с этим может быть связан высокий и достаточно близкий к теоретически возможному прирост производительности в случае небольшого числа расчетных потоков. В то же время следует отметить, что применение в расчете энергоэффективных ядер является нецелесообразным, так как их производительность ниже, чем у производительных ядер, а значит, после распределения узлов сетки между ядрами шаг расчета будет выполнен быстрее на производительных ядрах и они будут находиться в ожидании выполнения расчетов на энергоэффективных ядрах.

При использовании 8 и более расчетных потоков частоты ядер фиксируются на уровне 4,9 и 3,7 ГГц соответственно для Р и Е ядер. Можно видеть, что число задействованных ядер меняется достаточно произвольно, но в целом их загруженность растет. Интерес представляет решение задачи с выбором 16 потоков, так как в этом случае нагружаются только производительные Р-ядра. При этом режиме работы производительность является максимальной (см. рис. 2, а, б). Дальнейшее увеличение числа потоков приводит к повышению длительности расчета, что связано как с использованием энергоэффективных Е-ядер, так и с отсутствием переброски задач между логическими ядрами. Например, при 20-поточном расчете загрузка энергоэффективных логических ядер составляет 50 %. При этом работают именно

4 энергоэффективных ядра из 8, загрузка остальных энергоэффективных ядер составляет 0 %.

В случае использования компьютера на платформе «AMD» (см. рис. 2, в) можно видеть, что кривая, показывающая время расчета в зависимости от числа потоков, так же, как и в случае применения системы на платформе «Intel», имеет минимум при числе потоков 16. Интересно то, что при различной архитектуре процессоров максимальная производительность в обоих случаях достигается именно при реализации процесса моделирования на 16 потоках. Дальнейшее увеличение числа расчетных потоков более 20 приводит к катастрофическому росту времени расчета. Так, например, длительность расчета для 8 потоков оказалась меньше, чем при 20 потоках.

Прирост скорости расчета для системы на базе процессора «AMD» представлен на рис. 2, г. Можно видеть, что при использовании 8 потоков вместо 4 он составляет 44–62 %, а в случае 16 потоков — равен 97–116 %. То есть для системы на процессоре «AMD», в сравнении с системой «Intel», прирост производительности при увеличении числа потоков значительно ниже. Какой-то взаимосвязи между приростом скорости расчета и размером сетки найти не удалось. С увеличением числа расчетных потоков график прироста скорости расчета все больше отклоняется от штрихпунктирной линии, показывающей максимальный теоретический прирост производительности. При повышении количества расчетных потоков до 20 и более наблюдается значительное снижение производительности. Какой-то взаимосвязи между приростом скорости расчета и размером сетки найти не удалось.

Архитектура процессора AMD 5950X представляет собой 2 комплекса ядер CCX (core complex), каждый из которых содержит 8 физических (16 логических) ядер (в табл. 3 они обозначены CCX #0 и CCX #1). В этом есть некая схожесть с рассмотренным ранее процессором «Intel», а именно наличие двух отдельных комплексов ядер. Но в отличие от системы «Intel», где есть комплекс производительных и энергоэффективных ядер, комплексы в процессоре от «AMD» идентичны.

В табл. 3 представлено количество задействованных логических ядер в зависимости от выбранного числа потоков для расчета при использовании системы на процессоре «AMD». Можно видеть, что в случае 4 расчетных потоков применяются оба CCX-комплекса и, как и в случае процессора «Intel», задействуется большинство логических ядер вследствие переброски задачи между ними. За счет этого физические ядра могут работать на достаточно высокой частоте 4,63 ГГц. Здесь и далее речь идет о средней частоте, так как для процессора от «AMD» частота ядер во время расчета изменяется в значительных пределах. При использовании 8 и 12 потоков частота снижается до 4,58 и 4,41 ГГц соответственно, что сказывается на уменьшении эффективности параллельного расчета. Также можно видеть, что при 12 потоках появляется неравномерность распределения нагрузки между CCX-комплексами, что также может приводить к снижению скорости расчета. Для режима с 16 потоками и наблюдаемой максимальной производительностью характерна 50 %-ная загрузка CCX-комплексов с одновременным использованием всех имеющихся логических ядер. Средняя частота при этом уменьшается до 4,3 ГГц. При увеличении числа потоков до 20 заметна явная асимметрия в нагружении CCX-блоков. Первый загружен на 100 %, что не дает возможности перебрасывать задачи между логическими ядрами, а второй загружен всего на 25 %. Также можно видеть, что несмотря на неполную загруженность комплекса CCX #1 переброска задач между логическими ядрами не происходит. При этом средняя частота даже немного возрастает в сравнении с вариантом расчета, где использовано 16 потоков.

Дальнейшее увеличение числа потоков приводит к снижению средней частоты процессора, которая при использовании всех потоков уменьшается до 4,08 ГГц. Таким образом, провал в производительности при использовании 20 и более потоков связан с неравномерным распределением нагрузки между CCX-комплексами и снижением частоты ядер процессора. При этом снижается

эффективность переброски задач между логическими ядрами, так как достигается предел по физическим ядрам, которых в процессоре всего 16. Также одной из возможных причин может быть кэш (внутренняя быстрая память) процессора. Если одно физическое ядро выполняет вычисления для двух потоков, кэш для этих потоков общий, и при большом объеме команд и данных он может не содержать нужной информации, что увеличивает число обращений к оперативной памяти.

На рис. 3 показано время расчета затвердевания отливки «ГП25» в программе «ProCast» на платформах «Intel» и «AMD», а также прирост скорости расчета в зависимости от количества потоков, задействованных в расчете. Можно видеть, что закономерности изменения длительности расчета и прироста скорости в этом случае такие же, как и при расчете заполнения. Единственное отличие заключается в том, что само время расчета затвердевания меньше.

Прирост скорости расчета при увеличении числа потоков с применением платформы «Intel» представлен на рис. 3, б. В случае 8 потоков вместо 4 он составляет 73–90 %, а для 16 потоков вместо 4 прирост равен 182–197 %. То есть для задачи затвердевания использование многопоточности является немного более эффективным, чем для задачи заполнения. Аналогичный результат наблюдается и при решении задачи с помощью компьютера на базе процессора от «AMD». Это может быть связано с тем, что в задаче затвердевания распределение узлов между потоками постоянно, в отличие от задачи заполнения с расходом части процессорного времени на перераспределение узлов между потоками.

На рис. 4 показано время расчета затвердевания отливки «ГП25» в программе «ПолигонСофт» с помощью компьютера на платформе «Intel», а также прирост скорости расчета в зависимости от количества задействованных потоков для расчетных сеток L3–L10.

С увеличением числа потоков длительность расчета уменьшается и ее минимум наблюдается при использовании 24 потоков. Но в то же время хорошо видно, что чем больше потоков задействовано, тем меньше прирост скорости расчета (рис. 4, б), который составляет 23–38 % в случае 8 потоков вместо 4 и 34–65 % — для 24 потоков. Таким образом, повышение числа расчетных потоков больше 8 практически не имеет смысла, так как прирост производительности при этом минимален. Также можно видеть, что с уменьшением размера сетки и увеличением числа расчетных

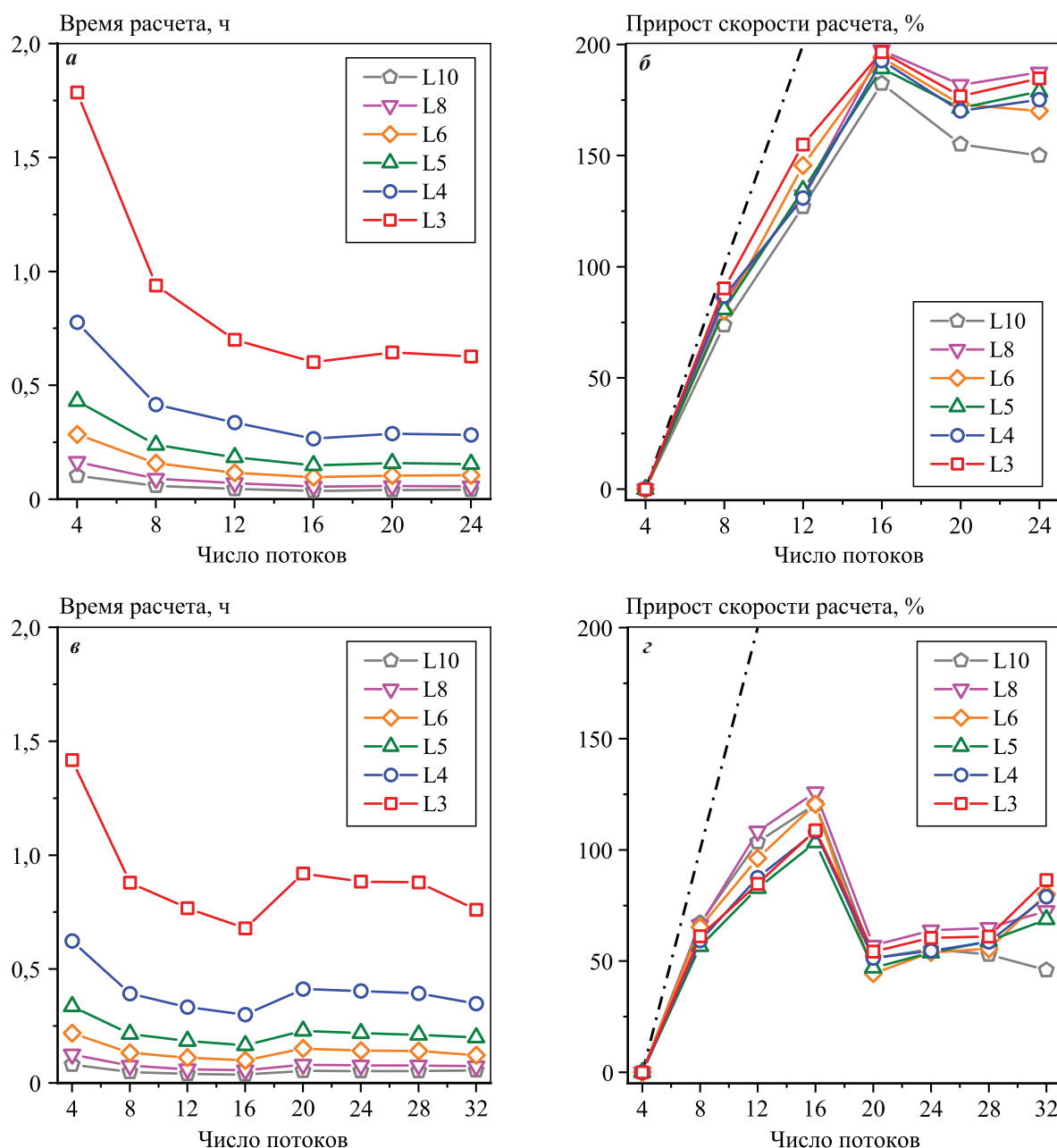


Рис. 3. Длительность расчета затвердевания отливки «ГП25» в программе «ProCast» (а, в) и прирост скорости расчета (б, г) в зависимости от количества потоков, задействованных в расчете при использовании компьютеров на базе платформ «Intel» (а, б) и «AMD» (в, г) и варьировании размера элементов расчетных сеток L3–L10 (см. табл. 2)

Fig. 3. The calculation time of GP25 casting solidification in ProCast (а, в) and the calculation speed growth (б, г) depending on the number of threads involved in the calculation, when using computers based on the platforms from Intel (а, б) and AMD (в, г) and L3–L10 simulation meshes (see Table 2)

элементов соответственно наблюдается почти двукратный прирост производительности.

Как и в случае с программой «ProCast», необходимо разобраться, насколько загружен процессор, чтобы понять возможные причины снижения производительности и неэффективного распараллеливания задачи моделирования. К сожалению,

понять, как именно ядра задействуются при решении задачи с различным количеством потоков, практически невозможно, так как СКМ ЛП «ПолигонСофт» использует архитектуру SMP и в менеджере задач отображается один единственный процесс вне зависимости от числа задействованных потоков. Единственная доступная инфор-

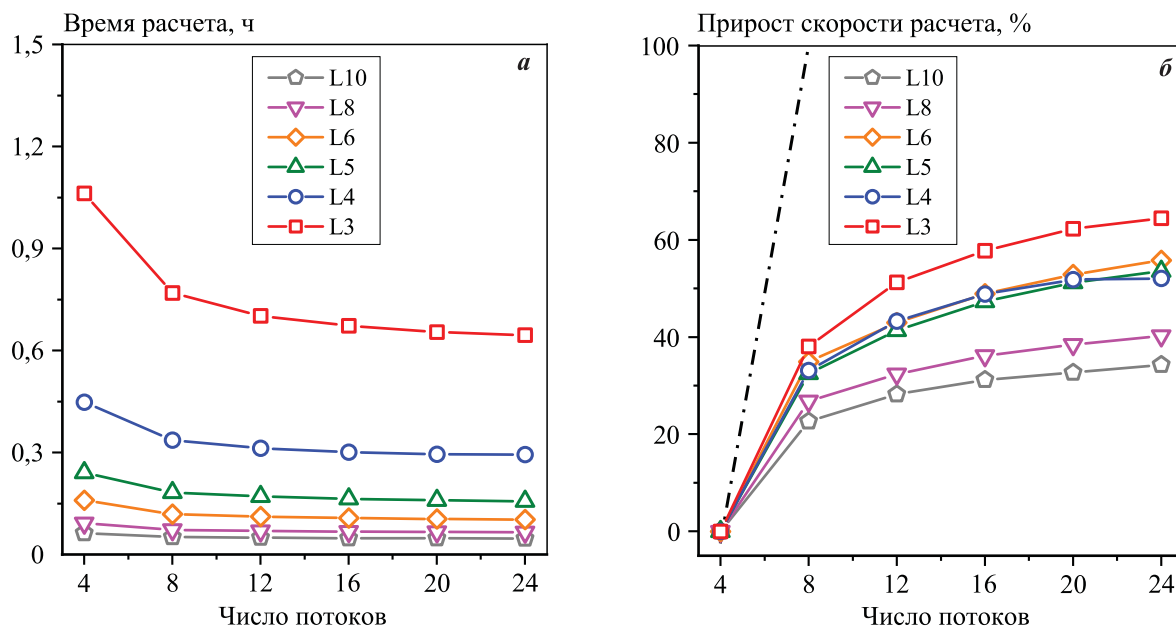


Рис. 4. Длительность расчета затвердевания отливки «ГП25» в программе «ПолигонСофт» (а) и прирост скорости расчета (б) в зависимости от количества потоков, задействованных в расчете при использовании компьютера на базе платформы «Intel» и варьировании размера элементов расчетных сеток L3–L10 (см. табл. 2)

Fig. 4. The calculation time of GP25 casting solidification in PolygonSoft software (a) and the calculation speed growth (b) depending on the number of threads involved in the calculation, when using computer based on Intel platform and L3–L10 simulation meshes (see Table 2)

мация — загрузка логических ядер процессора этим процессом в процентах для различного типа ядер (Р и Е). В случае 4 потоков загружены только Р-ядра, и эта загрузка меняется в пределах 10–22 %, причем следует отметить, что 22 % — это пиковое значение, которое достигается раз в несколько секунд. Большую часть времени загрузка ближе к 10 %. При увеличении числа потоков до 12 загружены как Р-ядра (20–37 %), так и Е-ядра (10–21 %). При максимальном числе потоков загрузка Р и Е ядер одинакова и составляет 20–60 %. Очевидно, что при проведении расчета затвердевания в программе «ПолигонСофт» процессор сильно недогружен — причиной этого является использование менее эффективной архитектуры распараллеливания с общей памятью (SMP) вместо применяемой в программе «ProCast» DMP-архитектуры, где каждому логическому ядру выделяется определенный объем памяти.

На рис. 5 показаны длительность расчета задачи заполнения и затвердевания отливок «Корпус» (см. табл. 2) в программе «ProCast» и прирост скорости расчета в зависимости от количества потоков, задействованных в расчете при использовании компьютеров на базе платформы от «Intel» и «AMD». Отличие данного расчета заключается в

том, что здесь рассчитывалось охлаждение формы перед заливкой металла, а также учитывался радиационный теплообмен. Закономерности, отмеченные ранее для отливки «ГП25», также прослеживаются и для отливок «Корпус». Максимальная производительность наблюдается при использовании 16 вычислительных потоков для обеих систем («Intel» и «AMD»). Сравнение платформ показывает, что при выборе 4 потоков расчеты на процессоре «AMD» немного эффективнее, но если число потоков больше 8 — эффективнее система на процессоре «Intel». Скорее всего, более высокая производительность системы на процессоре «Intel» связана с более высокой рабочей частотой производительных ядер, а также применением оперативной памяти стандарта DDR5, а не DDR4, как в компьютере, собранном на платформе от «AMD». Что же касается меньшей производительности системы «Intel» при числе вычислительных потоков, равном 4, то вероятная причина может заключаться в том, что задача в значительной степени решается на малопроизводительных энергоэффективных (Е) ядрах (см. табл. 3). При увеличении числа потоков более 8 система на платформе «Intel» начинает в большей степени задействовать производительные ядра, а в системе на «AMD»

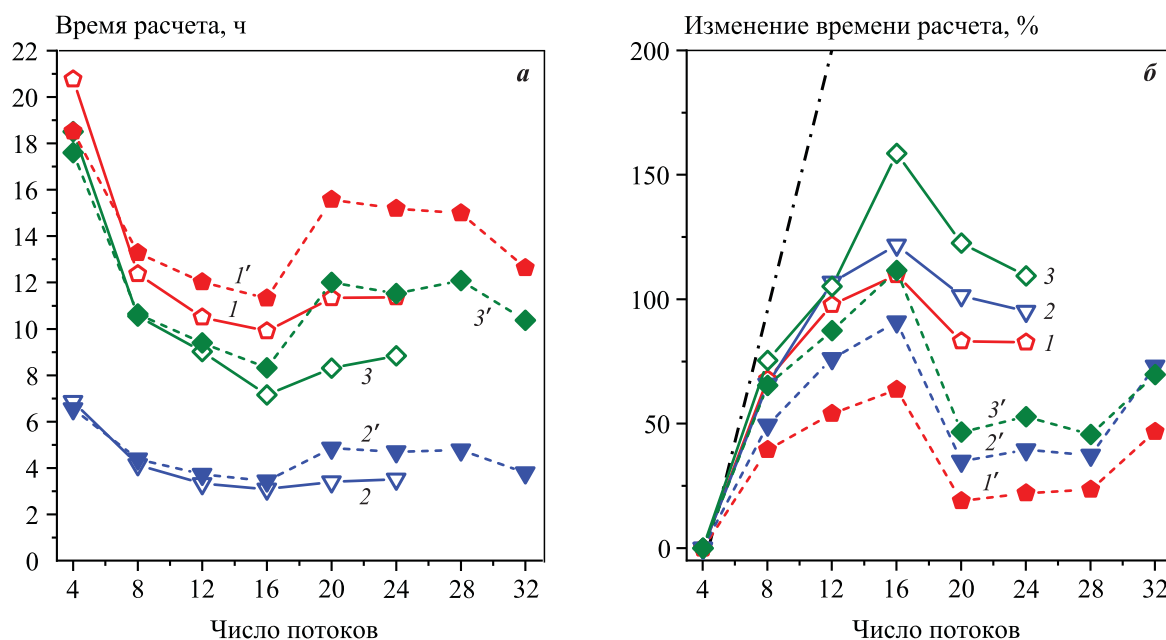


Рис. 5. Длительность расчета заполнения и затвердевания отливок «Корпус» (см. табл. 2) в программе «ProCast» (а) и прирост скорости расчета (б) в зависимости от количества потоков, задействованных в расчете при использовании компьютеров на базе платформ «Intel» (пустые точки 1–3) и «AMD» (закрашенные точки 1'–3') 1, 1', 2, 2', 3, 3' – номера отливок «Корпус»

Fig. 5. The calculation time of “body” castings filling and solidification in ProCast (a) and the calculation speed growth (б) depending on the number of threads involved in the calculation, when using computers based on the platforms from Intel (open points 1–3) and AMD (filled points 1'–3')

1, 1', 2, 2', 3, 3' – numbers of castings “Body”

происходит постепенное падение частоты работы физических ядер. В расчетах для отливки «ГП25» не удалось увидеть четкого влияния размера сетки на эффективность распараллеливания задачи моделирования. Для отливок «Корпус» зависимость между количеством элементов в сетке и приростом производительности также не прослеживается.

На рис. 6 представлены длительность расчета затвердевания отливки «ГП25» в программах «ProCast» и «ПолигонСофт» и прирост скорости расчета в зависимости от количества потоков, задействованных в расчете с помощью компьютеров на базе платформ «Intel» и «AMD». Расчет проводили для сетки L3 с минимальным размером и максимальным количеством элементов (см. табл. 2). При сравнении длительности расчета в СКМ ЛП «ProCast» можно видеть, что, в отличие от результатов для отливок «Корпус», система на процессоре «AMD» эффективнее при использовании 4 и 8 потоков, а при большем числе потоков меньшую длительность расчета обеспечивает система на процессоре «Intel». Возможные причины этой разницы изложены при описании результатов для отливок «Корпус». Но в целом можно сделать вывод

о том, число расчетных потоков, при котором одна система может опережать другую, может меняться в зависимости от задачи. Следует отметить, что задача затвердевания отливки «ГП25» в программе «ПолигонСофт» при малом числе потоков решается быстрее, чем в программе «ProCast». В случае применения 16 потоков задача решается быстрее в программе «ProCast», если используется система на процессоре «Intel».

Следует пояснить, что сравнение скорости расчета в СКМ ЛП «ПолигонСофт» и «ProCast» является лишь оценочным и позволяет сориентировать пользователя в вопросе времени вычислений похожих задач в этих программах. На точность такое сравнение не может претендовать, поскольку алгоритмы расчета и набор получаемых результатов для этих программ не одинаковы. В целом можно сделать вывод о том, что время, затрачиваемое на расчет затвердевания одной и той же отливки в программах СКМ ЛП «ProCast» и «ПолигонСофт», примерно одинаково.

