

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова

2025. Т.23, №1

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. По результатам экспертной оценки ВАК журнал отнесен к категории К1. Журнал индексируется в международных и российских базах данных: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI, ядро РИНЦ, ВИНТИ и др. Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

Издается с марта 2003 года

Председатель редакционной коллегии
В.М. Колокольцев (Россия)

Т.Н. Александрова (Россия), Ж.-Б. Вогт (Франция),
С.Е. Гавришев (Россия), О.Е. Горлова (Россия),
В.Е. Громов (Россия), Я. Грум (Словения),
И.Г. Гун (Россия), М. Дабала (Италия),
Х. Дыя (Польша), Р.О. Дюссан (Индия),
Р. Кавалла (Германия), В.Н. Калмыков (Россия),
Д.Р. Каплунов (Россия), А.Г. Корчунов (Россия),
О.С. Логунова (Россия), Д. Милованович (Сербия),
К. Мори (Япония), И. Мусирин (Малайзия),
А.Б. Найзабеков (Казахстан), Н.Н. Орехова (Россия),
М. Пьетшик (Польша), В.Ф. Рашинов (Россия),
Г.А. Роджерсон (Великобритания), В.М. Счастливцев (Россия),
О.Н. Тулупов (Россия), Ю. Фенг (Китай),
В.Р. Храмшин (Россия), Р. Цин (Великобритания)

РЕДАКЦИЯ

Главный редактор О.Н. Тулупов
Первый заместитель главного редактора
М.А. Полякова
Заместители главного редактора:
А.Г. Корчунов, О.С. Логунова,
Н.Н. Орехова, В.Р. Храмшин
Редактор Н.П. Боярова
Технический редактор Т.В. Леонтьева
Перевод на английский А.Р. Карагузина
Дизайн обложки: А.Д. Григорьев

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2025

Свидетельство о регистрации ПИ №ФС 77-59632 от 10.10.2014 г.

Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38).

16+, в соответствии с Федеральным законом №436-ФЗ от 29.12.2010.

Адрес редакции:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
пр. К. Маркса, 45/2, оф. 402
Тел.: (3519) 22-14-93.
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>
Email: vestnik@mgtu.ru; rio_mgtu@mail.ru

Адрес издателя:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/2,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», участок оперативной полиграфии
Выход в свет 28.03.2025. Заказ 91. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2025. Vol.23, no.1

The journal is included in the List of Russian Peer-Reviewed Scientific Journals, which are supposed to publish the major results of doctoral and PhD theses. Following an expert assessment of the Higher Attestation Commission, the journal is classified as category K1. The journal is indexed in international and Russian databases: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI, the core of RSCI, VINITI (the All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences), and others. Digital versions of the journal are available at the network resource of the Scientific Electronic Library on the Internet.

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

EDITORIAL BOARD MEMBERS

Head of the Editorial Board V.M. Kolokoltsev (Russia)

T.N. Aleksandrova (Russia), M. Dabala' (Italy),
R.O. Dusane (India), H. Dyja (Poland), Ye Feng (China),
S.E. Gavrishev (Russia), O.E. Gorlova (Russia),
V.E. Gromov (Russia), J. Grum (Slovenia), I.G. Gun (Russia),
V.N. Kalmykov (Russia), D.R. Kaplunov (Russia),
R. Kawalla (Germany), V.R. Khramshin (Russia),
A.G. Korchunov (Russia), O.S. Logunova (Russia),
D. Milovanovic (Serbia), K. Mori (Japan),
I. Musirin (Malaysia), A.B. Naizabekov (Kazakhstan),
N.N. Orekhova, M. Pietrzyk (Poland), R. Qin (UK),
V.F. Rashnikov (Russia), G.A. Rogerson (UK),
V.M. Schastlivtsev (Russia), O.N. Tulupov (Russia),
J.-B. Vogt (France)

EDITORIAL STAFF

Editor-in-Chief O.N. Tulupov

First Deputy Chief Editor M.A. Polyakova

Deputy Chief Editors:
A.G. Korchunov, O.S. Logunova,
V.R. Khramshin, N.N. Orekhova

Editor N.P. Boyarova

Technical Editor T.V. Leontyeva

Translated into English A.R. Karaguzhina

The cover is designed by A.D. Grigorev

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2025

Registration certificate PI # FS 77-59632 dated October 10, 2014 is issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media.

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University
(38, pr. Lenina, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, 455000)

16+ in accordance with Federal Law №436-FZ dated 29.12.2010

Editorial office:

402, 45/2 Karl Marks prospekt,
Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University
Phone: +7 (3519) 221 493.
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>
Email: vestnik@mgtu.ru; rio_mgtu@mail.ru

Publisher office:

45/2 Karl Marks prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Printing office:

38 Lenin prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Publication date: 28.03.2025. Order 91. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ	5
<i>Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Горлова О.Е., Орехова Н.Н.</i>	
Исследование влияния дальнедействующих поверхностных сил и линейного натяжения на краевые углы смачивания при флотации	5
<i>Петухов В.Н., Свечникова Н.Ю., Волощук Т.Г., Юдина С.В., Щелкунов С.А., Малышев О.А.</i>	
Влияние третичных ацетиленовых спиртов «ДМИПЭК» на флотацию золотосодержащих руд ..	17
<i>Хрунина Н.П.</i>	
Один из подходов к комплексной переработке техногенного сырья рудно-россыпного участка Приамурья	26
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....	36
<i>Звягина Е.Ю., Огарков Н.Н., Терентьев Д.В., Румянцев М.И.</i>	
Определение диапазона колебаний параметров микрогеометрии поверхности полосы при дрессировке ее в шероховатых валках дрессировочного стана	36
<i>Ворошилов Д.С.</i>	
Исследование свойств и структуры проволоки из сплава системы Al-Ce-La методом совмещенной прокатки-прессования с одним приводным валком ..	45
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ	54
<i>Шуберт А.В., Коновалов С.В., Панченко И.А.</i>	
Исследование термических свойств системы высокоэнтропийных сплавов на основе CoCrFeMnNi методом дифференциального термического анализа	54
<i>Савченко С.А., Ковалёва И.А., Астапенко И.В., Сычков А.Б.</i>	
Совершенствование технологии сфероидизирующего отжига бунтового проката из подшипниковой стали	62
<i>Мосягин И.А., Ольшанская Т.В.</i>	
Исследование влияния термической обработки на структурообразование и свойства мартенситно-старееющей стали, полученной аддитивным выращиванием	73
<i>Шарипзянова Г.Х.</i>	
Получение и применение гафнатов и титанатов редкоземельных металлов	85
НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ ..	92
<i>Полонянкин Д.А., Федоров А.А., Гомонюк Т.М.</i>	
Влияние статической нагрузки на структурно-фазовый состав нержавеющей стали 12X18H10T, подвергнутой ультразвуковому нанокристаллическому поверхностному модифицированию	92

CONTENTS

SUBSOIL USE	5
<i>Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E., Gorlova O.E., Orekhova N.N.</i>	
Investigation of the Influence of Long-Range Surface Forces and Linear Tension on Edge Wetting Angles During Flotation.....	5
<i>Petukhov V.N., Svechnikova N.Y., Voloshchuk T.G., Yudina S.V., Shchelkunov S.A., Malyshev O.A.</i>	
Influence of DMIPEK Tertiary Acetylene Alcohols on the Flotation of Gold-Bearing Ores.....	17
<i>Khrunina N.P.</i>	
One of the Approaches to Complex Processing of Man-Made Ore-Placer Raw Materials of the Amur Region.....	26
METAL FORMING	36
<i>Zvyagina E.Yu., Ogarkov N.N., Terentyev D.V., Rumyantsev M.I.</i>	
Determining the Fluctuation Range in the Microgeometry Parameters of the Strip Surface During Temper Rolling in Rough Rolls of the Temper Mill.....	36
<i>Voroshilov D.S.</i>	
Characterization Properties and Structure for Wires from Al-Ce-La System Alloy Via the Method of Combined Rolling-Extrusion with a Single-Driven Roll.....	45
MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS.....	54
<i>Shubert A.V., Konovalov S.V., Panchenko I.S.</i>	
Study of the Thermal Properties of High-Entropy Alloys System Based on CoCrFeMnNi by Differential Thermal Analysis	54
<i>Savchenko S.A., Kovaliova I.A., Astapenko I.V., Sychkov A.B.</i>	
Enhancing Spheroidizing Annealing Technology of Rolled Products in Coils from Bearing Steel.....	62
<i>Mosyagin I.A., Olshanskaya T.V.</i>	
Study of the Effect of Heat Treatment on the Structure Formation and Properties of Martensite-Ageing Steel Obtained by Additive Growth	73
<i>Sharipzyanova G.Kh.</i>	
Production and Application of Hafnates and Titanates of Rare Earth Metals	85
NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES..	92
<i>Polonyankin D.A., Fedorov A.A., Gomonyuk T.M.</i>	
Effect of Static Load on the Structural Phase Composition of AISI 321 Stainless Steel Subjected to Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification	92

**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ.
СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА 103**

Васин С.А., Маликов А.А., Никольский С.М.
Обоснование объема контрольных операций на основе
статистических методов управления качеством
продукции 103

Гореликов А.А., Плахотникова Е.В.
Гибридная модель управления процессами внедрения
системы бережливого производства на предприятиях
металлоконструкций 110

Мусабинова Л.А., Галимов Ф.М., Шабалина О.К.
Разработка методики мониторинга
и оценки качества услуг в области обеспечения
единства измерений 119

Кушнарев Л.И.
Системные проблемы машиностроения
по повышению надежности отечественной
техники 127

*Бобрышов А.П., Кузьменко В.П., Солёный С.В.,
Квас Е.С.*
Универсальная оперативная характеристика
качественной оценки электрических
контрольно-измерительных приборов 138

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ 149**

*Полякова М.А., Извеков Ю.А., Самодурова М.Н.,
Трофимова С.Н., Шеметова В.В., Ярушина Д.В.*
Прогнозирование вероятности получения
функциональных свойств порошковых покрытий .. 149

*Зарочентцев В.М., Рутковский А.Л., Болотаева И.И.,
Ковалёва М.А.*
Блочно-модульное моделирование биполярного
электроосаждения губчатых осадков свинца
из щелочных растворов 158

*Пивоварова К.Г., Песина С.А., Белов А.Я.,
Пивоваров Ф.В., Могильных А.Е.*
Моделирование квазистатического нагружения
многослойной самозаклинивающейся структуры
на основе усеченных кубов 