В заключение можно сказать, что, несмотря на снижающуюся эффективность распараллеливания задачи моделирования с увеличением числа

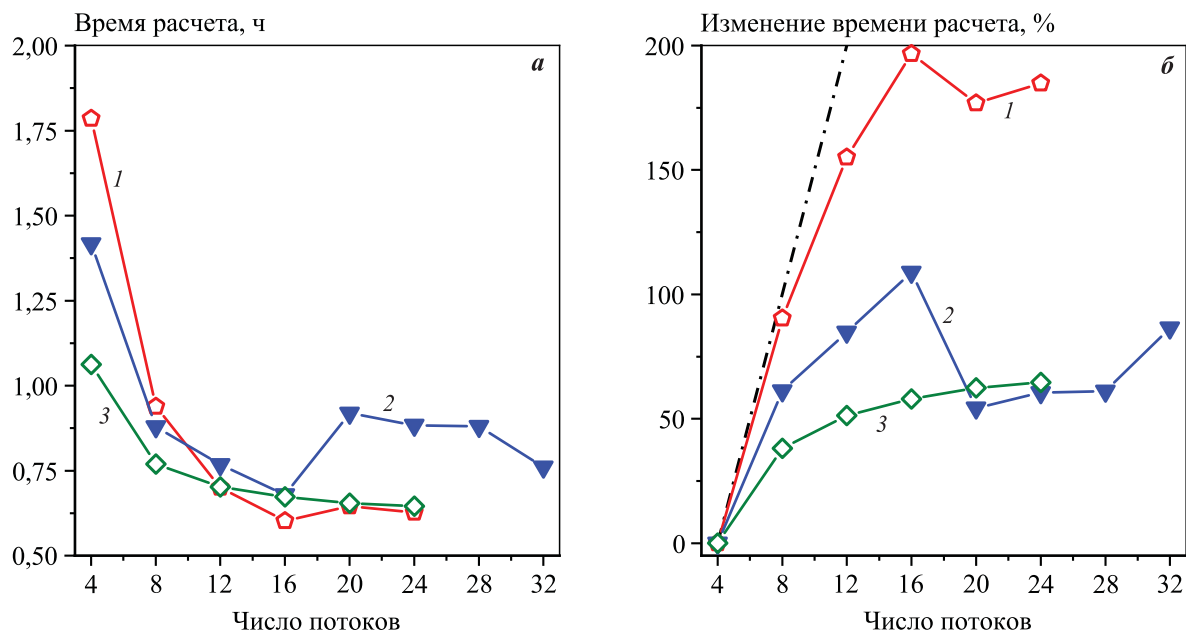


Рис. 6. Длительность расчета затвердевания отливки «ГП25» (а) и прирост скорости расчета (б) в программах «ProCast» (1, 2) и «ПолигонСофт» (3) в зависимости от количества потоков, задействованных в расчете при использовании компьютеров на базе платформ «Intel» (пустые точки 1, 3) и «AMD» (закрашенные точки 2) и расчетной сетки L3 (см. табл. 2)

Fig. 6. The calculation time of GP25 casting solidification (a) in ProCast (1, 2) and PolygonSoft (3) software and the calculation speed growth (b) depending on the number of threads involved in the calculation, when using computers based on the platforms from Intel (open points 1, 3) and AMD (filled points 2) and L3 simulation mesh (see Table 2)

расчетных потоков, использование современных процессоров с большим числом логических ядер позволяет значительно сократить время решения задачи моделирования заполнения и затвердевания отливки. Это, в свою очередь, дает возможность технологам на производстве смоделировать процессы заполнения и затвердевания для большего числа вариантов технологии, принять более взвешенное решение по реализуемой технологии литья и снизить затраты и количество брака. Это особенно актуально при моделировании литейных процессов получения крупногабаритных тонкостенных отливок, для которых количество элементов в расчетных сетках и, соответственно, время моделирования очень велико.

Выводы

1. Минимальное время расчета при решении задачи моделирования процесса заполнения и затвердевания отливки «ГП25» в СКМ ЛП «ProCast» наблюдается при использовании 16 потоков с применением как системы на процессоре «Intel Core i9 12900KF», так и системы на процессоре «AMD Ryzen 9 5950X». При этом (16 потоков вместо 4)

прирост производительности составляет ~180 и 110 % соответственно для систем «Intel» и «AMD».

2. Причины снижения производительности при использовании более 16 потоков связаны с наличием медленных энергоэффективных ядер в процессорах «Intel» и уменьшением частоты ядер для процессора от «AMD». Также для систем на обоих процессорах характерно неравномерное распределение вычислительной задачи между потоками из-за полной загрузки физических ядер.

3. Распараллеливание задачи моделирования отливки «ГП25» в СКМ ЛП «ПолигонСофт» значительно менее эффективно, чем в СКМ ЛП «ProCast», что связано с реализацией архитектуры SMP в «ПолигонСофт», приводящей к недогрузке логических ядер и, как следствие, к приросту производительности, не превышающему 65 % при использовании 24 потоков вместо 4.

4. Несмотря на значительную разницу в эффективности распараллеливания, задача затвердевания отливки «ГП25» в СКМ ЛП «ПолигонСофт» и СКМ ЛП «ProCast» решается за достаточно близкое время.

5. Решение более сложной задачи моделирования крупногабаритных корпусных отливок из

никелевого жаропрочного сплава ВЖЛ14Н-ВИ в керамических формах в СКМ ЛП «ProCast», включающей в себя охлаждение литейного блока в печи перед заливкой, заливку расплава в форму и последующее охлаждение, с учетом радиационного теплообмена, показало, что эффективность распараллеливания остается на таком же уровне, как и при решении задачи для отливки «ГП25».

Список литературы/References

- Schwiegelshohn U., Badia R.M., Bubak M., Danelutto M., Dustdar S., Gagliardi F., Geiger A., Hluchy L., Kranzlmüller D., Laure E., Priol T., Reinefeld A., Resch M., Reuter A., Rienhoff O., Rüter T., Sloot P., Talia D., Ullmann K., Yahyapour R., von Voigt G. Perspectives on grid computing. *Future Generation Computer Systems*. 2010;26:1104–1115. <https://doi.org/10.1016/j.future.2010.05.010>
- Konopka K., Miłkowska-Piszczyk K., Trebacz L., Falakus J. Improving efficiency of ccs numerical simulations through use of parallel processing. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015;60(1):235–238. <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0037>
- Истомин В.А., Шварц Д.Р., Ишханов Е.А., Тихомиров М.Д. Использование бессеточного метода сглаженных частиц при моделировании гидродинамики в СКМ ЛП «ПолигонСофт». *Литейное производство*. 2012;(8):20–22. Istomin V.A., Shvarts D.R., Ishkhanov E.A., Tikhomirov M.D. Using the meshfree smoothed-particles method in the simulation of hydrodynamics in the casting simulation software “PolygonSoft”. *Liteinoe Proizvodstvo*. 2012;(8):20–22 (In Russ.).
- Cai Y., Li G., Wang H., Zheng G., Lin S. Development of parallel explicit finite element sheet forming simulation system based on GPU architecture. *Advances in Engineering Software*. 2012;45:370–379. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.10.014>
- Posey S., Kodiyalam S. Performance benefits of NVIDIA GPUs for LS-DYNA®. In: *8th European LS-DYNA Users Conference* (May 2011). Strasbourg, 2011. P. 1–6.
- Kaplinger B., Wie B., Dearborn D. Efficient parallelization of nonlinear perturbation algorithms for orbit prediction with applications to asteroid deflection and fragmentation. In: *20th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting* (15–17 February 2010). San Diego, 2010. P. 1845–1860.
- Thibault S.E., Holman D., Trapani G., Garcia S. CFD simulation of a quad-rotor UAV with rotors in motion explicitly modeled using an LBM approach with adaptive refinement. In: *55th AIAA Aerospace Sciences Meeting* (9–13 January 2017). Grapevine: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017. P. 1–16. <https://doi.org/10.2514/6.2017-0583>
- Pannala S., D’Azevedo E.F., Syamlal M., O’Brien T. Hybrid (OpenMP and MPI) parallelization of MFIx: A multiphase CFD code for modeling fluidized beds. In: *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing (SAC)* (9–12 March 2003). Melbourne: Association for Computing Machinery, 2003. P. 199–206. <https://doi.org/10.1145/952532.952574>
- Tomsich P., Rauber A., Merkl D. ParSOM: Using parallelism to overcome memory latency in self-organizing neural networks. In: *High Performance Computing and Networking: Proceedings of the 8th International Conference* (8–10 May 2000). Amsterdam: Springer, 2000. P. 136–145. https://doi.org/10.1007/3-540-45492-6_15
- Биленко Г.А. Общие возможности пакета программ Welding simulation suite. *Металлург*. 2011;(5):28–31. Bilenko G.A. General capabilities of the software package Welding simulation suite. *Metallurgist*. 2011;55(5–6): 323–327. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s11015-011-9430-6>
- Yang W.-H., Peng A., Liu L., Hsu D.C. Parallel true 3D CAE with hybrid meshing flexibility for injection molding. In: *Annual Conference of the Society of Plastics Engineers ANTEC 2005* (1–5 May 2005). Boston: Curran Associates Inc., 2005. Vol. 1. P. 56–60.
- Corke G. Workstations for simulation (FEA). URL: <https://develop3d.com/features/workstations-for-simulation-fea-ansys-mechanical-17-0> (accessed: 17.01.2023).
- Trębacz L., Miłkowska-Piszczyk K., Konopka K., Falakus J. Numerical simulation of the continuous casting of steel on a grid platform. In: *eScience on distributed computing infrastructure. Lecture notes in computer science* (Eds. M. Bubak, J. Kitowski, K. Wiatr). Heidelberg: Springer, 2014. Vol. 8500. P. 407–418. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10894-0_29
- Тихомиров М.Д., Комаров И.А. Основы моделирования литейных процессов. Что лучше — метод конечных элементов или метод конечных разностей? *Литейное производство*. 2002;(5):22–28. Tikhomirov M.D., Komarov I.A. Principles of simulation of casting processes. Which is better, the finite element method or the finite difference method? *Liteinoe Proizvodstvo*. 2002;(5):22–28. (In Russ.).
- Тарасевич Н.И., Корниец И.В., Тарасевич И.Н., Дудченко А.В. Сравнительный анализ систем компьютерного моделирования металлургических и литейных процессов. *Металл и литье Украины*. 2010;(5):20–25. Tarasevich N.I., Korniets I.V., Tarasevich I.N., Dudchenko A.V. Comparative analysis of computer simulation

- software for metallurgical and foundry processes. *Metall i Lit'e Ukrainy*. 2010;(5):20–25. (In Russ.).
16. Simulate the complete casting process to reach zero defects with a single tool. URL: <https://www.esi-group.com/products/casting> (accessed: 6.02.2023).
 17. Туришев В. Моделирование литейных процессов: Что выбрать? *CADmaster*. 2005;(2):33–35.
Turishchev V. Simulation of foundry processes: What to choose? *CADmaster*. 2005;(2):33–35. (In Russ.).
 18. Система компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «ПолигонСофт». URL: <https://poligonsoft.ru> (дата обращения: 6.02.2023).
 19. Монастырский А., Тихомиров М. СКМ ЛП «ПолигонСофт» 13.X. Обзор, итоги, планы. *CADmaster*. 2013;(2):44–48.
Monastyrskii A., Tikhomirov M. The casting simulation software “PoligonSoft” 13.X. Overview, results, plans. *CADmaster*. 2013;(2):44–48. (In Russ.).
 20. ESI Group, ProCAST 2010.0 User's Manual (ESI Group, 2010). URL: https://myesi.esi-group.com/system/files/documentation/ProCAST/2010/ProCAST_20100_UM.pdf (accessed: 12.09.2022).
 21. Yang L., Chai L.H., Liang Y.F., Zhang Y.W., Bao C.L., Liu S.B., Lin J.P. Numerical simulation and experimental verification of gravity and centrifugal investment casting low pressure turbine blades for high Nb–TiAl alloy. *Intermetallics*. 2015;66:149–155.
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2015.07.006>
 22. Lu S., Xiao F., Guo Z., Wang L., Li H., Liao B. Numerical simulation of multilayered multiple metal cast rolls in compound casting process. *Applied Thermal Engineering*. 2016;93:518–528.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.114>
 23. Dantzig J.A., Rappaz M. Solidification. Lausanne: EPFL Press, 2009. 621 p.
 24. Тихомиров М.Д. Основные аспекты решения тепло-
 - вой задачи при моделировании литейных процессов. *Литейное производство*. 1998;(4):30–34.
Tikhomirov M.D. Main aspects of solving the heat transfer problem in the simulation of foundry processes. *Liteinoe Proizvodstvo*. 1998;(4):30–34. (In Russ.).
 25. Колтыгин А.В., Баженов В.Е., Целовальник Ю.В., Белов В.Д., Юдин В.А. Результаты компьютерного моделирования усадочной микропористости в корпусной отливке из сплава МЛ10. *Литейное производство*. 2020;(8):23–27.
Koltygin A.V., Bazhenov V.E., Tseloval'nik Yu.V., Belov V.D., Yudin V.A. Results of computer of shrinkage microporosity simulation in ML10 alloy body casting. *Liteinoe Proizvodstvo*. 2020;(8):23–27. (In Russ.).
 26. Palumbo G., Piglionico V., Piccininni A., Guglielmi P., Sorgente D., Tricarico L. Determination of interfacial heat transfer coefficients in a sand mould casting process using an optimised inverse analysis. *Applied Thermal Engineering*. 2015; 78:682–694.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.11.046>
 27. Баженов В.Е., Петрова А.В., Колтыгин А.В., Целовальник Ю.В. Определение коэффициента теплопередачи между отливкой из сплава МЛ5 (AZ91) и формой из холоднотвердеющей смеси. *Цветные металлы*. 2017;(8):89–96.
Bazhenov V.E., Petrova A.V., Koltygin A.V., Tseloval'nik Yu.V. Determination of the interfacial heat transfer coefficient between AZ91 alloy casting and resin bonded sand mold. *Tsvetnye Metally*. 2017;(8):89–96. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17580/tsm.2017.08.14>
 28. Bazhenov V.E., Tselovalnik Yu.V., Koltygin A.V., Belov V.D. Investigation of the interfacial heat transfer coefficient at the metal–mold interface during casting of an A356 aluminum alloy and AZ81 magnesium alloy into steel and graphite molds. *International Journal of Metalcasting*. 2021;15(2):625–637.
<https://doi.org/10.1007/s40962-020-00495-2>

Информация об авторах

Вячеслав Евгеньевич Баженов — к.т.н., доцент кафедры литейных технологий и художественной обработки материалов (ЛТиХОМ) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» (НИТУ МИСИС).

<https://orcid.org/0000-0003-3214-1935>

E-mail: V.E.Bagenov@gmail.com

Андрей Вадимович Колтыгин — к.т.н., доцент кафедры ЛТиХОМ, НИТУ МИСИС.

<https://orcid.org/0000-0002-8376-0480>

E-mail: misistlp@mail.ru

Information about the authors

Viacheslav E. Bazhenov — Cand. Sci. (Eng.), Assistant Prof., Department of Foundry Technologies and Material Art Working (FT&MAW), National University of Science and Technology “MISIS” (NUST MISIS).

<https://orcid.org/0000-0003-3214-1935>

E-mail: V.E.Bagenov@gmail.com

Andrei V. Koltygin — Cand. Sci. (Eng.), Assistant Prof., Department of FT&MAW, NUST MISIS.

<https://orcid.org/0000-0002-8376-0480>

E-mail: misistlp@mail.com

Анна Андреевна Никитина — учебный мастер кафедры ЛТИХОМ, НИТУ МИСИС.

<https://orcid.org/0000-0002-5399-0330>

E-mail: nikitina.misis@gmail.com

Владимир Дмитриевич Белов — д.т.н., заведующий кафедрой ЛТИХОМ, НИТУ МИСИС.

<https://orcid.org/0000-0003-3607-8144>

E-mail: vdbelov@mail.ru

Евгений Алексеевич Лазарев — главный металлург ПАО «ОДК-Кузнецов».

E-mail: ea.lazarev@uec-kuznetsov.ru

Anna A. Nikitina — Educat. Master, Department of FT&MAW, NUST MISIS.

<https://orcid.org/0000-0002-5399-0330>

E-mail: nikitina.misis@gmail.com

Vladimir D. Belov — Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of FT&MAW, NUST MISIS.

<https://orcid.org/0000-0003-3607-8144>

E-mail: vdbelov@mail.ru

Evgenii A. Lazarev — Head Metallurgist of the PJSC “UEC-Kuznetsov”.

E-mail: ea.lazarev@uec-kuznetsov.ru

Вклад авторов

В.Е. Баженов — формирование основной концепции, проведение расчетов, обработка результатов расчетов, написание текста статьи.

А.В. Колтыгин — научное руководство, редактирование текста статьи.

А.А. Никитина — проведение расчетов, обработка результатов расчетов.

В.Д. Белов — общее руководство, редактирование текста статьи.

Е.А. Лазарев — формулировка цели и задачи исследования, обеспечение ресурсами.

Contribution of the authors

V.E. Bazhenov — conceptualization, realization of simulation, analysis of the simulation results, writing of the manuscript.

A.V. Kolygin — scientific guidance, review and editing of the manuscript.

A.A. Ninitina — realization of simulation, analysis of the simulation results.

V.D. Belov — supervision, review and editing of the manuscript.

E.A. Lazarev — formulation of the aims and objectives of the study, provision of resources.

Статья поступила в редакцию 09.02.2023, доработана 22.03.2023, подписана в печать 24.03.2023

The article was submitted 09.02.2023, revised 22.03.2023, accepted for publication 24.03.2023

УДК 621.74.045 : 53.09

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-54-66>

Научная статья

Research article



Исследование процессов формирования пористых выплавляемых моделей, применяемых для изготовления высокоточного литья

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

Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук
681005, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1

✉ Сергей Геннадьевич Жилин (sergeyzhilin1@rambler.ru)

Аннотация: Конкурентоспособность современных предприятий машино-, судо- и авиастроения во многом определяется материало- и энергоэффективностью технологий, направленных на получение конструкций и узлов деталей ответственного назначения. Применение литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) обеспечивает получение заготовок повышенной размерной и геометрической точности, сложной пространственной конфигурации из широкой номенклатуры сплавов. К недостаткам ЛВМ следует отнести многостадийность процесса и высокую стоимость конечного продукта, что предполагает недопустимость брака, доля которого может достигать 30 %. Брак в ЛВМ преимущественно вызван теплофизическими явлениями, сопровождающими ряд технологических операций и обуславливающими наличие напряжений в структуре воскообразных и керамических материалов, что определяет деформационные процессы в выплавляемых моделях и оболочковых формах. Для устранения негативного влияния теплофизического фактора и снижения напряжений в структурах промежуточных изделий процесса, выплавляемые модели формируют прессованием порошков воскообразных модельных композиций. При этом нерешенным остается вопрос релаксации напряжений в прессовках, приводящих к упругому отклику уплотненного материала и, как следствие, изменению размеров получаемого изделия. Поиск вариантов наиболее рационального режима формирования прессовки привел к необходимости проведения серии экспериментов, в результате которых предполагается достижение релаксации напряжений σ в условиях постоянной деформации сжатия, описываемого уравнением Кольрауша. Полученные в ходе эксперимента результаты позволяют прогнозировать конечные размеры прессовок и сформировать математическую модель процесса, актуальную для широкой номенклатуры воскообразных модельных материалов, применяемых в ЛВМ.

Ключевые слова: экспериментальное моделирование, машиностроительные процессы, литье по выплавляемым моделям, напряженно-деформированное состояние, прессовка, пористость, упругий отклик.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного финансирования Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН. Исследования проведены с использованием ресурсов ЦКПН «Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН», финансируемого Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту № 075-15-2021-663.

Для цитирования: Жилин С.Г., Богданова Н.А., Комаров О.Н. Исследование процессов формирования пористых выплавляемых моделей, применяемых для изготовления высокоточного литья. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(3):54–66. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-54-66>

Porous wax patterns for high-precision investment casting

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

Institute of Machinery and Metallurgy of Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
681005, Russia, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, Metallurgists str., 1

✉ Sergey G. Zhilin (sergeyzhilin1@rambler.ru)

Annotation: Aerospace, manufacturing, and shipbuilding industries strive to enhance their competitiveness by optimizing material utilization and improving production processes. The investment casting process offers the capability to fabricate intricate and precise

components using a diverse range of alloys. However, this method is not without its drawbacks, including high manufacturing costs and a significant rate of defective castings, which can reach up to 30 %. These defects primarily arise from the stresses imposed on the wax patterns and ceramic molds, leading to their distortion. To address this issue, efforts have been made to reduce stress by employing compacted wax powders for the production of investment patterns. However, stress relaxation in the wax patterns remains a concern as it can result in elastic deformation of the compacted material and subsequent alterations in the final product dimensions. To mitigate this issue, a series of tests were conducted with the objective of studying stress relaxation under constant compression strain, as described by the Kohlrausch equation. The obtained results provide valuable insights that enable the prediction of the ultimate dimensions of patterns created using different grades of wax.

Keywords: testing, manufacturing process, investment casting, stress-strain state, compaction, porosity, elastic deformation.

Acknowledgments: This study has received financial support from the Khabarovsk Federal Research Center, Far East Branch, Russian Academy of Sciences. The authors acknowledge the utilization of the Research Data Processing and Storage Center, Far East Branch, Russian Academy of Science, which is funded by the Russian government through the Ministry of Science and Higher Education under Project No. 075-15-2021-663.

For citation: Zhilin S.G., Bogdanova N.A., Komarov O.N. Porous wax patterns for high-precision investment casting. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(3):54–66. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-54-66>

Введение

Положительная динамика в развитии предприятий судо-, машино-, и авиастроительной отраслей сохраняется преимущественно благодаря рыночной конъюнктуре, а именно взаимной увязке таких факторов, как уровни спроса и предложения, определяющих характер и объем используемых технологий, направленных на сокращение производственных издержек при сохранении качества получаемого продукта. Большинство известных производителей судовых двигателей (например, Wärtsila, Caterpillar, Volvo Penta, MTU, Cummins и др.) предпочитают сокращать издержки за счет применения практики замкнутого цикла, предполагающего повторное вовлечение части ресурсов в производство [1], что во многом определяет конкурентоспособность предприятий в долгосрочной перспективе. Сложившаяся практика повышения организационно-технического уровня машино-, судо- и авиастроения с использованием прогрессивных технологий и инновационного дорогостоящего оборудования, как правило, приводит к резкому удорожанию производимого продукта [2]. Поэтому важнейшей задачей является сокращение издержек уже на начальных стадиях формирования продукта, а именно в ходе металлоемкого производства литых заготовок для деталей и узлов ответственного назначения из широкой номенклатуры сплавов. При проектировании элементов агрегатов различного назначения учитываются особенности эксплуатации в условиях знакопеременных температур и нагрузок, обуславливающих высокие требования к удельной

конструкционной прочности такого литья [3], высокой твердости композитов, получаемых литьем [4], материалам (например, некоторым титановым сплавам) и специальным методам литья (в частности, центробежным способом), в том числе позволяющим использовать литые металлоизделия для добычи углеводородов в морских акваториях [5], а также к размерно-геометрической точности литья.

Одним из наиболее востребованных и металлоемких видов литой продукции, например при проектировании и производстве судов различного назначения и водоизмещения, являются гребные винты, получаемые из широкой линейки эвтектических и околоэвтектических высокоэнтропийных сплавов, удовлетворяющих требованиям взаимовязки таких характеристик, как прочность и пластичность, в широком диапазоне температур эксплуатации [6]. Большой спектр эксплуатационных характеристик изделий такого типа определяет высокую актуальность исследований, проводимых отечественными и зарубежными специалистами, направленных на повышение качества литья, формирование набора уникальных прочностных характеристик и поиск перспективных методов восстановления поврежденных участков литых изделий [7–9].

С целью прогнозируемого получения отливок различной конфигурации с заданной размерной и геометрической точностью, сокращения дефектообразования и, следовательно, снижения издержек, связанных с возможной эксплуатацией таких изделий, исследователи и специалисты вы-

нуждены использовать методы численного моделирования. Так, например, при реализации литья в песчано-глинистые формы для минимизации негативного влияния такого дефекта отливок, как усадка, размеры которой определяются совокупностью значительного числа факторов теплофизической природы сплавов, широко применяют программные комплексы, основанные на численных методах (методы конечных элементов, разностей или объемов; методы векторных элементов или векторного градиента и т.д.) [10; 11].

Безусловно, большинство известных численных методов прогнозирования параметров получаемого литого металлопродукта «страдают» рядом допущений и неточностей, определяющих необходимость натурной верификации данных, получаемых расчетами.

В отличие от традиционного литья в песчано-глинистые формы, используемого, например, в судостроении при отливке винтов, а также массивных и крупногабаритных элементов судов, количество программных продуктов для специальных способов получения литой продукции (центробежное литье, литье под давлением или литье по выплавляемым моделям) [12] существенно меньше. Значительное число факторов, влияющих на результаты технологических операций, затрудняют расчет и моделирование для процессов литья по выплавляемым моделям (ЛВМ).

Литье по выплавляемым моделям — многооперационный процесс, отличающийся значительной номенклатурой используемых материалов, позволяющий объединить отдельные детали в цельнолитые узлы, что обуславливает целесообразность его применения для получения литых заготовок со сложной пространственной конфигурацией и повышенными размерно-геометрическими характеристиками, в ряде случаев не требующих механической обработки [13]. По выплавляемым моделям получают отливки размерами до 500 мм с толщиной стенки до 1 мм и шероховатостью поверхности до $R_a = 1,25$ мкм, соответствующие 11–16 квалитетам при допусках на размеры рабочей полости пресс-формы и не превышающие 8–9 квалитетов согласно ГОСТ 25347-82 «Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Поля допусков и рекомендуемые посадки».

Наиболее распространенной в процессах ЛВМ является последовательность следующих укрупненных блоков технологических операций: изготовление выплавляемых моделей из воскообраз-

ных материалов и их сборка в модельные блоки; послойное формирование на них керамической оболочковой формы; выплавление из оболочек модельного состава, их прокатка и заливка расплавом металла; механическая обработка. Изменение объемов выплавляемой модели по причине усадки или термического расширения материала достигает 10–14 %, что определяет необходимость учета теплофизических процессов, сопровождающих нагрев и охлаждение материала, при выборе величины «припуска» на механическую обработку литых заготовок [14; 15]. Очевидно, что теплофизические процессы, протекающие в материалах в ходе технологических операций, во многом способствуют формированию брака, совокупная доля которого в рассматриваемом виде литья может достигать 30 % [16; 17]. К числу негативных факторов, определяющих появление брака, следует отнести: изменение температуры воскообразных модельных материалов при их подаче в пресс-формы, определяющее нарушение геометрии поверхности выплавляемой модели в виде слоистости, усадки или коробления; проникновение воскообразного расплава в структуру керамической формы во время операции выплавления модельного материала, приводящее к разрушению оболочки на стадии ее прокатки или заливки расплавом металла. На рис. 1 представлена схема последовательности появления типичных дефектов, характерных для различных стадий ЛВМ: 1 — усадка воскообразного мо-

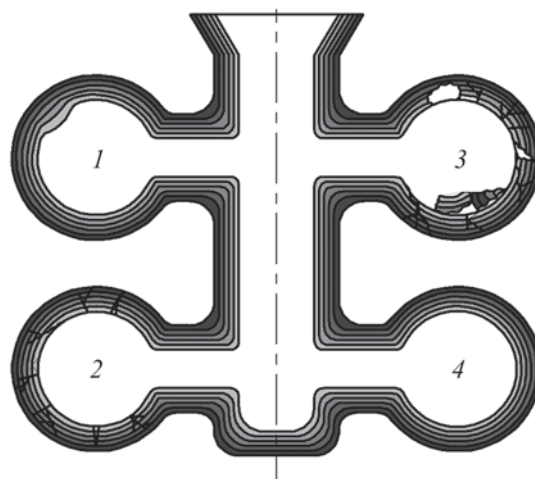


Рис. 1. Схема последовательности появления типичных дефектов, характерных для различных этапов получения отливок методом ЛВМ, на примере 5-слойной керамической оболочковой формы

Fig. 1. Investment casting defect formation flowchart for a 5-layer ceramic shell mold

дельного материала, следствием которой является нарушение геометрии выплавляемой модели и, следовательно, отливки; 2 — появление трещин в слоях керамической оболочковой формы в результате температурного расширения воскообразного материала на этапе его выплавления из керамики; 3 — расширение модельного материала в порах керамической оболочки на этапе ее прокаливания, приводящее к механическому засору отливки фрагментами керамики; 4 — бездефектная полость керамической оболочки.

Традиционно применяемые методы борьбы с усадочными явлениями при остывании модельных материалов, наряду с исправлением последствий таких дефектов, решаются подбором материалов с необходимым набором реологических характеристик или их модифицированием, а также формированием выплавляемых моделей в узком температурном интервале [18; 19].

В связи с вышеотмеченным становится очевидным, что значительное количество технологических переделов и высокая стоимость расходных материалов определяют недопустимость брака в таком производстве и актуальность поиска альтернативных вариантов получения литья.

Поиск новых или модернизация традиционных модельных материалов воскообразной группы приводит к появлению дополнительных расходов. В качестве основы значительной части воскообразных модельных материалов используют нефтяные парафины, которые сочетают с различными добавками: стеарином, церезином, канифолью, буроугольным воском и т.д.; одним из наиболее распространенных модельных материалов является ПС50/50, представляющий собой сплав равных долей (по массе) парафина и стеарина и относящийся к первой классификационной группе [13].

Поскольку при затвердевании воскообразного сплава ПС50/50 в выплавляемой модели формируется напряженная структура с наличием трещин и сколов, то повышение размерно-геометрической точности традиционной модели представляется затруднительным. Технологически предпочтительным представляется вариант формирования выплавляемых моделей из порошков воскообразных материалов, что позволит снизить напряженно-деформированное состояние модели и в конечном итоге обеспечить большую точность за счет проникновения материала в сложные участки формообразующей полости пресс-формы и обеспечения требуемой плотности прессовки [20; 21]. Разработка таких процессов осуществляется учеными из Хаба-

ровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН.

В процессе холодного уплотнения порошка воскообразного материала под действием давления за счет межчастичного трения и трения о стенки пресс-формы [22] происходит рост температуры, оплавление участков контактирующих частиц материала и формируется пористая каркасная структура выплавляемой модели с конфигурацией наружной поверхности, соответствующей формообразующей полости пресс-формы. Применение такого подхода приводит к формированию выплавляемой модели без усадочных дефектов, которые не оказывают силового воздействия на внутренние стенки керамической оболочки при выплавлении модельного материала.

Среди недостатков представленного процесса стоит отметить вероятность изменения геометрии прессовки, обусловленного выходом находящегося под давлением воздуха и разгрузкой стесненного в ходе уплотнения материала. Экспериментально определено, что величина упругого отклика воскообразного материала после снятия нагрузки составляет 0,7–1,2 % в направлении оси прессования и 0,4–0,5 % в поперечном направлении [23]. Очевидно, что при получении выплавляемых моделей прессованием порошков воскообразных материалов их размеры искажаются в значительно меньшей степени, чем при их формировании из жидкого или пастообразного модельного материала [24; 25]. Несмотря на более приемлемые значения конечных размеров выплавляемой модели, полученной прессованием, полное устранение явления искажения размеров все же представляется актуальным, а недостаток информации о процессах управления величиной упругого отклика уплотняемых материалов обуславливает необходимость их экспериментального изучения.

На значение величины упругой разгрузки уплотненного материала оказывают влияние его реологические свойства: упругость, пластичность, прочность, вязкость, ползучесть. Поскольку при холодном прессовании в материале прессовки возникают локальные участки с повышенной температурой, то очевидно, что снижение величины упругого отклика пребывает в зависимости от времени релаксации материала, на которое, в свою очередь, влияют фракция материала, значения давления и скорости его уплотнения. Значения напряжений, зависящие от реологических свойств уплотняемого материала, растут пропорционально увеличению плотности прессовки. В этой связи интерес пред-

ставляет процесс релаксации напряжений, а именно определение для уплотненного материала при постоянной нагрузке времени, по достижении которого упругие деформации перейдут в необратимые (пластические) [26; 27]. Предварительными экспериментами установлено, что при использовании в ходе уплотнения интервала скоростей совмещения формообразующих элементов пресс-матрицы 0,25–1,5 мм/с величина упругого отклика материала прессовок из воскообразных порошков не превышает 1,2 % в направлении оси нагружения. Принудительная релаксация материала, заключающаяся в его выдержке в пресс-матрице в нагруженном состоянии, обеспечивает перераспределение напряжений в прессовке и позволяет снизить ее упругий отклик. Таким образом, получение выплавляемых моделей с прогнозируемой геометрией и минимальными искажениями размеров относительно формообразующей полости пресс-формы при прессовании порошков воскообразных модельных композиций представляется актуальной задачей.

Цель работы — сравнение результатов расчетного и экспериментального определения параметров процесса прессования порошков воскообразных модельных материалов, применимых для прогнозирования отклонения линейных размеров пористых выплавляемых моделей от размеров формообразующей полости пресс-формы.

В рамках поставленной цели решались следующие задачи:

- экспериментальное определение зависимостей напряжений, возникающих при уплотнении порошков воскообразных модельных материалов, от значений пористости получаемых прессовок;

- сопоставление значений напряжений, определяемых при оценке прочности уплотняемых порошковых тел, со значениями напряжений, возникающих при формировании экспериментальных прессовок;

- нахождение параметров уравнения релаксации напряжений для прессовок из порошков воскообразных модельных материалов.

Методы и материалы

Для расчетного нахождения зависимости между действующими на прессовку напряжениями (σ), вызываемыми деформациями (ϵ), и их изменениями во времени (τ) требуется применение реологического уравнения состояния материала:

$$f(\sigma, \epsilon, \tau) = 0. \quad (1)$$

Экспериментальное определение реологических свойств уплотняемого порошкового материала целесообразно при постоянных значениях деформации сжатия: $\epsilon = \text{const}$ [28]. В результате уплотнения порошкового материала локальный рост температуры достигает температуры плавления. При разгрузке температура снижается. Релаксацию напряжения σ для области застывания воскообразного материала в условиях $\epsilon = \text{const}$ можно описать уравнением Кольрауша [29; 30]:

$$\sigma = \sigma_0 \exp^{-(t/a)^b}, \quad (2)$$

где a и b ($0 < b \leq 1$) — константы при заданных температуре и давлении, σ — напряжение в момент времени t ; σ_0 — релаксирующая часть напряжения.

Расчет прогнозируемых параметров уравнения Кольрауша, характеризующих релаксационные свойства уплотненного воскообразного порошкового тела, необходимо произвести при помощи экспериментальных кривых по методике, описанной в работе [31]. В нашем случае, для пористого тела, такое аналитическое выражение для прогнозной кривой релаксации будет иметь вид

$$\sigma = \sigma_0(P) \exp^{-(t/\tau)^k}, \quad (3)$$

где $\sigma_0(P)$ — пиковое значение напряжения на пресс-пуансоне в момент начала разгрузки при заданной пористости P .

Параметры τ и k аналитического выражения кривой релаксации пористого тела определяем методом наименьших квадратов. Для этого обозначим через $\tilde{\sigma}_i$ отнесенное к $\sigma_0(P)$ экспериментальное значение напряжения в момент времени t_i : $\tilde{\sigma}_i = \sigma(t_i)/\sigma_0(P)$. Задача определения параметров выражения (3) сводится к минимизации обобщенного показателя рассеяния. Применяем метод наименьших квадратов не к исходной форме экспоненциальной функции (2), а к ее преобразованной форме (3). Поскольку значения $\tilde{\sigma}_i$ лежат в промежутке $0 < \tilde{\sigma}_i \leq 1$, то $\ln \tilde{\sigma}_i \leq 0$, а значит, показатель рассеяния можно представить в виде

$$Q = \sum_{i=1}^n \left\{ \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) - \ln \left[-\ln(\exp^{-(t_i/\tau)^k}) \right] \right\}^2 = \sum_{i=1}^n [\ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) - k \ln(t_i/\tau)]^2. \quad (4)$$

При выборе экспериментальных точек необходимо учитывать, что в момент начала разгрузки при $\tilde{\sigma}_i = 1$ или в момент времени $t = 0$ выраже-

ние (4) не существует, а $\exp^{-(t/\tau)^k} \Big|_{t=0} = \tilde{\sigma}_i(t_0) = 1$. Приравниваем нулю частные производные Q по τ и k :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial \tau} &= 2 \sum_{i=1}^n [\ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) - k \ln(t_i / \tau)] \frac{k}{\tau} = 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial k} &= -2 \sum_{i=1}^n [\ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) - k \ln(t_i / \tau)] \ln(t_i / \tau) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Преобразовав систему (5), получим стандартную форму нормальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} k n \ln\left(\frac{1}{\tau}\right) + k \sum_{i=1}^n \ln t_i &= \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i), \\ k \ln\left(\frac{1}{\tau}\right) \sum_{i=1}^n \ln t_i + k \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 &= \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Решая систему (6), получаем

$$\begin{aligned} k \ln\left(\frac{1}{\tau}\right) &= \frac{\sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i \sum_{i=1}^n \ln t_i}{n \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i\right)^2}, \\ k &= \frac{n \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \sum_{i=1}^n \ln t_i}{n \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i\right)^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Выражая τ , находим

$$\tau = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i \sum_{i=1}^n \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2}{n \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \sum_{i=1}^n \ln t_i} \right]. \quad (8)$$

Таким образом, параметры k и τ для уравнения Кольрауша (3) определяются по экспериментальным данным соотношениями (7) и (8).

Из соображений практической целесообразности для экспериментального моделирования в качестве порошковых воскообразных модельных материалов использованы парафин очищенный марки Т1 и сплав парафина со стеарином ПС50/50 (в соотношении 1 к 1). Указанные материалы соответствуют первой классификационной группе согласно [13] и широко распространены в ЛВМ-процессах. Поскольку реальные характеристики воскообразных материалов могут иметь отличия от свойств, регламентированных соответствующими ГОСТами (например, ГОСТ 23683-89 «Парафины нефтяные твердые. Технические условия»), то для них экспериментально определены

значения плотности (ρ) и модуля Юнга (E): для Т1 $\rho = 0,86$ г/см³, $E = 81,91$ МПа; для ПС50/50 $\rho = 0,935$ г/см³, $E = 71,8$ МПа. Температуры плавления материалов Т1 и ПС50/50 установлены в ходе нагрева со скоростью 2 °С/мин при помощи дифференциально-термического анализатора «Shimadzu DTG-60H» и составили 58 и 52 °С соответственно для Т1 и ПС50/50. Поскольку используемые материалы характеризуются низкой температурой плавления, то достоверность эксперимента обеспечивали его проведением в узком температурном диапазоне окружающей среды 20 ± 2 °С.

Реализация поставленных задач осуществлялась при помощи пресс-формы из стали 45, формирующая поверхность которой выполнена в виде полого цилиндра с внутренним диаметром $d = 43,3$ мм. Пресс-форма принимается в эксперименте недеформируемой. После помещения в нее порошков материалов Т1 и ПС50/50 технологически предпочтительных фракций 0,63 и 2,5 мм она устанавливалась на рабочую поверхность тестовой машины. Для использованных в эксперименте материалов значения насыпной плотности ($\rho_{\text{нас}}$) были следующие, г/см³: 0,360 (Т1, фракция 2,5 мм); 0,320 (Т1, фракция 0,63 мм); 0,340 (ПС50/50, фракция 2,5 мм); 0,310 (ПС50/50, фракция 0,63 мм). Поскольку фракции порошков получены рассевом на ситах модели 026 и имеют хлопьевидную форму, то известные методики расчета конечных свойств прессовок, формируемых из порошков со сферическими частицами, в нашем случае не могут обеспечить достоверность результатов [32].

Требуемую пористость прессовок (Π), изменяемую в диапазоне значений $0 \% \leq \Pi \leq 12 \%$ с шагом 2 %, достигали в результате различного уровня деформации (ϵ) порошков перемещением пресспуансона со скоростью 1 мм/с до момента, соответствующего равенству конечной высоты прессовки ее диаметру: $h = d$ (см. рис. 2). С этого момента в течение времени релаксации 60 мин с t_0 до t_{60} фиксировали напряжения, создающиеся на травесе тестовой машины, в качестве которой использован агрегат «AG-X plus Shimadzu», позволяющий обеспечить максимальное усилие при нагружении до 250 кН. Величина отклонения 0,03 % при нагрузке 100 кН и деформации 10 мм, регламентированная производителем «AG-X plus Shimadzu», обеспечивает достоверность экспериментальных данных.

Схема нагружения и релаксации порошков при формировании пористых прессовок из воскообразных материалов Т1 и ПС50/50 представлена

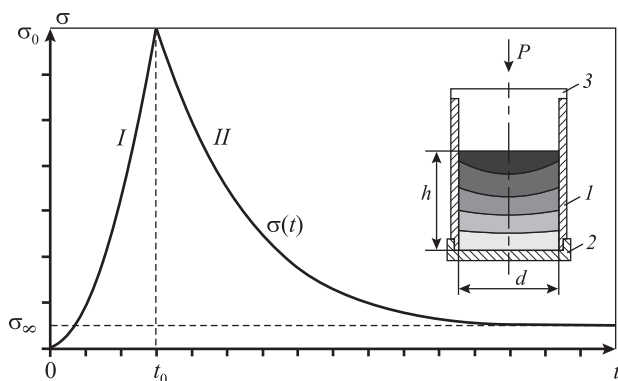


Рис. 2. Схема нагружения и релаксации порошкового тела из воскообразных материалов Т1 и ПС50/50

I – кривая нагружения, *II* – кривая релаксации
1 – пресс-матрица, *2* – основание, *3* – пресс-пуансон

Fig. 2. Loading and relaxation of T1 and PS50 wax powders

I – loading curve, *II* – relaxation curve
1 – mold, *2* – bottom, *3* – punch

на рис. 2. Пористость прессовки рассчитывали по формуле

$$P = (1 - \rho_p / \rho_l) \cdot 100 \%, \quad (9)$$

где ρ_p – плотность пористого образца, кг/м³; ρ_l – плотность литого материала, кг/м³.

Диапазон значений пористости обусловлен механическими характеристиками прессовок. Предварительно установлено, что прессовки, имеющие $P > 12 \%$, обладают неудовлетворительными значениями поверхностной твердости и низкой прочностью, что свидетельствует о нецелесообразности их использования. Массу (M , кг) навески порошка для формирования прессовки требуемой пористости P определяли исходя из условия

$$M = h \rho_l \left(1 - \frac{P}{100} \right) \left(\frac{\pi d^2}{4} \right). \quad (10)$$

В нашем случае $h = d = 0,0433$ м, и масса навески для каждого варианта конечной пористости прессовки из материалов Т1 и ПС50/50 определяется по экспериментальным уравнениям

$$M_{T1} = -0,55P + 55,$$

$$M_{PS50/50} = -0,5959P + 59,59.$$

По достижении положения h траверсу фиксировали на протяжении 60 мин и осуществляли регистрацию напряжений на ней тестовой машиной «AG-X plus Shimadzu». По мере удаления воздуха из прессовки и перераспределения плотности

в ее объеме напряжения снижаются, но не всегда устраняются полностью, что приводит к изменению размеров прессовки ввиду упругого возврата уплотненного материала, определяемого следующим образом:

$$O = \frac{(d_i - d)}{d_i} \cdot 100 \%, \quad (11)$$

где O – значение упругого отклика материала, %; d и d_i – соответственно внутренний диаметр пресс-формы и высота i -й прессовки, измеряемые при помощи цифрового регистратора «DIN 863 Vogel» с точностью измерения 0,001 мм.

Прочность на сжатие уплотненных прессовок в виде цилиндрических образцов, также осуществляемое при помощи тестовой машины «AG-X plus Shimadzu» со скоростью перемещения траверсы 0,1 мм/с, определяли по завершении выдержки (при температуре 20 ± 2 °C) в течение 48 ч.

Обсуждение результатов

На рис. 3 представлены результаты реальных экспериментов в виде сравнения экспоненциальных зависимостей напряжений σ_0 , возникающих при уплотнении порошковых тел из материалов марок Т1 и ПС50/50 фракций 2,5 и 0,63 мм, от задаваемой в эксперименте пористости прессовки. Также дополнительно приведены значения величины достоверности аппроксимации полиномиальных зависимостей $1R_{2,5}^2$; $2R_{0,63}^2$; $3R_{2,5}^2$ и $4R_{0,63}^2$,

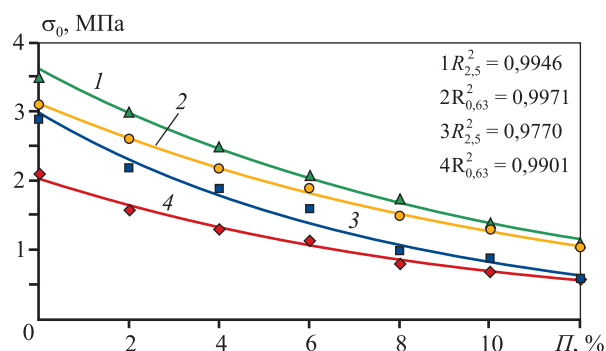


Рис. 3. Сравнение зависимостей напряжений от пористости прессовок из порошков воскообразных материалов Т1 и ПС50/50 различных фракций

1 – Т1, фракция 2,5 мм; *2* – Т1, фракция 0,63 мм;
3 – ПС50/50, фракция 2,5 мм; *4* – ПС50/50, фракция 0,63 мм

Fig. 3. Stress vs. porosity in the T1 and PS50/50 powder wax samples

1 – T1, 2.5 mm particle size; *2* – T1, 0.63 mm particle size;
3 – PS50/50, 2.5 mm particle size;
4 – PS50/50, 0.63 mm particle size

характерные для прессовок из материалов Т1 и ПС50/50 фракций 2,5 и 0,63 мм соответственно.

Из рис. 3 видно, что напряжения, возникающие на траверсе тестовой машины при уплотнении порошковых тел из более крупной фракции 2,5 мм, выше, чем при получении прессовок из фракции 0,63 мм, для всех материалов, использованных в эксперименте. Такие зависимости объяснимы превышением значений насыпной плотности фракций 2,5 мм над значениями плотности фракций 0,63 мм. Помимо насыпной плотности исходного порошкового материала, на значения напряжений при уплотнении оказывает влияние его пластичность, которая, в свою очередь, зависит от температуры плавления [33; 34]. Температура плавления материала Т1 выше температуры плавления ПС50/50, а следовательно, значения напряжений при уплотнении Т1 больше, чем при использовании материала ПС50/50. Экспериментом установлено, что при 4-кратном увеличении размеров фракций уплотняемых частиц материалов Т1 и ПС50/50 до состояния, когда $0\% \leq \Pi \leq 2\%$, разница в значениях напряжений при уплотнении прессовок достигает 30 %. Очевидно, что с ростом Π различие в значениях амплитуд напряжений для прессовок из разных фракций материалов сокращается.

Практический интерес представляет сравнение напряжений, сопровождающих формирование прессовок различных фракций, с напряжениями, возникающими в ходе разрушения экспериментальных образцов с теми же значениями пористости в результате сжатия. На рис. 4 представлены зависимости пределов прочности экспериментальных цилиндрических образцов на сжатие ($\sigma_{сж}$) от их пористости. Их анализ показывает, что напряжения, возникающие при разрушении прессовок сжатием при различной их пористости, задаваемой в эксперименте, тем больше, чем крупнее фракция материала, из которого получены прессовки. В целом можно утверждать, что, хотя прессовки, сформированные из материала Т1, сопротивляются сжатию лучше, чем прессовки из ПС50/50, последние имеют достаточную технологическую прочность для сопротивления сжимающим нагрузкам, возникающим в ходе нанесения первых (незатвердевших) слоев огнеупорной оболочки.

В связи с отмеченным выше, для условий реального производства задача прогнозирования технологической прочности выплавляемых моделей на промежуточных стадиях ЛВМ-процесса имеет высокую актуальность. Поскольку на стадии на-

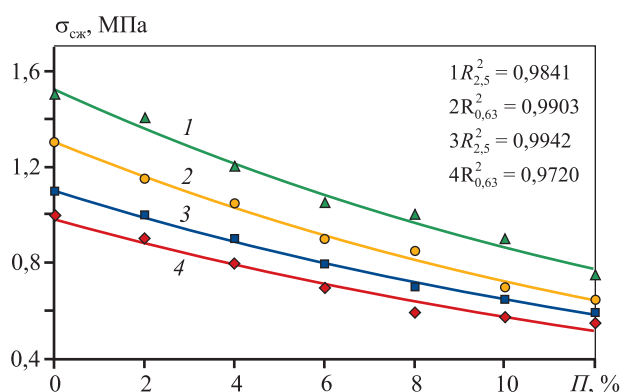


Рис. 4. Сравнение зависимостей предела прочности на сжатие от пористости прессовок из порошков воскообразных материалов Т1 и ПС50/50 различных фракций

1 – Т1, фракция 2,5 мм; 2 – Т1, фракция 0,63 мм;
3 – ПС50/50, фракция 2,5 мм;
4 – ПС50/50, фракция 0,63 мм

Fig. 4. Ultimate compressive strength vs. porosity in the T1 and PS50/50 powder wax samples

1 – T1, 2.5 mm particle size; 2 – T1, 0.63 mm particle size;
3 – PS50/50, 2.5 mm particle size;
4 – PS50/50, 0.63 mm particle size

несения керамических слоев выплавляемые модели, расположенные на модельных блоках, преимущественно испытывают нагрузку, связанную с их сжатием, то для предварительной оценки прочности на сжатие выплавляемых моделей, получаемых прессованием, уже на стадии их формирования целесообразно введение показателя пропорциональности напряжений $N_{сж}$. Этот показатель означает, на сколько значение предела прочности прессовки при сжатии меньше напряжений, возникающих при изготовлении выплавляемой модели прессованием порошка модельного материала. Расчет показателя пропорциональности напряжений предлагается осуществлять по формуле

$$N_{сж} = (\sigma_{сж} \cdot 100\%) / \sigma_0, \quad (12)$$

где $\sigma_{сж}$ — предел прочности при сжатии, МПа; σ_0 — напряжения, возникающие на траверсе тестовой машины при формировании прессовки, МПа.

На рис. 5 приведены зависимости показателя пропорциональности напряжений ($N_{сж}$) от значений пористости прессовок в интервале $0 \leq \Pi \leq 12\%$, формируемых из материалов Т1 и ПС50/50 фракций 0,63 мм и 2,5 мм.

Таким образом, данные рис. 5 позволяют практически прогнозировать значение прочности на сжатие будущей прессовки с помощью показателя пропорциональности напряжений. Из рис. 5 вид-

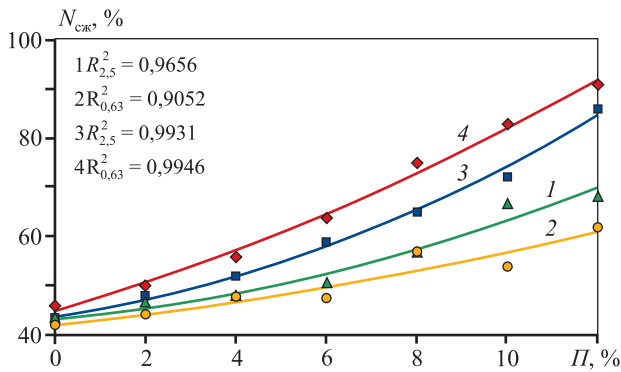


Рис. 5. Сравнение зависимостей показателя пропорциональности напряжений от пористости прессовок из порошков воскообразных материалов Т1 и ПС50/50 различных фракций
1 – Т1, фракция 2,5 мм; 2 – Т1, фракция 0,63 мм;
3 – ПС50/50, фракция 2,5 мм;
4 – ПС50/50, фракция 0,63 мм

Fig. 5. Stress safety margin vs. porosity of T1 and PS50/50 powder wax samples
1 – T1, 2.5 mm particle size; 2 – T1, 0.63 mm particle size;
3 – PS50/50, 2.5 mm particle size;
4 – PS50/50, 0.63 mm particle size

но, что значение предела прочности $\sigma_{сж}$, характерного, например, для прессовки из фракции 0,63 мм материала Т1, имеющей пористость $\Pi = 8 \%$, будет составлять 57 % от значения напряжений σ_0 , возникающих при формировании прессовки.

В ходе определения значений напряжений σ_i , возникающих на траверсе тестовой машины при релаксации прессовок в нагруженном состоянии, установлено, что существенное изменение значений σ_i для прессовок из всех фракций задействованных в эксперименте материалов не превышает 25 мин. Очевидно, что чем выше пористость, тем

снижение значений напряжений σ_i для прессовок, полученных из более крупной фракции материала 2,5 мм, требует больших временных затрат по сравнению с прессовками, полученными из фракции 0,63 мм. В целом релаксация прессовок из материала марки ПС50/50 требует меньшего времени, чем разгрузка напряжений в прессовках из материала марки Т1. В таблице приведены значения расчетных параметров k и τ для уравнения Кольрауша, определенные по экспериментальным данным согласно выражениям (7) и (8) для прессовок с пористостью 0 и 12 %. Видно, что для всех материалов с большей пористостью показатели k и τ ниже. В результате подстановки значений k и τ в аналитическое выражение (3) получаем прогнозные кривые релаксации уплотненного материала.

На рис. 6 представлены результаты расчетного и экспериментального определения времени релаксации прессовок из материалов Т1 (рис. 6, а и б) и ПС50/50 (рис. 6, в и г) фракций 2,5 и 0,63 мм соответственно.

Из анализа данных рис. 6 следует, что экспериментальные напряжения σ_i , возникающие при разгрузке уплотненного материала, убывают несколько быстрее, чем по экспоненциальному закону. Установлено, что существенные (более чем на 90 %) изменения экспериментальных значений σ_i завершаются к 5-й и 10-й минутам выдержки под нагрузкой прессовок, характеризующихся значениями пористости $\Pi = 12$ и 0 % соответственно. Это утверждение справедливо для всех марок и фракций используемых в эксперименте материалов. В целом динамику падения значений расчетных и экспериментальных напряжений σ_i следует считать совпадающей, удовлетворяющей требованиям задач настоящего исследования.

Расчетные параметры k и τ для уравнения Кольрауша, определенные по экспериментальным данным

Experimental k and τ values for the Kohlrausch equation

Марка материала	Фракция материала, мм	Пористость прессовки, %	Параметры аналитического выражения	
			k	τ
Т1	2,5	0	0,729	3,034
	2,5	12	0,589	1,478
	0,63	0	0,568	2,058
	0,63	12	0,375	0,706
ПС50/50	2,5	0	0,722	3,250
	2,5	12	0,401	1,023
	0,63	0	0,566	2,453
	0,63	12	0,313	0,742

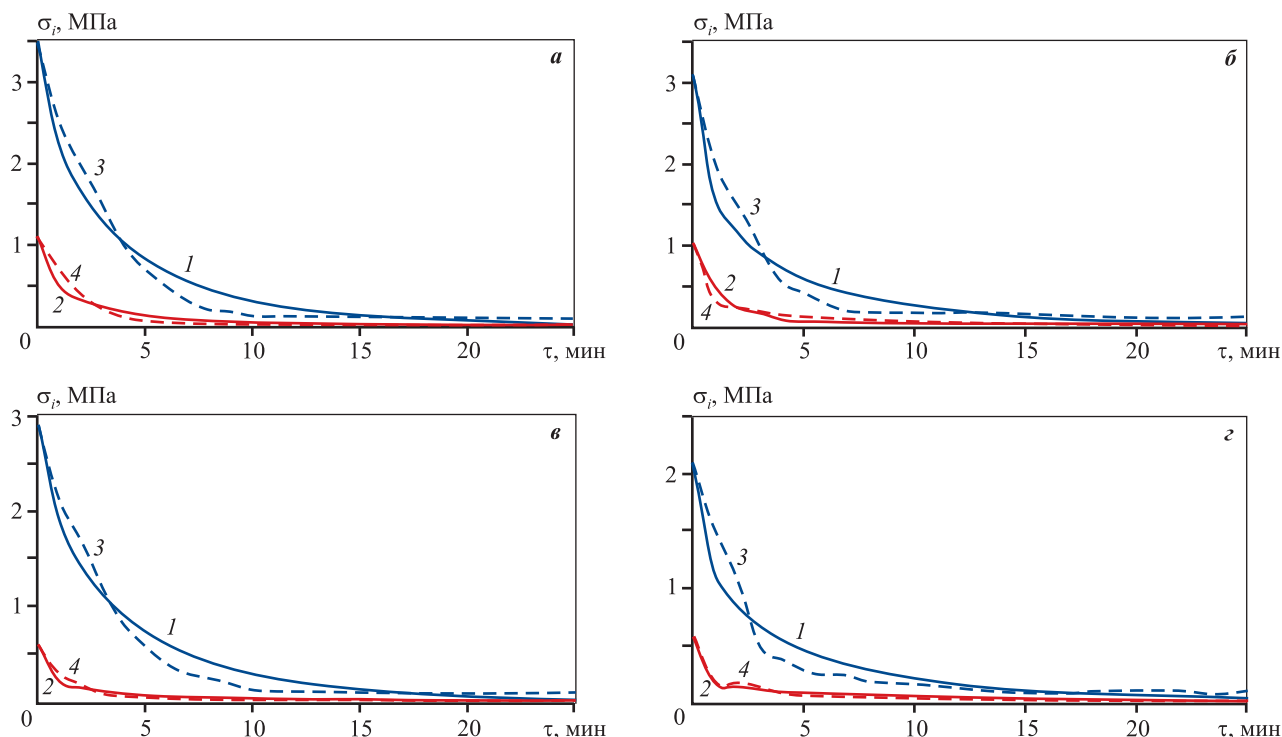


Рис. 6. Сравнение экспериментальных и расчетных экспоненциальных зависимостей напряжений от времени релаксации прессовок для различных материалов и фракций

a – T1, фракция 2,5 мм; *б* – T1, фракция 0,63 мм; *в* – ПС50/50, фракция 2,5 мм; *г* – ПС50/50, фракция 0,63 мм
1, 3 – $P = 0\%$; 2, 4 – $P = 12\%$

Сплошные кривые – расчет, штриховые – эксперимент

Fig. 6. Experimental and estimated stress vs. relaxation period curves for different wax grades and particle sizes

a – T1, 2.5 mm particle size; *б* – T1, 0.63 mm particle size; *в* – PS50/50, 2.5 mm particle size; *г* – PS50/50, 0.63 mm particle size
1, 3 – $P = 0\%$; 2, 4 – $P = 12\%$

Solid curves – estimated, dashed curves – experimental

Закключение

Установлено, что напряжения, возникающие на траверсе тестовой машины при уплотнении порошковых тел из более крупной фракции 2,5 мм, выше, чем при получении прессовок из фракции 0,63 мм, для всех материалов, использованных в эксперименте, что объясняется большей насыпной плотностью фракции 2,5 мм по сравнению с фракцией 0,63 мм, а также различиями в пластических свойствах материала, определяемыми в том числе температурой их плавления.

Определено, что напряжения, возникающие при разрушении прессовок сжатием, зависят от их пористости, задаваемой в эксперименте, тем больше, чем крупнее фракция материала, из которого получены прессовки, а показатель пропорциональности напряжений, рассмотренный в работе, позволяет практически прогнозировать значение прочности на сжатие будущей прессовки.

На основе расчетных параметров уравнения Кольрауша построены регрессионные экспоненциальные зависимости убывания значений напряжений во времени. Установлено, что экспериментальные напряжения σ_i , возникающие при разгрузке уплотненного материала, снижаются несколько быстрее, чем по экспоненциальному закону, и существенные изменения σ_i преимущественно завершаются к 5-й и 10-й минутам выдержки под нагрузкой прессовок. Очевидно, что отсутствие напряжений на траверсе тестовой машины по завершении релаксации материала прессовки свидетельствует об устранении упругого отклика материала и сохранении размеров прессовки в рамках задаваемых размеров формообразующей полости пресс-формы.

Результаты исследований могут быть использованы при прогнозировании конечных размеров различных участков прессовок из порошков широкой линейки воскообразных материалов, что

позволит в значительной степени повысить размерную и геометрическую точность отливок из обширной номенклатуры сплавов, используемых в ЛВМ. Получение литья по рассмотренному в работе технологическому процессу предусматривает внесение изменений в последовательность операций: замену пастообразного или жидкого модельного материала на порошок из того же материала фракций 0,63–2,5 мм; прессование порошкового тела с выдержкой прессовки под нагрузкой. Экспериментальные выплавляемые модели не имеют литейных дефектов в виде усадки, поверхностной волнистости или коробления, а их структура отличается рассредоточенной пористостью, определяющей снижение деформационного воздействия на оболочковую форму при выплавлении модельной массы, повышенную стойкость форм к образованию трещин и, следовательно, рост качества литья.

Список литературы/References

1. Dogancan Okumus, Sefer A. Gunbeyaz, Rafet Emek Kurt, Osman Turan. Towards a circular maritime industry: Identifying strategy and technology solutions. *Journal of Cleaner Production*. 2023;382:134935. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134935>
2. Gogolukhina M., Mamedova L. Organisational and economic aspects of deep modernisation and foundation projects of shipbuilding yards. *Transportation Research Procedia*. 2022;63:2072–2078. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.231>
3. Chernyshov E.A., Romanov A.D., Romanova E.A. The quality control of high-resistance steel casting by optimizing the tempering temperature. *Materials Today: Proceedings*. 2021;38(4):1488–1490. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.134>
4. Abayomi A. Akinwande, Adeolu A. Adediran, Oluwatoshin A. Balogun, Moses Ebiowei Yibowei, Abel A. Barnabas, Henry K. Talabi, Bayode J. Olorunfemi. Optimization of selected casting parameters on the mechanical behaviour of Al 6061/glass powder composites. *Heliyon*. 2022;8(5):e09350. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09350>
5. Li Changyun, Wu Shiping, Guo Jingjie, Su Yanqing, Bi Weisheng, Fu Hengzhi. Model experiment of mold filling process in vertical centrifugal casting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006;176(1–3):268–272. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.004>
6. Yiping Lu, Xuzhou Gao, Li Jiang, Zongning Chen, Tongmin Wang, Jinchuan Jie, Huijun Kang, Yubo Zhang, Sheng Guo, Haihui Ruan, Yonghao Zhao, Zhiqiang Cao, Tingju Li. Directly cast bulk eutectic and near-eutectic high entropy alloys with balanced strength and ductility in a wide temperature range. *Acta Materialia*. 2017;124:143–150. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.11.016>
7. Крушенко Г.Г. Повышение качества стального литья гребного винта для пассажирского речного судна. *Судостроение*. 2016;6(829):54–57. Krushenko G.G. Improvement of quality of steel casted propeller for river passenger vessel. *Sudostroenie*. 2016;6(829):54–57. (In Russ.).
8. Марков С.П., Муктепавел В.О., Мурзин В.В. Поверхностное упрочнение судовых гребных винтов из бронзы. *Морские интеллектуальные технологии*. 2019;4-1(46):97–101. Markov S.P., Muktepavel V.O., Murzin V.V. Surface hardening of the bronze ship propeller. *Morskie intelektual'nye tekhnologii*. 2019;4-1(46):97–101. (In Russ.).
9. Абашкин Е.Е., Ткачева А.В. Влияние предварительного подогрева пластины на значения и распределение остаточных напряжений, образованных в результате наплавки. *Морские интеллектуальные технологии*. 2022;3-1(57):310–318. <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.040> Abashkin E.E., Tkacheva A.V. Study of local combined heat impact on permanent joints. *Morskie intelektual'nye tekhnologii*. 2022;3-1(57):310–318. (In Russ.). <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.57.3.040>
10. Ayar M.S., Ayar V.S., George P.M. Simulation and experimental validation for defect reduction in geometry varied aluminium plates casted using sand casting. *Materials Today: Proceedings*. 2020;27:1422–1430. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.788>
11. Pan Tao, Heng Shao, Zhijun Ji, Hai Nan, Qingyan Xu. Numerical simulation for the investment casting process of a large-size titanium alloy thin-wall casing. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2018;28(4):520–528. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.06.005>
12. Kapranos P., Carney C., Pola A., Jolly M. 5.03 — Advanced casting methodologies: Investment casting, centrifugal casting, squeeze casting, metal spinning, and batch casting. *Comprehensive Materials Processing*. 2014;5:39–67. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00539-2>
13. Гаранин В.Ф., Иванов В.Н., Казеннов С.А., Курчман Б.С., Лищенко Н.Н., Озеров В.А., Рошан Н.Р., Сокол И.Б., Телис М.Я., Чулкова А.Д., Шкленник Я.И., Шкленник Л.Я. Литье по выплавляемым моделям. Под общ. ред. В.А. Озерова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1994. 448 с.
14. Радцевич Х.М. Расчет припусков и межоперационных размеров в машиностроении: Учеб. пос. М.: Высшая школа, 2004. 272 с.
15. Прокопчук Н.Р., Горшарик Н.Д., Ключев А.Ю., Коз-

- лов Н.Г., Рожкова Е.И., Латышевич И.А., Бакович Н.А. Модельные составы для точного литья. *Vesці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук*. 2015;(4):122–128.
- Prokopchuk N.R., Gorshcharik N.D., Klyuev A.Yu., Kozlov N.G., Rozhkova E.I., Latyshevich I.A., Bakovich N.A. Model compositions for precision casting. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk*. 2015;(4): 122–128. (In Russ.).
16. Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Управление структурой и свойствами пористых комбинированных удаляемых моделей. Владивосток, Дальнаука, 2007. 138 с.
 17. Foggia M.Di, D'Addona D.M. Identification of critical key parameters and their impact to zero-defect manufacturing in the investment casting process. *Procedia CIRP*. 2013;12:264–269.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.09.046>
 18. Оспенникова О.Г. Теплофизические и реологические характеристики синтетических смол для модельных композиций. *Литейное производство*. 2016;(10):26–28.
Ospennikova O.G. Thermophysical and rheological characteristics of synthetic resins for model compositions. *Liteinoe Proizvodstvo*. 2016;(10):26–28. (In Russ.).
 19. Tascioglu S., Akar N. Conversion of an investment casting sprue wax to a pattern wax by chemical agents. *Materials and Manufacturing Processes*. 2003; 18(5):753–768.
<https://doi.org/10.1081/AMP-120024973>
 20. Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Potianikhin D.A., Komarov O.N. Mesomechanics of technological properties of powdered polymer compacts in Lost Wax Casting. *AIP Conference Proceedings*. 2014;1623:543–546.
<https://doi.org/10.1063/1.4899002>
 21. Винокуров Г.Г., Попов О.Н. Статистическое моделирование корреляции локальной плотности макроструктуры при одностороннем прессовании порошковых материалов. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2011;13(1–3)(39):553–557.
Vinokurov G.G., Popov O.N. Statistical modeling of local density macrostructure correlation at one-sided pressing of powder materials. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2011;13(1–3)(39):553–557. (In Russ.).
 22. Zhilin S.G., Komarov O.N., Bogdanova N.A., Amosov O.S. Mathematical modelling of forming processes in the conditions of uniaxial compaction of powder wax-like materials. In: *CEUR Workshop Proceedings. "ITHPC 2021 — Short paper proceedings of the 6th International Conference on information technologies and high-performance computing"*. 2021. P. 148–154.
 23. Жилин С.Г., Богданова Н.А., Комаров О.Н., Соснин А.А. Снижение упругого отклика при уплотнении порошковой парафиностеариновой композиции. *Деформация и разрушение материалов*. 2020;(1):29–33.
<https://doi.org/10.31044/1814-4632-2020-1-29-33>
 - Zhilin S.G., Bogdanova N.A., Komarov O.N., Sosnin A.A. Decrease in the elastic response in compacting a paraffin—stearin powder composition. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2021;(4):459–463.
<https://doi.org/10.1134/S0036029521040376>
 24. Dong Y.W., Li X.L., Qi Zhao, Jun Yang, Ming Dao. Modeling of shrinkage during investment casting of thin-walled hollow turbine blades. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;244:190–203.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.005>
 25. Michio Ito, Toshio Yamagishi, Yoshiki Oshida, Carlos A. Munoz. Effect of selected physical properties of waxes on investments and casting shrinkage. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 1996;75(2):211–216.
[https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(96\)90101-8](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(96)90101-8)
 26. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология. Концепции, методы, приложения. М.: Профессия, 2007. 560 с.
 27. Малкин А.Я., Чалых А.Е. Диффузия и вязкость полимеров. М.: Химия, 1979. 304 с.
 28. Гальперин А.М., Шафаренко Е.М. Реологические расчеты горнотехнических сооружений. М.: Недра, 1977. 246 с.
 29. Жилин С.Г., Комаров О.Н., Потянихин Д.А., Соснин А.А. Экспериментальное определение параметров регрессионной зависимости Кольрауша для пористых прессовок из воскообразных порошковых композиций. *Инженерный журнал: Наука и инновации*. 2018;2(74):9.
<http://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-2-1732>
 - Zhilin S.G., Komarov O.N., Potyanikhin D.A., Sosnin A.A. Experimental determining parameters of Kohlrausch regression dependence for porous compacts from waxy powder compositions. *Inzhenernyi zhurnal: Nauka i innovatsii*. 2018;2(74):9. (In Russ.).
<http://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-2-1732>
 30. Жилин С.Г., Богданова Н.А., Комаров О.Н. Влияние параметров уплотнения порошкового тела из воскообразного материала на формирование остаточных напряжений прессовки. *Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния*. 2019;3(41):110–121.
<http://doi.org/10.26293/chgpu.2019.41.3.009>
 - Zhilin S.G., Bogdanova N.A., Komarov O.N. Influence of parameters of the compacting of powder body from wax-like material on the forming of residual stresses of pressing. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ya. Yakovleva. Seriya:*

- Mekhanika predelnogo sostoyaniya*. 2019;3(41):110–121. (In Russ.). <http://doi.org/10.26293/chgpu.2019.41.3.009>
31. Павлов В.И., Аскадский А.А., Слонимский Г.Л. Графоаналитический способ расчета механических характеристик материала по реакции напряжения при постоянной деформации. *Механика полимеров*. 1965;(6):16–19.
Pavlov V.I., Askadskii A.A., Slonimskii G.L. Graph-analytical method for calculating the mechanical characteristics of a material by stress relaxation at constant deformation. *Mekhanika polimerov*. 1965;(6):16–19. (In Russ.).
 32. Прибытков Г.А., Коржова В.В., Коростелева Е.Н. Прочностные свойства и особенности разрушения композитов систем Al–Cr и Al–Cr–Si, полученных горячим уплотнением порошковых смесей. *Деформация и разрушение материалов*. 2013;(8):13–20.
Pribytkov G.A., Korzhova V.V., Korosteleva E.N. Strength properties and features of destruction of composites of Al–Cr and Al–Cr–Si systems obtained by hot compaction of powder mixtures. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2013;(8):13–20. (In Russ.).
 33. Nicole K. Aragon, Sheng Yin, Hojun Lim, Ill Ryu. Temperature dependent plasticity in BCC micropillars. *Materialia*. 2021;19:101181.
<https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101181>
 34. Remo N. Widmer, Alexander Groetsch, Guillaume Kermouche, Ana Diaz, Gilles Pillonel, Manish Jain, Rajaprakash Ramachandramoorthy, Laszlo Pethö, Jakob Schwiedrzik, Johann Michler. Temperature-dependent dynamic plasticity of micro-scale fused silica. *Materials & Design*. 2022;215:110503.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110503>

Информация об авторах

Сергей Геннадьевич Жилин — к.т.н., доцент, вед. науч. сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий Института машиноведения и металлургии (ИМиМ) ДВО РАН.
<https://orcid.org/0000-0002-0865-7109>
E-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru

Нина Анатольевна Богданова — мл. науч. сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий ИМиМ ДВО РАН.
<https://orcid.org/0000-0002-8769-8194>
E-mail: joyful289@inbox.ru

Олег Николаевич Комаров — к.т.н., доцент, директор ИМиМ ДВО РАН.
<https://orcid.org/0000-0002-7121-4271>
E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru

Information about the authors

Sergey G. Zhilin — Cand. Sci. (Eng.), Associate Prof., Leading Researcher, Laboratory for the Problems of Creation and Processing of Materials and Products, Institute of Machinery and Metallurgy of Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.
<https://orcid.org/0000-0002-0865-7109>
E-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru

Nina A. Bogdanova — Junior Researcher, Laboratory of Problems of Creation and Processing of Materials and Products, Institute of Machinery and Metallurgy of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.
<https://orcid.org/0000-0002-8769-8194>
E-mail: joyful289@inbox.ru

Oleg N. Komarov — Cand. Sci. (Eng.), Associate Prof., Director of Institute of Machinery and Metallurgy of Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.
<https://orcid.org/0000-0002-7121-4271>
E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru

Вклад авторов

С.Г. Жилин — определение цели работы, участие в обработке экспериментальных данных и обсуждении результатов, написание статьи.

Н.А. Богданова — проведение экспериментов, участие в обработке экспериментальных данных и обсуждении результатов.

О.Н. Комаров — участие в обработке экспериментальных данных и обсуждении результатов.

Contribution of the authors

Sergey G. Zhilin — determination of the purpose of the work, participation in the processing of experimental data and discussion of the results, writing the article.

Nina A. Bogdanova — conducting experiments, participation in the processing of experimental data and discussion of the results.

Oleg N. Komarov — participation in the processing of experimental data and discussion of the results.

Статья поступила в редакцию 23.03.2023, доработана 06.04.2023, подписана в печать 10.04.2023

The article was submitted 23.03.2023, revised 06.04.2023, accepted for publication 10.04.2023

УДК 621.777

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-67-78>

Научная статья

Research article



Применение моделирования при проектировании инструмента для прессования полых профилей из алюминиевых сплавов

С.Б. Сидельников, С.С. Колосков, Н.Н. Довженко, Ю.А. Горбунов, Д.С. Ворошилов

Сибирский федеральный университет

660025, Россия, г. Красноярск, пр. Красноярский рабочий, 95

✉ Денис Сергеевич Ворошилов (sibdrug@mail.ru)

Аннотация: Для моделирования процесса прессования полых профилей из алюминиевых сплавов использованы разработанные ранее алгоритмы проектирования прессового инструмента и программный комплекс «QForm». Целью проведенных исследований являлось повышение качества и снижение сроков проектирования прессового инструмента для промышленных условий производства профилей из алюминиевых сплавов. Предложены новая методика проектирования комбинированного инструмента и технологии для полунепрерывного прессования со сваркой полых профилей из алюминиевых сплавов с помощью программного комплекса «QForm», который позволяет в диалоговом режиме оперативно проводить многовариантные расчеты с последующей, если необходимо, корректировкой технологических параметров прессования и геометрии инструмента. Созданы алгоритм и процедуры проектирования, которые дают возможность выполнить чертеж полого профиля, осуществить технологические расчеты параметров прессования и выбор горизонтального гидравлического пресса, спроектировать матрицу и рассекатель, провести прочностные расчеты, определить силовую загрузку оборудования и подготовить рабочие чертежи прессового инструмента. Для проверки работоспособности разработанной методики проектирования приведен пример ее реализации для одного из типовых полых профилей, изготавливаемого в промышленном производстве. Рассмотрено проектирование двух вариантов прессового инструмента. С помощью моделирования с использованием программы «QForm Extrusion», предназначенной для анализа процессов прессования, установлено, что первый вариант конструкции инструмента при заданных технологических параметрах и геометрии каналов рассекателя и матрицы приводит к неравномерности истечения различных элементов профиля из матрицы и равномерности распределения температур по его сечению. Промышленное опробование спроектированного инструмента на гидравлическом горизонтальном прессе с усилием 33 МН для прессования профиля из сплава 6063 показало, что существенной доработки матрицы и рассекателя не требуется. С применением предложенной конструкции прессового инструмента получены партии продукции, соответствующей требованиям действующих технических условий, при этом сроки проектирования прессового инструмента сокращены практически в 2 раза.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, полые профили, прессование, горизонтальный гидравлический пресс, комбинированный инструмент, технологические расчеты, методика и процедуры проектирования.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», номер проекта FSRZ-2020-0013.

Для цитирования: Сидельников С.Б., Колосков С.С., Довженко Н.Н., Горбунов Ю.А., Ворошилов Д.С. Применение моделирования при проектировании инструмента для прессования полых профилей из алюминиевых сплавов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(3):67–78. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-67-78>

Using simulation to design tool for pressing of hollow profiles from aluminum alloys

S.B. Sidelnikov, S.S. Koloskov, N.N. Dovzhenko, Yu.A. Gorbunov, D.S. Voroshilov

Siberian Federal University

95 Krasnoyarskiy Rabochiy prosp., Krasnoyarsk, 660025, Russia

✉ Denis S. Voroshilov (sibdrug@mail.ru)

Abstract: In order to simulate the pressing of hollow profiles made from aluminum alloys, the previously developed design algorithms for the pressing tool and the QForm software were utilized. The objective of this study was to enhance the quality and decrease the design time

intervals for pressing tools used in the industrial production of aluminum alloy profiles. A novel design procedure for a combined tool, along with the technology of semi-continuous pressing with welded hollow profiles made from aluminum alloys, was proposed. This was achieved using the QForm software, which enables efficient calculations and adjustments of pressing parameters and tool geometry through a dialog interface. The developed algorithm and design procedures enable the drawing of hollow profiles, technological calculations of pressing parameters, selection of a suitable horizontal hydraulic press, matrix and splitter design, determination of strength parameters, assessment of equipment load, and preparation of working drawings for the pressing tool. In order to validate the effectiveness of the design procedure, it was applied to typical hollow profiles fabricated on a commercial scale. Two variations of the pressing tool design were examined. Simulation results obtained from QForm Extrusion software, specifically designed for pressing analysis, revealed that the initial design of the tool, with predetermined technological parameters and geometry of the splitter and matrix channels, resulted in uneven flow of profile elements and temperature distribution. However, by adjusting the tool parameters, it was possible to achieve a straight profile exit from the matrix and a uniform temperature distribution across its cross section. Industrial verification of the designed tool, utilizing a 33 MN hydraulic horizontal press for pressing profiles made from alloy 6063, demonstrated that significant modifications to the matrix and splitter were not necessary. By employing the proposed pressing tool design, batches of products were successfully manufactured in compliance with the required technical specifications, while reducing the design time intervals of the pressing tool by approximately 50 %.

Keywords: aluminum alloys, hollow profiles, pressing, horizontal hydraulic press, combined tool, technological calculations, design methods and procedures.

Acknowledgement: We acknowledge the support provided by the Governmental contract of Siberian Federal University, Project FSRZ-2020-0013.

For citation: Sidelnikov S.B., Koloskov S.S., Dovzhenko N.N., Gorbunov Yu.A., Voroshilov D.S. Using simulation to design tool for pressing of hollow profiles from aluminum alloys. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(3):67–78.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-67-78>

Введение

Основным методом получения полых алюминиевых профилей в настоящее время является процесс полунепрерывного прессования с применением комбинированного инструмента [1–7]. Прессование профилей со сваркой в очаге деформации ведут через комбинированный инструмент, состоящий из матрицы, формирующей наружный контур профиля, и рассекателя, который непосредственно формирует его внутренний контур. По ходу прессования заготовка, помещенная в контейнер, разделяется с помощью рассекателя на несколько потоков металла, которые направляются в сварную камеру и после ее заполнения свариваются под действием высоких температур и давления в полый профиль требуемого сечения.

В процессе прессования равномерность скоростей истечения различных элементов профиля из матрицы имеет большое значение для получения качественного пресс-изделия. Если скорости перемещения элементов профиля существенно различаются, то могут наблюдаться такие дефекты, как скручивание, волна, прогиб, бочка, которые иногда невозможно устранить даже последующей правкой растяжением. Поэтому одной из важных задач при проектировании прессового инструмента является такое расположение профиля на зеркале матрицы и правильное назначение рабочих поясков торможения на различных участках, которые обеспечивали бы прямолинейный выход пресс-изделия из матрицы. Наряду с задачей

повышения качества профилей из алюминиевых сплавов необходимо решать и вопросы повышения производительности их производства. Наиболее перспективным направлением для повышения производительности остается уменьшение сроков реализации заказов посредством сокращения простоев и времени на всех производственных переделах, быстрой переналадки и запуска повторных операций.

Исследованиям в области прессования посвящены многие работы [8–20]. Однако до сих пор нет работоспособной методики и программного обеспечения для проектирования инструмента и технологии полунепрерывного прессования полых профилей из алюминиевых сплавов с использованием комбинированного инструмента.

Анализ научно-технической литературы показал, что наиболее приближенной к практическому применению является программа САПР INPRESS [21], представляющая собой пакет из 4 подсистем, каждая из которых включает комплекс процедур расчета и проектирования, обеспечивающих подготовку документации для реализации выбранного технологического процесса. При этом наряду с подсистемой проектирования сплошных профилей из алюминиевых сплавов, которая позволяет рассчитать калибрующие пояски и подготовить чертежи матриц, форкамер, подкладок и других видов прессового инструмента, а также определить силовые условия и выбрать оборудование для полунепрерывного прессования алюминиевых спла-

вов, имеется подсистема проектирования прессового инструмента и технологии для получения полых профилей. Однако она не нашла широкого использования из-за необходимости выполнения сложных процедур при проектировании матрицы и рассекателя, которые невозможно формализовать и перевести в автоматизированный вариант реализации. Поэтому до сих пор для проектирования комбинированного инструмента на заводах применяют интерактивный подход, основанный на опыте специалистов (конструкторов и технологов) в этой области [22–25].

Вместе с тем в последнее время для моделирования процессов прессования появилась программа «QForm Extrusion» [26] (компания «Кванторформ», г. Москва), которая базируется на методе конечных элементов. Ее преимуществами является то, что она позволяет промоделировать течение металла при прессовании и оценить качество профилей [27; 28], учесть влияние деформации инструмента на характер истечения профиля, а также ускорить процесс расчетов по сравнению с другими известными комплексами (например, DEFORM 3D). Это дает возможность оперативно провести несколько вариантов расчета и значительно сократить время на проектирование и освоение инструмента.

Целью работы являлось повышение качества и снижение сроков проектирования прессового инструмента для промышленных условий производства профилей из алюминиевых сплавов с использованием программного комплекса «QForm».

Методика проектирования

В целом, методика проектирования и расчет технологии прессования полых профилей идентичны методике проектирования для сплошных профилей [21] и включают следующие процедуры:

- 1) формирование чертежа нормали профиля:
 - создание чертежа нормали профиля;

- проведение типовых расчетов (периметра, площади, диаметра описанной окружности и т.п.);

- согласование чертежа нормали с заказчиком;

- 2) технологические расчеты и выбор основных параметров прессования:

- назначение коэффициента вытяжки;

- предварительный расчет силы прессования и выбор гидравлического пресса и количества каналов;

- расчет длины заготовки;

- 3) проектирование матричного комплекта:

- назначение припусков на размеры профиля;

- размещение профиля на зеркале матрицы;

- 4) проектирование рассекателя (карманов, языка, входной области на рассекателе и др.);

- 5) проектирование матрицы (сварочной камеры, предкамеры, назначение подрезки и угла выходной зоны и др.);

- 6) поверочный прочностной расчет и расчет консольных элементов инструмента;

- 7) назначение калибрующих поясков матрицы и рассекателя;

- 8) проектирование подкладки, спецподкладки и др.;

- 9) подготовка рабочих чертежей прессового инструмента;

- 10) расчет силы прессования и выбор пресса.

Применение данной методики позволяет существенно снизить сроки подготовки производства и объем металла, идущего на доработку прессового инструмента (рис. 1), и, в конечном счете, уменьшить себестоимость готовой продукции.

Результаты и их обсуждение

Покажем использование предлагаемой методики проектирования прессового инструмента на примере одного из типовых профилей из алюми-

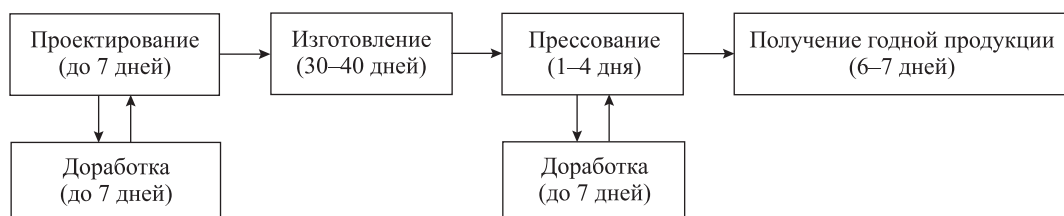


Рис. 1. Схема последовательности процедур проектирования инструмента с применением программы компьютерного моделирования «QForm Extrusion»

Fig. 1. Sequence of design procedures of the tool using QForm Extrusion simulation software

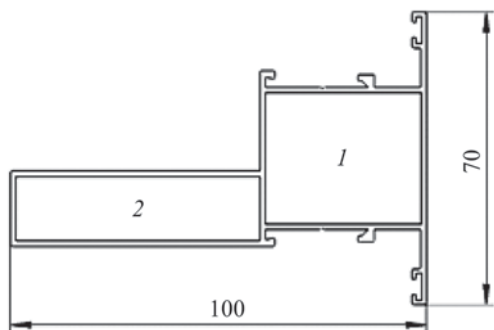


Рис. 2. Общий вид профиля из сплава 6063

Fig. 2. General view of profile from alloy 6063

ниевое сплава 6063, общий вид которого представлен на рис. 2. Профиль имеет две полости: квадратную 1 (первая часть) и прямоугольную 2 (вторая часть), толщина стенки равна 1,25 мм по всему периметру, а площадь поперечного сечения составляет 450 мм².

После создания чертежа нормали для прессования был выбран пресс усилием 33 МН, при этом коэффициент вытяжки составил 106. В качестве начальных геометрических параметров и технологических условий для моделирования процесса прессования были заданы следующие: диаметр контейнера 247 мм; диаметр заготовки (слитка) 242 мм; ее длина 1000 мм; температура заготовки 450 °С; температура матричного комплекта 480 °С; температура контейнера 430 °С; скорость прессования 2 мм/с.

В качестве граничных условий для расчета напряжений трения на контакте металла с инструментом использовали формулу А.Н. Леванова [26; 27]. Реологические и теплотехнические характеристики сплава 6063 были импортированы из библиотеки программного комплекса «QForm Extrusion».

Материалом прессового инструмента была выбрана сталь 4Х5МФС повышенной теплостойкости в соответствии с требованиями к нему технических условий горячего прессования, при этом твердость составляла $HRC = 55\div 58$.

На рис. 3 показаны 3D-модели инструмента для выбранного профиля: первая использовалась для моделирования в качестве исходной (рис. 3, а), а вторая (рис. 3, б) — после корректировки по результатам моделирования.

Диаметр комплектов составлял 340 мм, у каждого раскатателя было по 6 карманов, разделяющих сплошную заготовку на 6 потоков металла, которые далее по ходу движения соединялись в

сварной камере и сваривались вокруг языка раскатателя с образованием 7 швов протяженностью по всей длине профиля. У второй конструкции для обеспечения одинакового количества металла, проходящего через карманы в единицу времени, общая площадь карманов раскатателя на входе в него составила 11416 мм². Вытяжка на входе в раскататель была снижена до 4,2 ед., что привело к увеличению стойкости инструмента и снижению силы прессования.

Создав 3D-модель в «QExDD», проводили построение сетки для расчетной области и инструмента в программе «QShape» (рис. 4). Модели описывали фигурами треугольной формы, количество которых для первой конструкции составило 825 тыс. элементов, а для второй — 900 тыс. После построения сетки модели переместили в программу «QForm Extrusion», где задавали основные технологические параметры процесса, реологические и теплотехнические свойства сплава 6063, граничные условия трения и проводили расчеты.

На рис. 5 представлено распределение скоростей на различных элементах профиля, полученное с помощью программы «QForm Extrusion» с применением первой конструкции инструмента. Видно, что скорость квадратной части профиля (части 1) равна 220 мм/с, при этом нет отклонения от прямолинейности. Однако скорость прямоугольного участка профиля (части 2) практически в 2 раза меньше, что приводит к браку.

При анализе температуры металла по элементам профиля (рис. 6) установлено, что в ходе прессования с применением первого варианта конструкции прессового инструмента температура распределена неравномерно и изменяется от 520 до 570 °С. Это может привести к термической де-

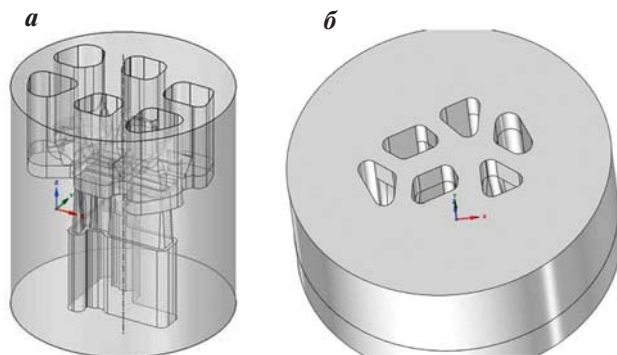


Рис. 3. 3D-модели прессового инструмента

а — первый вариант; б — второй вариант

Fig. 3. 3D models of pressing tool

а — the initial variant; б — the second variant

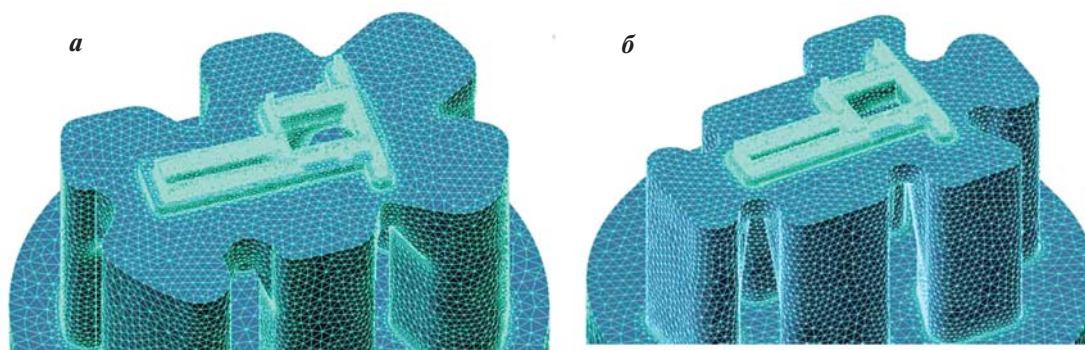


Рис. 4. Разбиение расчетной области на конечные элементы

a — для первого варианта конструкции инструмента; *б* — для второго варианта

Fig. 4. Subdivision of calculated region into finite elements

a — for the initial design of the tool; *б*— for the second design of the tool

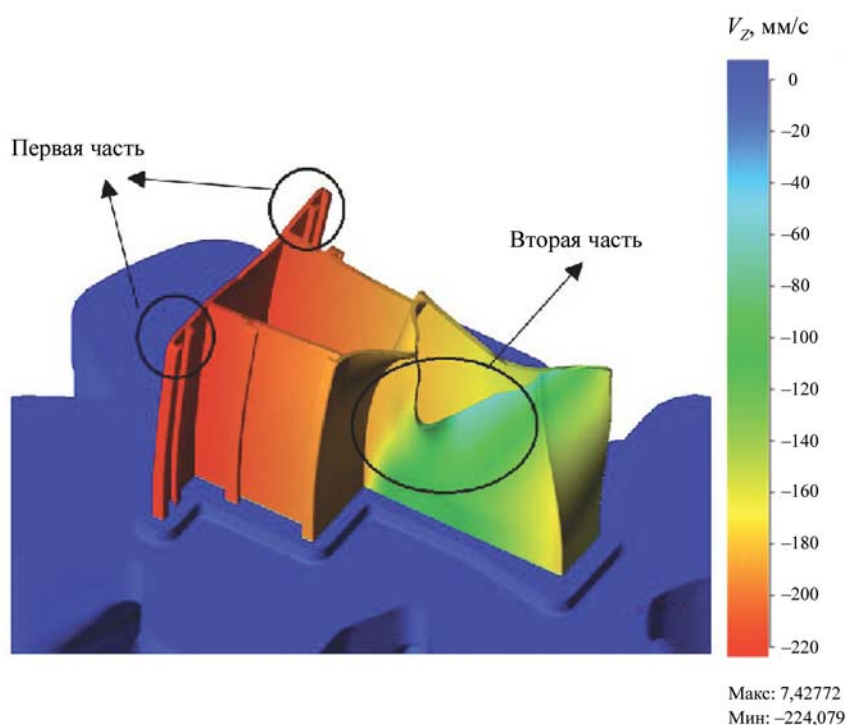


Рис. 5. Распределение скоростей по сечению профиля для первого варианта конструкции инструмента

Fig. 5. Velocity distribution over the profile cross section for the initial tool design

формации профиля, а при высоких температурах на отдельных его участках — к перегреву металла и появлению термических трещин.

Расчеты напряженно-деформированного состояния показали, что упругая деформация инструмента достигает 1 мм по оси прессования, а прогиб рабочих поясков — до $\pm 0,5$ град. Все эти факторы могут привести к быстрому выходу из строя матричного комплекта за счет износа рабочих поясков, появления трещин и т.п. Попытки

доработать первоначальную конструкцию инструмента путем моделирования за счет изменения высоты рабочего пояска, создания дополнительных притоков металла и т.п. не принесли результата. Поэтому было принято решение об использовании для моделирования второго варианта конструкции инструмента (см. рис. 3, б).

Радиус описанной окружности по входным карманам рассекателя также был равен 210 мм при диаметре контейнера 247 мм, тем самым дефекты и

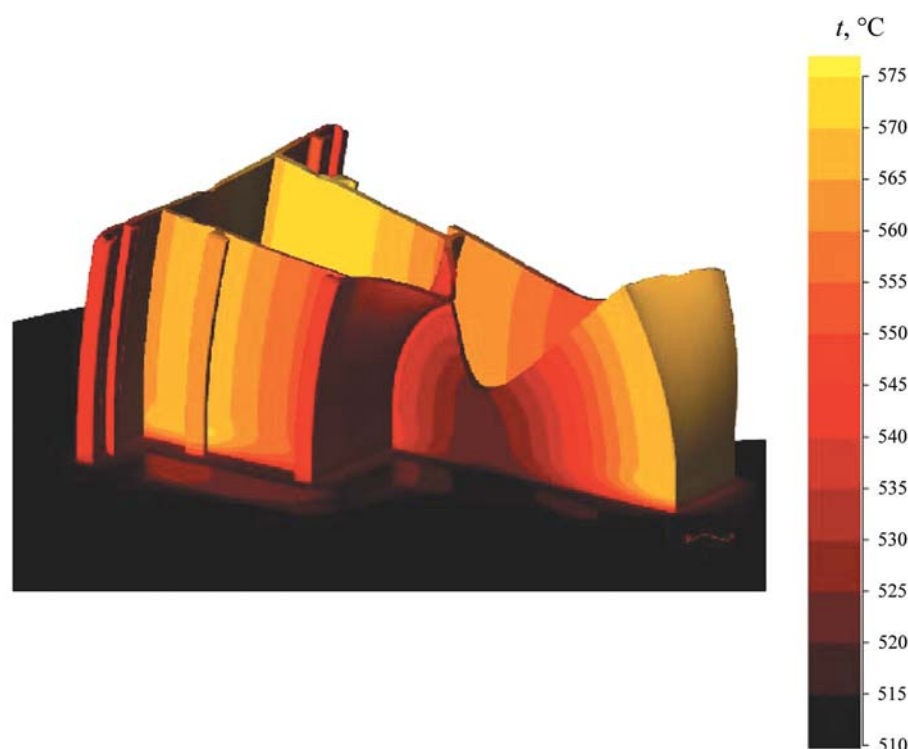


Рис. 6. Распределение температур по элементам профиля для первого варианта конструкции инструмента

Fig. 6. Temperature distribution over profile elements for the initial variant of the tool design

неоднородность химического состава [29; 30], которые наблюдаются в периферийных слоях слитка, не попадают в профиль, а остаются в мертвых зонах контейнера (рис. 7). Высота языка рассекателя была уменьшена до 16,5 мм, поэтому увеличилась жесткость конструкции, за счет уменьшения плеча снизился момент силы. Перепад рабочих поясков между матрицей и рассекателем составил 0,5 мм. Сварная камера и предкамера строились по такому же алгоритму, что и для первой конструкции инструмента, при этом высота сварной камеры и предкамеры составила 12 и 5 мм соответственно. Так как сварная камера после перепроектирования имела меньшую площадь, можно было ожидать, что с изменением формы карманов рассекателя увеличилась стойкость инструмента. Подрезку и выходную часть матрицы оставили такую же, как и у первоначальной конструкции инструмента. Рабочие пояски матрицы и рассекателя (рис. 8) были скорректированы с учетом новой конструкции карманов рассекателя и фактической геометрии профиля, полученной при использовании первой конструкции инструмента.

Результаты моделирования процесса прессования с теми же технологическими параметрами

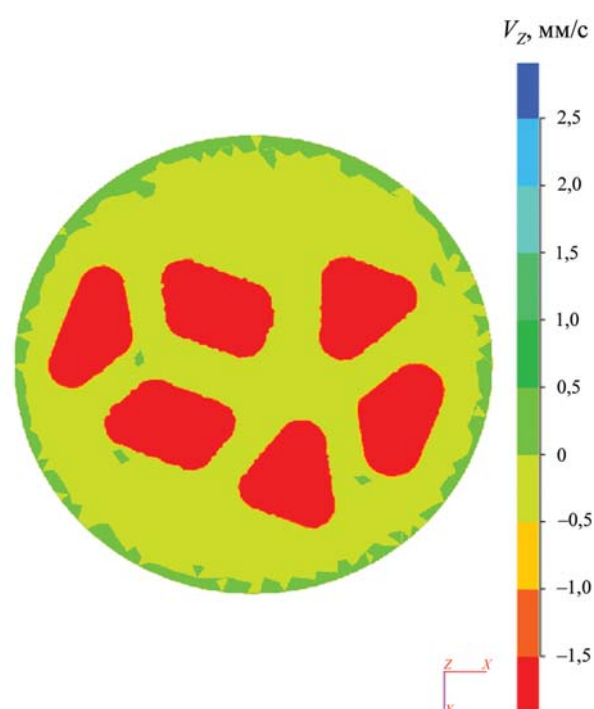


Рис. 7. Схема формирования мертвых зон в контейнере перед входом в карманы рассекателя

Fig. 7. Schematic view of formation of dead zones in container in front of input to splitter boxes



струкции инструмента (см. рис. 10) показало, что распределение скоростей по всему сечению профиля равномерно (скорость составляет 212 мм/с), а эффективность ее применения была подтверждена полученным распределением температур (рис. 11). Видно, что разброс температур не превышает 10 °С, а средняя температура профиля составляет 550 °С, что соответствует технологическим требованиям реализации процесса полунепрерывного прессования полых профилей из сплава 6063. Для проверки результатов моделирования в промышленных условиях одного из металлургических заводов РФ

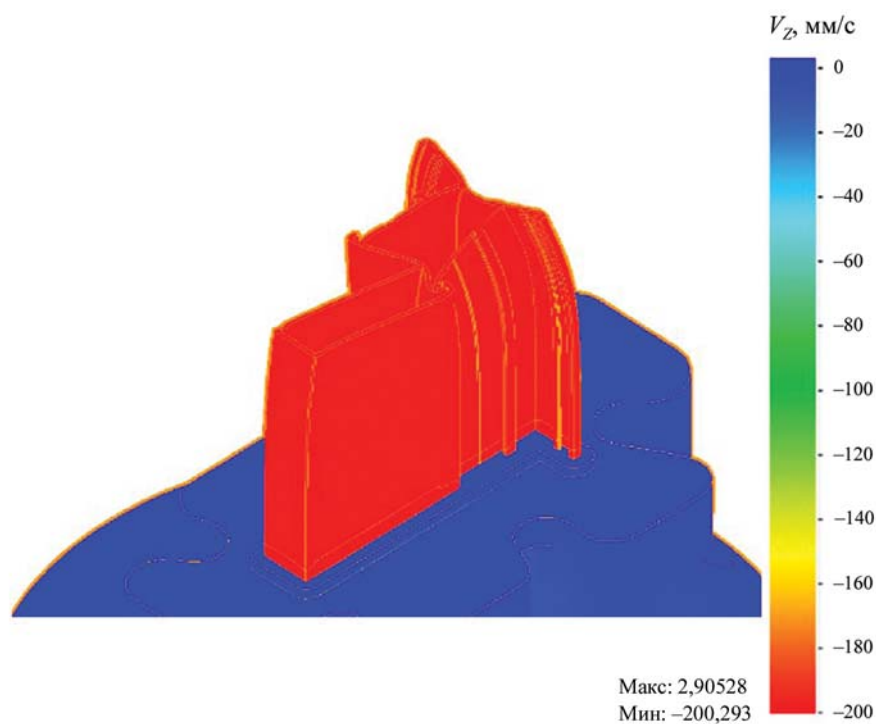


Рис. 10. Распределение скоростей по сечению профиля для второго варианта конструкции инструмента после ее доработки

Fig. 10. Velocity distribution over the profile cross section for the second variant of the tool design after its modification

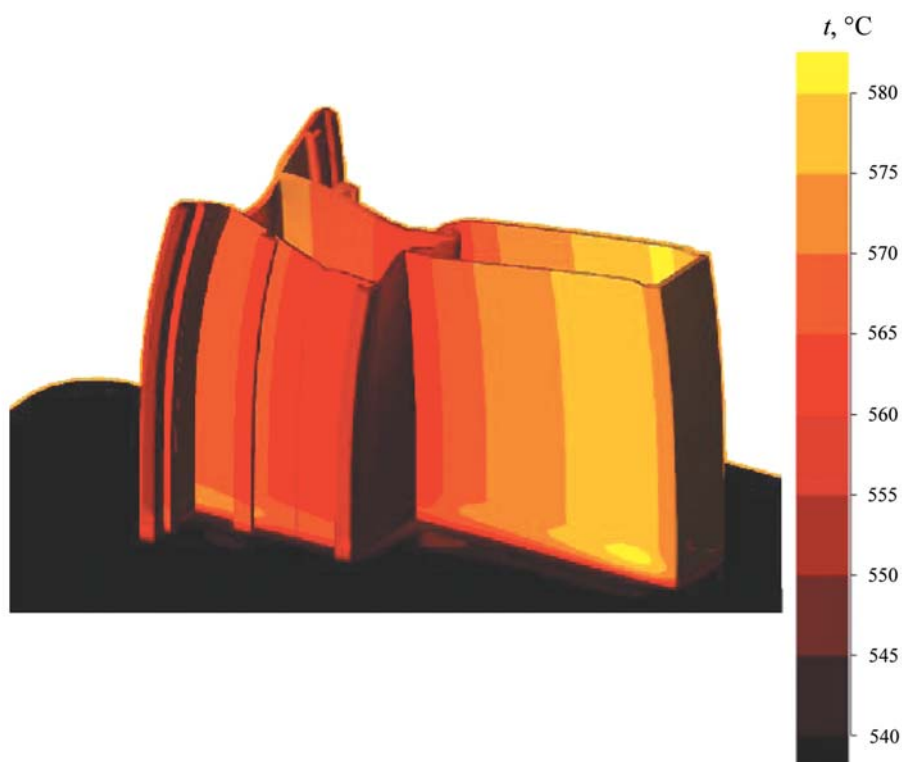


Рис. 11. Распределение температуры по элементам профиля для второго варианта конструкции инструмента

Fig. 11. Temperature distribution over the profile elements for the second variant of the tool design

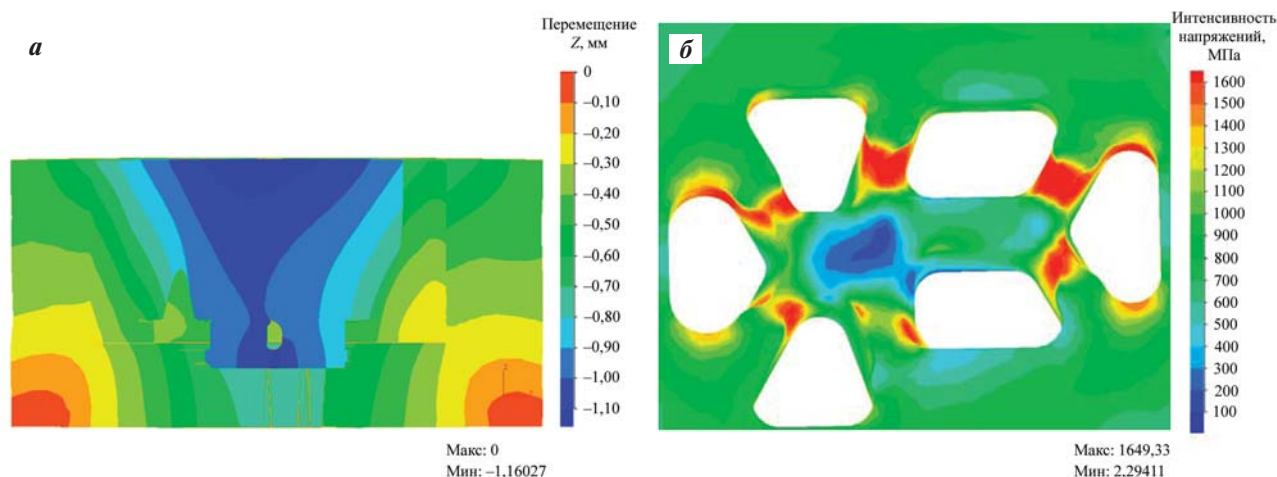


Рис. 12. Деформация инструмента (а) и интенсивность напряжений (б)

Fig. 12. Tool deformation (a) and stress intensity (b)

на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 33 МН проводили опытное прессование полых профилей указанных выше размеров из сплава 6063. При этом установлено, что сроки проектирования комбинированного прессового инструмента и его освоения снижены практически в 2 раза, а с использованием предложенной конструкции прессового инструмента получены профили требуемого качества.

Результаты расчета упругой деформации и интенсивности напряжений, полученные с помощью «QForm Extrusion», показаны на рис. 12. Видно, что инструмент подвергается значительной упругой деформации во время прессования и прогибается на 1 мм по оси прессования, из-за чего при высокой интенсивности напряжений в нем могут появиться дефекты типа трещин.

На основании анализа этих данных моделирования было принято решение перепроектировать камеру на входе в рассекатель и увеличить радиусы скругления рассекателя, что привело к уменьшению нагрузок на инструмент и силы прессования.

Заключение

Таким образом, выполнено моделирование процесса прессования полых профилей из алюминиевых сплавов с помощью предложенной методики проектирования прессового инструмента с использованием программного комплекса «QForm Extrusion», что позволило исключить повторные доработки новых матричных комплектов из-за пробного прессования после их изготовления и сократить, тем самым, сроки запуска новой но-

менклатуры профилей в производство. Для проверки результатов моделирования в промышленных условиях одного из металлургических заводов РФ на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 33 МН проведено опытное прессование полых профилей из сплава 6063 (см. рис. 2). Установлено, что существенной доработки матрицы и рассекателя не требуется, а с применением предложенной конструкции прессового инструмента получена промышленная продукция, соответствующая требованиям действующих технических условий.

Список литературы/References

1. Саха П.К. Технология прессования алюминия. М.: НП АПРАЛ, 2015. 352 с.
2. Баузер М., Зауер К., Зигерт Г. Прессование: Справ. руководство. Пер. с нем. по лицензии издательства «Aluminium Verlag Marketing & Kommunikation GmbH». М.: Алусил МВ и Т, 2009. 922 с.
3. Логинов Ю.Н., Инарович Ю.В. Инструмент для прессования металлов: Учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2014. 224 с.
4. Щерба В.Н. Прессование алюминиевых сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 768 с.
5. Qiang Li, Chris Harris, Mark R. Jolly. Finite element modelling simulation of transverse welding phenomenon in aluminium extrusion process. *Materials & Design*. 2003;24(7):493–496.
[https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(03\)00123-7](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00123-7)
6. Barbara Reggiani, Antonio Segatori, Lorenzo Donati, Luca Tomesani. Prediction of charge welds in hollow

- profiles extrusion by FEM simulations and experimental validation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;(69):1855–1872.
<https://doi.org/10.1007/s00170-013-5143-2>
7. Longchang Tong, Christoph Becker, Pavel Hora. High efficiency in the simulation of complex extrusion processes using an advanced simulation method. *Materials Today: Proceedings*. 2015;2(10):4726–4731.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.10.005>
 8. Kim K.J., Lee C.H., Yang D.Y. Investigation into the improvement of welding strength in three dimensional extrusion of tubes using porthole dies. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002;(130):426–431.
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00717-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00717-3)
 9. Xiaochen Lu, Junquan Yu, Jianguo Lin, Zhusheng Shi. Investigation of material flow behaviour and microstructure during differential velocity sideways extrusion. *Procedia Manufacturing*. 2020;(50):226–230.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.042>
 10. Колосков С.С., Сидельников С.Б., Берсенева А.С., Лопатина Е.С., Ворошилов Д.С., Катрюк В.П. Исследование технологии прессования труб из алюминиевых сплавов с применением программ компьютерного моделирования. *Производство проката*. 2019;(12):23–28.
<https://doi.org/10.31044/1814-4632-2019-0-12-23-28>
Koloskov S.S., Sidelnikov S.B., Bersenev A.S., Lopatina E.S., Voroshilov D.S., Katryuk V.P. Technology study of aluminum alloys pipe pressing with use of computer simulation programs. *Proizvodstvo Prokata*. 2019;(12):23–28. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31044/1814-4632-2019-0-12-23-28>
 11. Junquan Yu, Guoqun Zhao. Interfacial structure and bonding mechanism of weld seams during porthole die extrusion of aluminum alloy profiles. *Materials Characterization*. 2018;(138):56–66.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.01.052>
 12. Crosio Michele, Hora David, Becker Christoph, Hora Pavel. Realistic representation and investigation of charge weld evolution during direct porthole die extrusion processes through FE-analysis. *Procedia Manufacturing*. 2018;(15):232–239.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.214>
 13. Junquan Yu, Guoqun Zhao. Study on welding quality in the porthole die extrusion process of aluminum alloy profiles. *Procedia Engineering*. 2017;(207):401–406.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.795>
 14. Junquan Yu, Guoqun Zhao, Weichao Cuib, Cunsheng Zhanga, Liang Chen. Microstructural evolution and mechanical properties of welding seams in aluminum alloy profiles extruded by a porthole die under different billet heating temperatures and extrusion speeds. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;(247):214–222.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.04.030>
 15. Bakker A.J.D., Katgerman L., Zwaag S.V.D. Analysis of the structure and resulting mechanical properties of aluminium extrusions containing a charge weld interface. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016;(229):9–21.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.013>
 16. Bingol Sedat, Bozaci Atilla. Experimental and numerical study on the strength of aluminum extrusion welding. *Materials*. 2015;8(7):4389–4399.
<https://doi.org/10.3390/ma8074389>
 17. Mahmoodkhani Y., Wells M., Parson N., Poole W.J. Numerical modelling of the material flow during extrusion of aluminium alloys and transverse weld formation. *Journal of Material Processing Technology*. 2014;(214):688–700.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.09.028>
 18. Stebunov S., Biba N., Lishny A., Jiao L. Practical implementation of numerical modeling to optimization of extrusion die design for production of complex shape profiles. *Aluminium Extrusion and Finishing*. 2013;(4):20–24.
http://www.qform3d.co.uk/files_uk/2013_0002_0.pdf
 19. Libura W., Rękas A. Numerical modelling in designing aluminium extrusion in: aluminium alloys: New trends in fabrication and applications. Ed. by Zaki Ahmad. INTECH, 2012. P. 137–157. <https://doi.org/10.5772/51239>
 20. Koloskov S., Sidelnikov S., Voroshilov D. Modeling process of semi-continuous extrusion of hollow 6063 aluminum alloy profiles using QForm extrusion. *Solid State Phenomena*. 2021;(316):288–294.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.288>
 21. Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Васина Г.И. Система автоматизированного проектирования технологии прессования металлов. Научное методическое обеспечение. Красноярск: ГАЦМиЗ, 2000. 194 с.
 22. Алешин В.П. Расчет рабочих поясков прессовых матриц. *Технология легких сплавов*. 1990;(1):30–33.
Aleshin V.P. Calculation of working bands of press dies. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 1990;(1):30–33. (In Russ.).
 23. Гун Г.Я., Аверченко А.Ф., Стебунев С.А. К методике автоматизированного проектирования прессовых матриц. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1985;(7):92–95.
Gun G.Ya., Averchenko A.F., Stebunov S.A. On the method of computer-aided design of press dies. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1985;(7):92–95. (In Russ.).
 24. Эйдельмант С.Б., Корпаков Б.П., Майзлин Я.Л. Проектирование с помощью ЭВМ матриц для прессования профилей. *Цветные металлы*. 1982;(3):81–82.
Eidelnant S.B., Korpakov B.P., Maizlin Ya.L. Designing with the help of a computer matrices for pressing profiles. *Tsvetnye Metally*. 1982;(3):81–82. (In Russ.).

25. Степанский Л.Г. Расчетные оценки калибровок пресс-матриц. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1983;(5):25–27.
Stepanskiy L.G. Estimated estimates of press matrix calibrations. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. 1983;(5):25–27. (In Russ.).
26. QForm-Extrusion (электронный ресурс). Моделирование прессования профилей. URL: <https://qform3d.ru/products/extrusion> (дата обращения: 20.04.2023).
27. Князькин И.С., Дюжев А.М., Власов А.В., Гладков Ю.А., Лишний А.И. Методика автоматизированного проектирования матричной оснастки для прессования алюминиевых сплавов. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана* (Электрон. журнал). 2015;(8):1–13.
Knyaz'kin I.S., Dyuzhev A.M., Vlasov A.V., Gladkov Yu.A., Lishniy A.I. Technique for computer-aided design of matrix tooling for pressing aluminum alloys. *Science and Education. MSTU im. N.E. Bauman* (Electron. Magazine). 2015;(8):1–13. (In Russ.).
28. Дюжев А.М., Князькин И.С., Лишний А.И., Соловьев Д.А., Стебунов Д.А. Программа для автоматизированного поэлементного параметрического проектирования матричной оснастки для прессования профилей QForm Extrusion Die Designer (QExDD): Св-во 2015613466 (РФ). 2015.
29. Леванов А.Н., Колмогоров В.Л., Буркин С.П., Картак Б.Р., Ашпур Ю.В., Спасский Ю.И. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. М.: Металлургия. 1975. 352 с.
30. Лаптев А.М., Ткаченко Я.Ю., Жабин В.И. Построение диаграммы для определения коэффициента трения в формуле Леванова по методу осадки кольца. *Обработка материалов давлением*. 2011;3(28): 129–132.
Laptev A.M., Tkachenko Ya.Yu., Zhabin V.I. Construction of a diagram for determining the coefficient of friction in the Levanov formula using the ring upset method. *Obrabotka materialov davleniem*. 2011;3(28):129–132. (In Russ.).

Информация об авторах

Сергей Борисович Сидельников — д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением (ОМД) Института цветных металлов (ИЦМ) Сибирского федерального университета (СФУ).
<https://orcid.org/0000-0002-5611-2808>
E-mail: sbs270359@yandex.ru

Сергей Сергеевич Колосков — аспирант кафедры ОМД, ИЦМ СФУ.
<https://orcid.org/0000-0002-4076-7295>
E-mail: kelos36@mail.ru

Николай Николаевич Довженко — д.т.н., профессор кафедры машиностроения Политехнического института СФУ.
<https://orcid.org/0000-0001-7608-0615>
E-mail: n.dovzhenko@bk.ru

Юрий Александрович Горбунов — д.т.н., профессор кафедры ОМД, ИЦМ СФУ.
<https://orcid.org/0000-0001-9835-7881>
E-mail: j.a.gorbunov@gmail.com

Денис Сергеевич Ворошилов — к.т.н., доцент, заведующий кафедрой ОМД, ИЦМ СФУ.
<https://orcid.org/0000-0002-1406-3665>
E-mail: sibdrug@mail.ru

Information about the authors

Sergei B. Sidelnikov — Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Metal Forming (MF) of the School of Non-Ferrous Metals (SNFM) of Siberian Federal University (SFU).
<https://orcid.org/0000-0002-5611-2808>
E-mail: sbs270359@yandex.ru

Sergei S. Koloskov — Postgraduate Student of the Department of MF of SNFM, SFU.
<https://orcid.org/0000-0002-4076-7295>
E-mail: kelos36@mail.ru

Nikolai N. Dovzhenko — Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering of the Polytechnic School, SFU.
<https://orcid.org/0000-0001-7608-0615>
E-mail: n.dovzhenko@bk.ru

Yurii A. Gorbunov — Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of MF of SNFM, SFU.
<https://orcid.org/0000-0001-9835-7881>
E-mail: j.a.gorbunov@gmail.com

Denis S. Voroshilov — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of MF of SNFM, SFU.
<https://orcid.org/0000-0002-1406-3665>
E-mail: sibdrug@mail.ru

Вклад авторов

С.Б. Сидельников — формирование основной концепции, постановка цели исследования, подготовка текста статьи, формулировка выводов.

С.С. Колосков — осуществление расчетов, проведение моделирования, подготовка текста статьи.

Н.Н. Довженко — разработка методики проектирования инструмента и обоснование ее применения, анализ результатов исследований.

Ю.А. Горбунов — научное руководство, корректировка текста и выводов.

Д.С. Ворошилов — подготовка и проведение экспериментов, подготовка текста по экспериментальной части.

Contribution of the authors

S.B. Sidel'nikov — formulated main concept, formulated purpose of the study, wrote the manuscript, formulated conclusions.

S.S. Koloskov — performed calculations, performed simulation, wrote the manuscript.

N.N. Dovzhenko — developed methods of tool design, substantiated its application, analyzed the research results.

Yu.A. Gorbunov — scientific advising, revised the manuscript and conclusions.

D.S. Voroshilov — prepared and performed experiments, wrote the experimental section of the manuscript.

Статья поступила в редакцию 07.02.2023, доработана 12.04.2023, подписана в печать 20.04.2023

The article was submitted 07.02.2023, revised 12.04.2023, accepted for publication 20.04.2023

УДК 620.172.2.087.45

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-79-88>

Научная статья

Research article



Применение метода корреляции цифровых изображений для построения диаграмм деформирования в истинных координатах

А.Д. Монахов¹, М.М. Гуляев², Н.Е. Гладышева², О.Ю. Коптельцева², В.В. Автаев¹,
Н.О. Яковлев¹, И.В. Гулина¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
105005, Россия, г. Москва, ул. Радио, 17

² АО «Конструкторское бюро приборостроения им. академика А.Г. Шипунова»
300004, Россия, г. Тула, ул. Щегловская Засека, 59

✉ Антон Дмитриевич Монахов (ant.monakhov@gmail.com)

Аннотация: Приведены особенности определения диаграмм деформирования в координатах «истинное напряжение — истинная деформация» на образцах круглого сечения из алюминиевого сплава системы Al—Cu—Mg—Zn. Выполнено сравнение расчетных и экспериментальных методов определения истинных напряжений и деформаций. Расчетные методы, основанные на применении условия постоянства объема, могут не отражать действительных закономерностей деформирования на этапе локализации деформации в материале исследуемого образца, в то время как использование систем корреляции цифровых изображений (КЦИ) позволяет проводить измерения как геометрических размеров деформируемого образца, так и полей деформаций на его поверхности, в том числе непосредственно в шейке образца. Показано, что ошибка измерения диаметра образца по полю координат в момент разрушения составила 0,02 мм. С целью повышения точности измерения предложено увеличение частоты съемки пропорционально возрастанию скорости деформирования, а также проведение измерения координат поверхности с двух сторон образца. Также возможно дополнять полученные с помощью оптических систем КЦИ кривые деформирования результатами измерения истинного разрушающего напряжения и истинной разрушающей деформацией, определенными расчетным способом по разрушенному образцу. Представленные способы исследования пластического течения материала непосредственным измерением полей перемещений и деформаций позволяют устанавливать действительные закономерности между истинными напряжениями и деформациями на участке неравномерного пластического деформирования, чего достичь аналитическим пересчетом условной диаграммы невозможно. Полученные коэффициенты упрочнения и кривые деформирования могут быть использованы при моделировании и проектировании конструкций и деталей машин.

Ключевые слова: истинное напряжение, истинная деформация, пластическая деформация, поле деформации, корреляция цифровых изображений, деформационное упрочнение.

Для цитирования: Монахов А.Д., Гуляев М.М., Гладышева Н.Е., Коптельцева О.Ю., Автаев В.В., Яковлев Н.О., Гулина И.В. Применение метода корреляции цифровых изображений для построения диаграмм деформирования в истинных координатах. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(3):79–88. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-79-88>

Using the method of correlation of digital images for plotting stress–strain curves in true coordinates

A.D. Monakhov¹, M.M. Gulyaev², N.E. Gladysheva², O.Yu. Kopteltseva², V.V. Avtaev¹,
N.O. Yakovlev¹, I.V. Gulina¹

¹ All-Russian Research Institute of Aviation Materials of the National Research Center “Kurchatov Institute”
17 Radio str., Moscow, 105005, Russia

² Joint Stock Company “Design Bureau of Instrument Engineering named after Academician A.G. Shipunov”
59 Shcheglovskaya Zaseka str., Tula, 300004, Russia

✉ Anton D. Monakhov (ant.monakhov@gmail.com)

Abstract: This article describes the features of determining strain curves in true stress–true strain coordinates, using samples of circular cross section from Al—Cu—Mg—Zn aluminum alloy. The calculation and experimental methods of determining true stresses and strains were compared.

© 2023 г. А.Д. Монахов, М.М. Гуляев, Н.Е. Гладышева, О.Ю. Коптельцева, В.В. Автаев, Н.О. Яковлев, И.В. Гулина

Calculation methods based on the condition of volume constancy may not reflect actual regularities of deformation at the stage of strain localization in the considered material. Nevertheless, the use of systems of digital image correlation (DIC) allows measurements of both the geometrical sizes of deformed sample and strain fields on its surface to be performed, including on the sample neck. It was demonstrated that the measurement error of the sample diameter by the coordinate field was 0.02 mm at the instance of destruction. In order to improve the measurement precision, an increase in the recording frequency in proportion to increase in strain rate was proposed, as well as measuring the surface coordinates from both sides of the sample. It is also possible to supplement the strain curves obtained by DIC optical systems with the measurements of true fracture stress, and the true fracture strain determined by calculations on the destructed sample. The presented methods of analysis of plastic flow by direct measurement of field displacements and strains allow actual regularities between true stresses and strains at the interval of irregular plastic strain to be established. This cannot be achieved by analytical conversion of conventional curve. The obtained hardening coefficients and strain curves can be used for simulation and design of machinery structures and parts.

Keywords: true stress, true strain, plastic strain, strain field, correlation of digital images, strain hardening.

For citation: Monakhov A.D., Gulyaev M.M., Gladysheva N.E., Kopteltseva O.Yu., Avtaev V.V., Yakovlev N.O., Gulina I.V. Using the method of correlation of digital images for plotting stress–strain curves in true coordinates. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(3):79–88. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-79-88>

Введение

Проектирование конструкций и деталей машин необходимо проводить с учетом обеспечения их безопасной эксплуатации. Допускаемые эксплуатационные напряжения определяют по критериям предельного напряженного состояния [1; 2], которые, в свою очередь, сравнивают с результатами, полученными при одноосном деформировании [3–6]. Стандартное испытание на растяжение или сжатие позволяет определить диаграммы деформирования в координатах «напряжение–деформация» (кр. 1 на рис. 1) [7]. Диаграммы «напряжение–деформация» также называют условными, так как площадь поперечного сечения образца и базу измерения деформации принимают постоянными на протяжении всего испытания. Для установления действительных закономерностей между напряжением и деформацией [8], а также при моделировании задач пластичности методом конечных элементов [9; 10] необходимо оперировать истин-

ными напряжениями и истинными деформациями (кр. 2 на рис. 1), которые рассчитывают соотношением нагрузки и абсолютного удлинения образца к действительной площади поперечного сечения и длине рабочей части соответственно.

Развитие вычислительной техники позволило проводить исследования закономерностей пластического течения материала не только аналитическими методами [8, 11], но и непосредственным измерением перемещений, деформаций или геометрии объекта в области локальной потери устойчивости. В данной работе рассмотрено применение систем оптической бесконтактной тензометрии для определения диаграмм деформирования в истинных координатах. Выполнено сравнение способов расчета истинных напряжений аналитическими и экспериментальными методами непосредственной регистрации деформации и площади поперечного сечения в области локализации пластического течения для изотропных материалов.

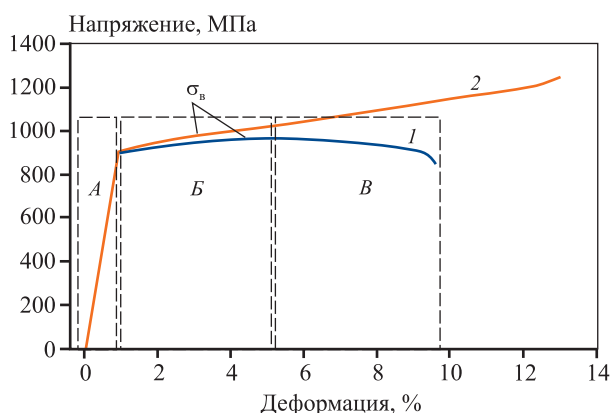


Рис. 1. Условная (1) и истинная (2) диаграммы деформирования

Fig. 1. Conditional (1) and true (2) strain curves

Расчетный способ определения диаграмм деформирования в истинных координатах

На условной диаграмме деформирования пластичного материала можно выделить три характерных участка. Для участка упругопластического деформирования (область А на рис. 1) характерно несущественное различие условной и истинной диаграмм в силу небольших деформаций. Участок упрочнения (область В на рис. 1) характеризуется монотонным возрастанием напряжения как в истинных, так и в условных координатах и ограничивается пределом прочности (σ_B). На участке локализации пластической деформации (область В

на рис. 1) наблюдается образование шейки на образце — переход от равномерной деформации, действующей по всей длине рабочей части, к сосредоточенной, вследствие чего происходит падение нагрузки при росте деформации. Область образования шейки также характеризуется переходом от одноосного (простого) напряженного состояния к сложному напряженно-деформированному, которое оказывает существенное влияние на процесс деформирования [12; 13].

Расчетным способом площадь поперечного сечения образца в процессе испытания для участков упругопластического деформирования и упрочнения определяют из условия постоянства объема [11]:

$$F_0 dz = F(1 + \varepsilon) dz, \quad (1)$$

где F_0 — площадь поперечного сечения образца в начальный момент испытания; F — площадь поперечного сечения образца в процессе деформирования; ε — относительная деформация; dz — абсолютное изменение длины в процессе деформирования.

Площадь поперечного сечения выражают из соотношения (1):

$$F = F_0 / (1 + \varepsilon). \quad (2)$$

Истинные напряжения при равномерной деформации равны отношению нагрузки при деформировании к площади поперечного сечения, полученной из соотношения (2):

$$s = P / F = \sigma(1 + \varepsilon), \quad (3)$$

где s — истинные напряжения; P — нагрузка в процессе деформирования; σ — условные напряжения.

Истинные деформации определяют как отношение абсолютного удлинения к общей длине расчетной зоны [11]:

$$\varphi = \int_{l_0}^l dl / l = \ln(l / l_0) = \ln(1 + \varepsilon), \quad (4)$$

где φ — истинные деформации; l — общая длина расчетной зоны; l_0 — исходная длина рабочей зоны.

Диаграмму деформирования в истинных координатах для равномерной деформации строят по соотношениям (3), (4); истинную деформацию при разрыве и истинное напряжение при разрыве наносят на диаграмму деформирования и рассчитывают по следующим соотношениям [11; 12]:

$$s_p = \sigma_p / (1 - \psi), \quad (5)$$

где s_p — истинные напряжения при разрыве; σ_p —

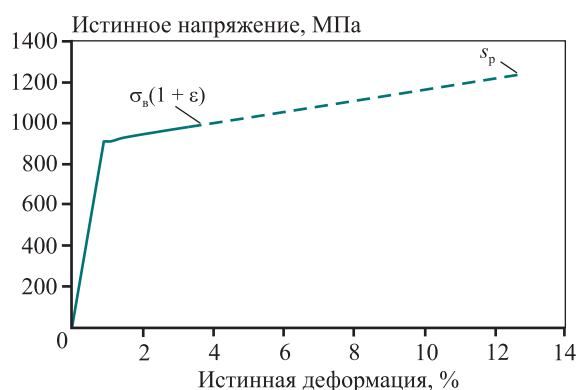


Рис. 2. Схематичная диаграмма деформирования в истинных координатах, полученная расчетным способом

Fig. 2. Schematic strain curve in true coordinates obtained by calculations

условные напряжения при разрыве; ψ — относительное сужение после разрыва;

$$\varphi_p = \ln(1 - \psi)^{-1}, \quad (6)$$

где φ_p — истинные деформации при разрыве.

Расчетный способ построения диаграмм деформирования в истинных координатах (рис. 2) не требует специального оборудования и характеризуется простотой, однако диаграмма может не отражать действительных закономерностей деформирования на участке локализации пластической деформации. Способ рекомендуют использовать для хрупких материалов.

Определение диаграмм деформирования в истинных координатах с помощью полей деформаций

Контроль полей деформаций и перемещений позволяет проводить расчет истинных напряжений и деформаций для всех участков деформирования. Существует несколько способов определения полей перемещений и деформаций [14; 15]. В связи с достаточной точностью [16] и простотой использования был выбран метод корреляции цифровых изображений (КЦИ).

Метод КЦИ основан на видеосъемке образца в процессе испытания и попеременном сравнении кадров до и после деформирования для определения смещений равномерно разделенных между собой участков поля (подобластей). Предварительно на образец наносят хаотичную пятнистую структуру (спекл-структуру) таким образом, чтобы каждая подобласть была отлична от остальных.

По смещениям подобластей рассчитывают поля перемещений и деформаций. Использование двух камер в системе позволяет определять положение точек и рассчитывать их перемещение в 3 координатах.

Системы КЦИ позволяют формировать поле из локальных деформаций по всей исследуемой поверхности образца, в том числе в зоне шейки, в то время как экстензометры проводят измерения между двумя заранее определенными точками. Таким образом, деформация, полученная с помощью экстензометров на участке образования шейки, является среднеарифметической между локализованной и равномерной пластической деформацией по базе измерения, и выделить из общей деформации равномерную или локализованную не представляется возможным.

Подставив среднеарифметическое значение продольной деформации ($\epsilon_{yy}^{\max}$) по поперечному срезу шейки образца (рис. 3) в соотношения (3) и (4) вместо относительной деформации (ϵ), получим уравнения для определения истинных напряжений и деформаций по продольной компоненте тензора деформаций для любого этапа деформирования [17]:

$$s = \sigma(1 + \epsilon_{yy}^{\max}), \quad (7)$$

$$\varphi = \ln(1 + \epsilon_{yy}^{\max}). \quad (8)$$

Способ позволяет проводить исследование на всех стадиях деформирования, однако соотношения (7) и (8) выведены из условия постоянства объема для изотропных материалов — соответственно, возможность применения этих соотношений для ортотропных и анизотропных материалов требует более детального исследования.

Контроль положения подобластей при расчете полей перемещений и деформаций позволяет проводить измерение диаметра образца в любой момент испытания по всей длине исследуемой области. С помощью метода наименьших квадратов была вписана окружность в координаты точек поперечного среза в плоскости наибольшего сужения образца. По соотношению (9) определяли диаметр образца в процессе деформирования:

$$d_i = 2[(x - a)^2 + (y - b)^2]^{1/2}, \quad (9)$$

где x, y — координаты точек окружности по соответствующим осям; a, b — координаты центра окружности по осям X, Y соответственно.

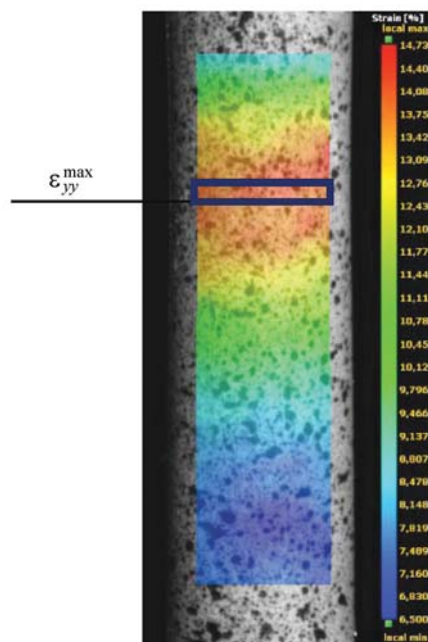


Рис. 3. Поле продольной компоненты тензора деформации ϵ_{yy}

Fig. 3. Field of longitudinal component of strain tensor ϵ_{yy}

Проведение испытаний

Определение диаграмм деформирования в истинных координатах проводили на образце круглого сечения из алюминиевого сплава системы Al—Cu—Mg—Zn. Диаметр образца составлял 5,92 мм, длина рабочей части — 30 мм. Испытание проводили на электромеханической испытательной машине с номинальным усилием 100 кН при постоянной скорости движения активного захвата, которая составляла 2 мм/мин. Продольную деформацию (ϵ) фиксировали бесконтактным экстензометром на протяжении всего испытания. Поля деформаций определяли с помощью системы КЦИ, состоящей из двух камер с разрешением 3 Мпикс, которые обеспечили плотность пикселей 31 пикс/мм, шаг подобласти составлял 8 пикс, размер подобласти — 25×25 пикс, частота съемки — 5 Гц. Физико-механические характеристики образца, определенные по условной диаграмме деформирования (рис. 4), приведены в табл. 1, относительное удлинение (δ_5) и относительное сужение (ψ) были установлены в соответствии с ГОСТ 1497-84.

На рис. 5 цифрами 1 и 2 обозначены координаты точек среза в исходном состоянии и в ситуации, предшествующей разрушению образца, соответственно. Диаметр вписанной окружности для об-

Таблица 1. Физико-механические характеристики исследуемого образца

Table 1. Physicomechanical properties

Коэффициент Пуассона μ	Модуль упругости E , ГПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление σ_B , МПа	Напряжение при разрыве σ_p , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Относительное сужение ψ , %
0,32	72	600	640	593	10,0	20,0

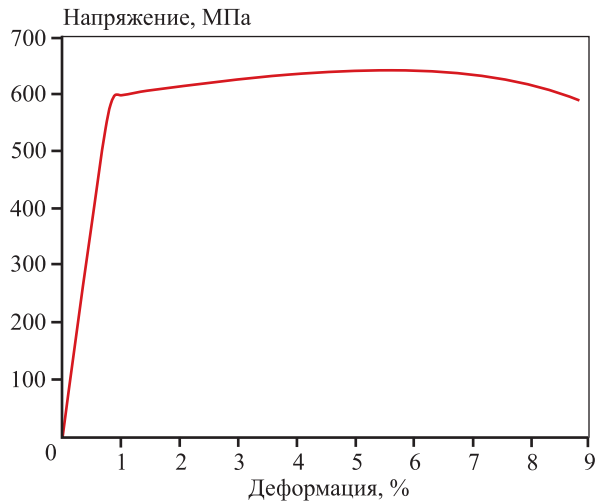


Рис. 4. Диаграмма деформирования в условных координатах

Fig. 4. Strain curve in conditional coordinates

разца до деформирования (линия 1 на рис. 5) соответствовал 5,92 мм, а для состояния образца перед разрушением (2 на рис. 5) — 5,24 мм.

Предполагалось, что фактический диаметр образца после разрыва будет больше диаметра, измеренного по вписанной окружности, на величину, равную упругой составляющей от ϵ_{xx} , и должен составлять 5,25 мм, так как образец в момент измерения диаметра еще находился в напряженном состоянии. Однако фактический диаметр образца после разрыва был меньше измеренного по вписанной окружности и составлял 5,23 мм. Это объясняется тем, что испытание проводили при постоянной скорости движения активного захвата и постоянной частоте съемки, и в результате локализации деформации происходило увеличение скорости деформирования с $0,0002 \text{ с}^{-1}$ на упругом участке до $0,018 \text{ с}^{-1}$ в моменте, предшествовавшем разрушению. Так, на рис. 6 представлены диаграмма зависимости истинной деформации от времени испытания (кривая 1) и ее производная от времени — скорость деформирования (кр. 2) для участков упругопластического деформирования (А),

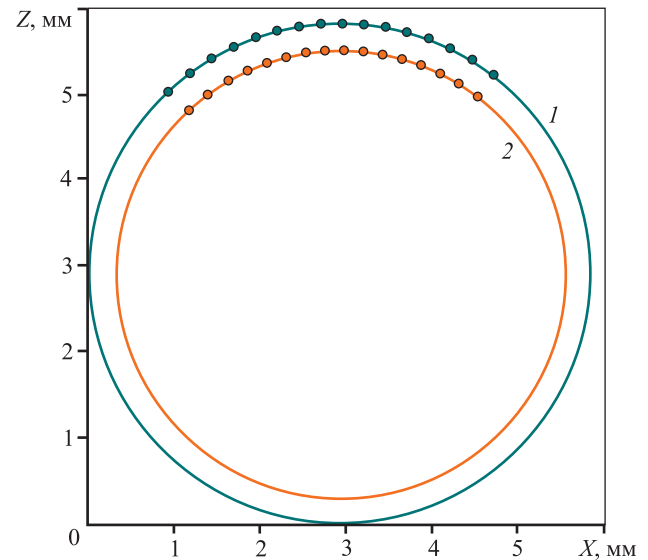


Рис. 5. Измерение диаметра образца по вписанной окружности

Fig. 5. Diameter measurement by inscribed circle

упрочнения (Б) и локализации пластического течения (В). Соответственно, съемка при частоте 5 Гц позволяла разрешать истинную деформацию с точностью 0,0036 м/м за кадр в момент, предшествовавший разрушению.

По полученным значениям диаметра рассчитывали истинные напряжения:

$$S = P/F = 4P/(\pi d_i^2), \quad (10)$$

где P — нагрузка в процессе деформирования, d_i — диаметр образца в процессе деформирования.

Стоит отметить, что в результате сложного и неоднородного напряженно-деформированного состояния, возникающего в области локализации деформации [12; 13], деформация образца может быть неравномерной, поэтому профиль поперечного сечения будет отличен от окружности. Для учета эксцентриситета при расчете площади поперечного сечения в процессе деформирования рекомендуют проводить исследования полей перемещений и деформаций с двух противоположных

сторон 4 камерами, откалиброванными в единую систему [18].

По результатам испытаний были построены кривые деформирования в истинных координатах (рис. 7). Показаны диаграмма 1, построенная

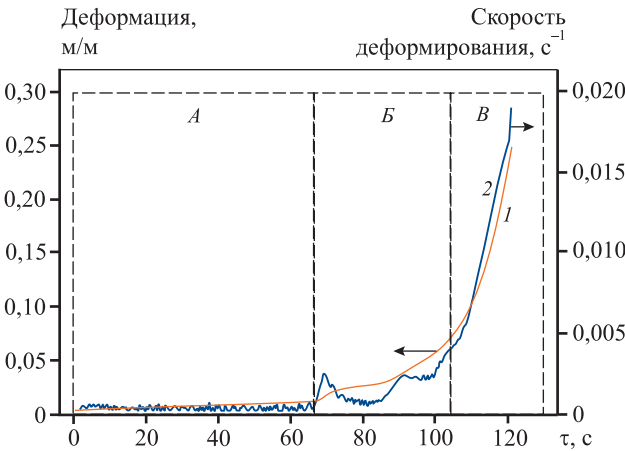


Рис. 6. Диаграмма зависимости относительной деформации от времени испытания

Fig. 6. Relative strain as a function of test duration

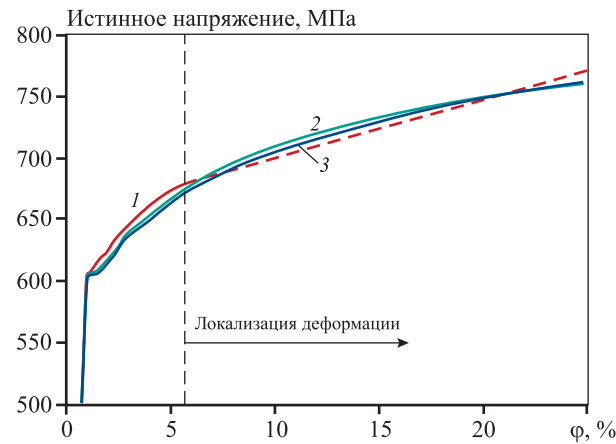


Рис. 7. Диаграммы деформирования в истинных координатах

Fig. 7. Strain curves in in true coordinates

расчетным способом, участок кривой (штриховая линия), линейно-интерполированный до точки, полученной по соотношениям (5), (6), а также диаграмма 2, построенная с помощью продольной деформации Лагранжа — ϵ_{yy} , и диаграмма 3, рассчитанная по фактическому изменению диаметра в процессе деформирования.

Упругие участки нагружения на кривых деформирования в истинных координатах для всех способов расчета совпадают. Различия наблюдаются на участке упрочнения.

Наиболее распространенным и простым способом аппроксимации пластического поведения материала является уравнение Холломона [19–21], коэффициенты которого могут быть использованы также для описания деформационного упрочнения материала при моделировании методом конечных элементов:

$$S = Kp^n, \quad (11)$$

где K — коэффициент прочности, определяемый на основе метода наименьших квадратов, МПа; n — коэффициент деформационного упрочнения, рассчитываемый с помощью метода наименьших квадратов; p — истинная пластическая деформация; S — истинное напряжение, МПа.

На рис. 8 представлены участки упрочнения в координатах «истинное напряжение — истинная пластическая деформация» для диаграмм деформирования в истинных координатах, полученные расчетным способом (рис. 8, а), по полю продольных деформаций в области локализации деформации (рис. 8, б), а также по расчету диаметра образца с помощью вписанной окружности в координаты точек наибольших продольных деформаций (рис. 8, в). Пунктирной линией на рис. 8 показана их степенная модель аппроксимации, полученная методом наименьших квадратов по данным логарифмически-линеаризованной кривой упрочнения. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчетов диаграмм деформирования в истинных координатах

Table 2. Calculations of strain curves in true coordinates

Метод определения	K , МПа	n	Истинное разрушающее напряжение (S_p), МПа	Истинная деформация при разрыве (ϕ_p), %
Расчетный	792	0,0518	771	25,1
По продольной компоненте тензора деформаций	834	0,0685	761	24,9
По изменению диаметра образца	831	0,0687	762	24,9

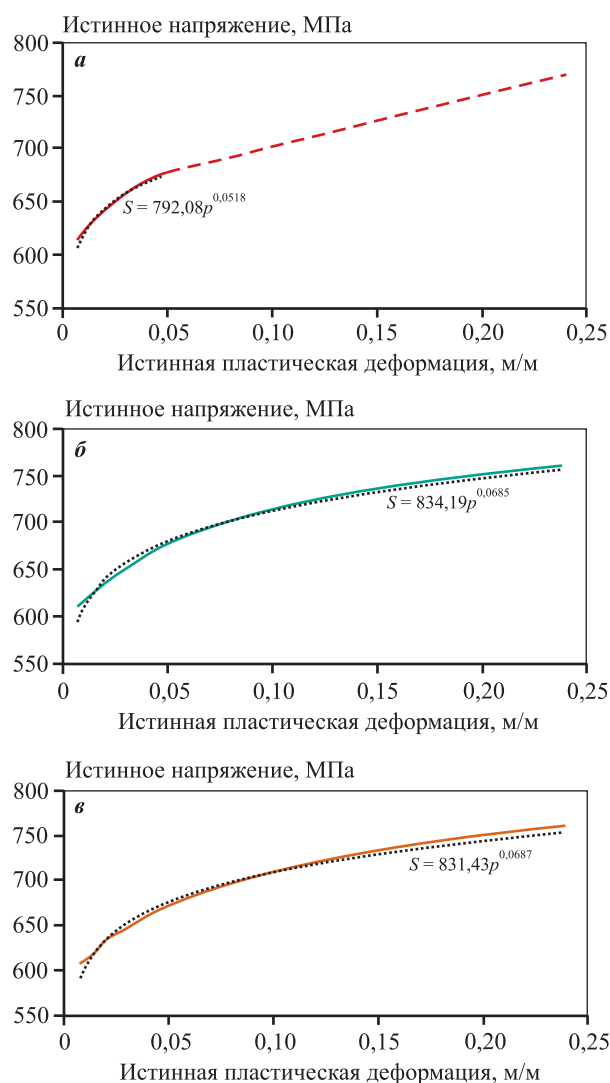


Рис. 8. Участки упрочнения диаграмм деформирования в истинных координатах, полученные расчетным методом (**а**), по полю продольных деформаций в шейке образца (**б**) и по изменению диаметра образца (**в**)

Fig. 8. Hardening segments of strain curves in true coordinates obtained by calculations (**a**), by field of longitudinal strain in sample neck (**b**) and by change in diameter (**v**)

Для участка упрочнения, полученного расчетным методом, модель аппроксимации определена только до предела прочности, что говорит о невозможности ее применения для деформаций, превышающих деформации, соответствующие пределу прочности. В то же время методы, основанные на использовании систем КЦИ, позволяют определять зависимость истинных напряжений от истинных деформаций вплоть до разрушения образца. Однако для более равномерного контроля деформации в шейке образца оптической систе-

мой управление испытательной машиной необходимо осуществлять по истинным деформациям или повышать частоту съемки на системе КЦИ пропорционально увеличению скорости деформирования образца. В противном случае полученные с помощью оптических систем КЦИ кривые деформирования необходимо дополнять истинным разрушающим напряжением и истинной разрушающей деформацией, определенными расчетным способом по разрушенному образцу.

Заключение

Диаграммы деформирования в истинных координатах предоставляют данные о деформационном упрочнении материала, которые могут быть использованы при моделировании и проектировании деталей и конструкций [9; 22].

Способы исследования пластического течения материала непосредственным измерением полей перемещений и деформаций позволяют устанавливать действительные закономерности между истинными напряжениями и деформациями на участке неравномерного пластического деформирования, чего достичь аналитическим пересчетом условной диаграммы невозможно. Также следует учитывать, что после образования шейки происходит увеличение скорости деформирования, приводящее к дополнительным ошибкам расчета истинных напряжений и деформаций, которые в момент разрушения образца достигают 1,3 % относительно значений, полученных фактическим измерением образца после разрушения. Однако расчетный метод определения диаграмм в истинных координатах прост в использовании и не требует дополнительного оборудования и программного обеспечения. Определенными с его помощью истинным разрушающим напряжением и истинной деформацией при разрыве можно дополнить результаты фактического измерения.

Выбор способа расчета диаграмм деформирования в истинных координатах обуславливается требованием к полноте результатов, а также типом материала. Стоит отметить, что оба метода, основанные на применении систем КЦИ, предоставляют одинаковый объем данных, а разница между полученными результатами в настоящей работе незначительна (разница между истинными разрушающими напряжениями — менее 0,2 %). Однако использование продольной компоненты тензора деформаций при исследовании анизотропных материалов может привести к ошибкам расчета. Та-

ким образом, предпочтительным является способ, основанный на измерении фактического диаметра образца в процессе деформирования с помощью систем КЦИ с двух сторон.

Список литературы/References

- Орешко Е.И., Ерасов В.С., Гриневич Д.В., Шершак П.В. Обзор критериев прочности материалов. *Труды ВИАМ*. 2019;(9(81)):108–126. Oreshko E.I., Erasov V.S., Grinevich D.V., Shershak P.V. Review of criteria of durability of materials. *Trudy VIAM*. 2019;(9(81)):108–126. (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-9-108-126>
- Яковлев Н.О., Гриневич Д.В., Мазалов П.Б. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при сжатии сетчатой конструкции, синтезированной методом селективного лазерного сплавления. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки*. 2018;(6(81)):113–127. Yakovlev N.O., Grinevich D.V., Mazalov P.B. Mathematical simulation of the stress-strain state manifesting during compression of a lattice structure manufactured by means of selective laser melting. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman. Seriya Estestvennye nauki*. 2018;(6(81)):113–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2018-6-113-127>
- Каблов Е.Н., Подживотов Н.Ю., Луценко А.Н. О необходимости создания единого информационно-аналитического центра авиационных материалов РФ. *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2019;(3):28–34. Kablov E.N., Podzhivotov N.Yu., Lutsenko A.N. About need for creation of uniform information and analysis center of aviation materials of the Russian Federation. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*. 2019;(3):28–34. (In Russ.).
- Гриневич А.В., Славин А.В., Яковлев Н.О., Монахов А.Д., Гулина И.В. К вопросу откольного разрушения высокопрочной стали при квазистатическом растяжении. *Деформация и разрушение материалов*. 2021;(8): 2–7. Grinevich A.V., Slavin A.V., Yakovlev N.O., Monakhov A.D., Gulina I.V. On problem of spalling fracture of high-strength steel under quasi-static tension. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2021;(8):2–7. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1814-4632-2021-8-2-7>
- Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения. *Вестник РФФИ*. 2017;(3):97–105. Kablov E.N. Formation of domestic space materials science. *Vestnik RFFI*. 2017;(3):97–105. (In Russ.). <https://doi.org/10.22204/2410-4639-2017-095-03-97-105>
- Dowling N. Mechanical behavior of materials: Engineering methods for deformation, fracture and fatigue. 4 ed. Essex: Pearson, 2013. 977 p.
- Орешко Е.И., Ерасов В.С., Крылов В.Д. Построение трехмерных диаграмм деформирования для анализа механического поведения материала, испытанного при различных скоростях нагружения. *Авиационные материалы и технологии*. 2018;(2(51)):59–66. Oreshko E.I., Erasov V.S., Krylov V.D. Construction of 3d stress-strain diagram for the analysis of mechanical behavior of the material tested at various loading rates. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2018;(2(51)):59–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-2-59-66>
- Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. 311 с.
- Petrík A., Ároch R. Usage of true stress-strain curve for FE simulation and the influencing parameters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;566:012025. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/566/1/012025>
- Terhorst M., Ozhoga-Maslovskaja O., Trauth D., Mattfeld P., Klocke F. Finite element-based modeling of strain hardening in metal forming. *Steel Research International*. 2016;87(10):1323–1332. <https://doi.org/10.1002/srin.201500375>
- Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Соппротивление материалов. М.: Наука, 1986. 561 с.
- Osintsev A.V., Plotnikov A.S., Morozov E.M., Lubkova E.Yu. On the location of a neck formation during the tension of cylindrical specimens. *Letters on Materials*. 2017;7(3):260–265. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2017-3-260-265>
- Junfu Chen, Zhiping Guan, Pinkui Ma, Zhigang Li, Xiangrui Meng. The improvement of stress correction in post-necking tension of cylindrical specimen. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2019;54(3): 209–222. <http://dx.doi.org/10.1177/0309324719852875>
- Монахов А.Д., Яковлев Н.О., Автаев В.В., Котова Е.А. Разрушающие методы определения остаточных напряжений (обзор). *Труды ВИАМ*. 2021;(9(103)): 95–104. Monakhov A.D., Yakovlev N.O., Avtaev V.V., Kotova E.A. Destructive methods for determining residual stresses (review). *Trudy VIAM*. 2021;(9(103)):95–104. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-9-95-104>
- Huang L., Korhonen R.K., Turunen M.J., Finnälä M.A.J.

- Experimental mechanical strain measurement of tissues. *Peer J*. 2019;7:e6545.
<https://doi.org/10.7717/2Fpeerj.6545>
16. Sutton M.A., Orteu J.-J., Schreier H.W. Image correlation for shape, motion and deformation measurements. Columbia, SC, USA: University of South Carolina, 2009. 322 p.
 17. Yang L., Smith L. Measure strain distribution using digital image correlation (DIC) for tensile tests. Final Report. Auto/Steel Partnership. 2010. 26 p.
 18. Junrui L., Guobiao Y., Thorsten S. A method of the direct measurement of the true stress—strain curve over a large strain range using multi-camera digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*. 2018;(107):194–201.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.03.029>
 19. Щетинина Н.Д., Рудченко А.С., Селиванов А.А. Применение методов математического моделирования при разработке режимов деформации алюминий-литиевых сплавов (обзор). *Труды ВИАМ*. 2019;(8(90)):20–34.
 20. Poole W.J., Embury J.D., Lloyd D.J. Work hardening in aluminium alloys. In: *Fundamentals of aluminium metallurgy*. Ed. Roger Lumley. Woodhead Publishing Limited, 2011. P. 307–344.
<https://doi.org/10.1533/9780857090256.2.307>
 21. Den Uijl N.J., Carless L.J. Advanced metal-forming technologies for automotive applications. In: *Advanced materials in Automotive Engineering*. Ed. Jason Rowe. Woodhead Publishing Limited, 2012. P. 28–56.
<https://doi.org/10.1533/9780857095466.28>
 22. Faridmehr I., Osman M.H., Adnan A.B., Nejad A.F., Hodjati R., Azimi M. Correlation between engineering stress-strain and true stress-strain curve. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2014;2(1):53–59.
<http://dx.doi.org/10.12691/ajcea-2-1-6>

Информация об авторах

Антон Дмитриевич Монахов — инженер лаборатории прочности и надежности материалов воздушного судна Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ) Национального исследовательского центра (НИЦ) «Курчатовский институт».

<https://orcid.org/0000-0002-8249-5814>

E-mail: ant.monakhov@gmail.com

Максим Михайлович Гуляев — начальник отдела АО «Конструкторское бюро приборостроения (КБП) им. академика А.Г. Шипунова».

<https://orcid.org/0000-0003-0058-4694>

E-mail: guliaevmay@mail.ru

Наталья Евгеньевна Гладышева — начальник сектора АО «КБП им. А.Г. Шипунова».

<https://orcid.org/0000-0001-9423-1683>

E-mail: naeglad@mail.ru

Ольга Юрьевна Коптельцева — ведущий инженер-исследователь АО «КБП им. А.Г. Шипунова».

<https://orcid.org/0000-0002-7736-0480>

E-mail: olya_moshkina@mail.ru

Виталий Васильевич Автаев — ведущий инженер лаборатории прочности и надежности материалов воздушного судна НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ.

<https://orcid.org/0000-0001-6825-0602>

E-mail: darkee@mail.ru

Information about the authors

Anton D. Monakhov — Engineer of the Laboratory of Strength and Reliability of Aircraft Materials, All-Russian Research Institute of Aviation Materials (VIAM) of the National Research Center (NRC) “Kurchatov Institute”.

<https://orcid.org/0000-0002-8249-5814>

E-mail: ant.monakhov@gmail.com

Maksim M. Gulyaev — Head of the Department of the Joint Stock Company (JSC) “Design Bureau of Instrument Engineering (KBP) named after Academician A.G. Shipunov”.

<https://orcid.org/0000-0003-0058-4694>

E-mail: guliaevmay@mail.ru

Natalya E. Gladysheva — Head of the Sector of the JSC “KBP named after Academician A.G. Shipunov”.

<https://orcid.org/0000-0001-9423-1683>

E-mail: naeglad@mail.ru

Olga Yu. Kopteltseva — Leading Research Engineer of the JSC “KBP named after Academician A.G. Shipunov”.

<https://orcid.org/0000-0002-7736-0480>

E-mail: olya_moshkina@mail.ru

Vitaliy V. Avtaev — Leading Engineer of the Laboratory of Strength and Reliability of Aircraft Materials, NRC “Kurchatov Institute” — VIAM.

<https://orcid.org/0000-0001-6825-0602>

E-mail: darkee@mail.ru

Николай Олегович Яковлев — к.т.н., начальник лаборатории прочности и надежности материалов воздушного судна НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ.
<https://orcid.org/0000-0002-3663-8239>
E-mail: nick_62@mail.ru

Ирина Владимировна Гулина — заместитель начальника лаборатории прочности и надежности материалов воздушного судна НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ.
<https://orcid.org/0000-0001-5934-2249>
E-mail: iragoolina@gmail.com

Nikolai O. Yakovlev — Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Strength and Reliability of Aircraft Materials, NRC “Kurchatov Institute” — VIAM.
<https://orcid.org/0000-0002-3663-8239>
E-mail: nick_62@mail.ru

Irina V. Gulina — Deputy Head of the Laboratory of Strength and Reliability of Aircraft Materials, NRC “Kurchatov Institute” — VIAM.
<https://orcid.org/0000-0001-5934-2249>
E-mail: iragoolina@gmail.com

Вклад авторов

А.Д. Монахов — проведение экспериментов, проведение расчетов, обработка результатов исследований, подготовка текста статьи, анализ результатов исследований, формулировка выводов статьи.

М.М. Гуляев — подготовка эксперимента, формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, корректировка текста статьи, корректировка выводов статьи, обеспечение ресурсами.

Н.Е. Гладышева — подготовка эксперимента, формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, корректировка текста статьи, корректировка выводов статьи, обеспечение ресурсами.

О.Ю. Коптельцева — подготовка эксперимента, формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, корректировка текста статьи, корректировка выводов статьи, обеспечение ресурсами.

В.В. Автаев — проведение расчетов, обработка результатов исследований, корректировка текста статьи, руководство проведением эксперимента, формулировка выводов статьи.

Н.О. Яковлев — научное руководство, формирование основной концепции, корректировка текста статьи, корректировка выводов статьи.

И.В. Гулина — проведение расчетов, корректировка текста статьи, корректировка выводов статьи, руководство проведением эксперимента.

Contribution of the authors

A.D. Monakhov — conducted experiments, conducted the calculations, processed the research results, wrote the manuscript, analyzed the research results, formulated the conclusions of the article.

M.M. Gulyaev — prepared the experiment, formulated the main concept, defined the goal and objectives of the study, revised the manuscript, revised the conclusions, provided resources.

N.E. Gladysheva — prepared the experiment, formulated the main concept, defined the goal and objectives of the study, revised the manuscript, revised the conclusions, provided resources.

O.Yu. Kopteltseva — prepared the experiment, formulated the main concept, defined the goal and objectives of the study, revised the manuscript, revised the conclusions, provided resources

V.V. Avtaev — conducted calculations, processed the research results, revised the manuscript, managed the experiment, formulated the conclusions.

N.O. Yakovlev — scientific advising, formulated the main concept, revised the manuscript, revised the conclusions.

I.V. Gulina — conducted the calculations revised the manuscript, revised the conclusions, provided resources, managed the experiment.

Статья поступила в редакцию 28.12.2022, доработана 20.04.2023, подписана в печать 24.04.2023

The article was submitted 28.12.2022, revised 20.04.2023, accepted for publication 24.04.2023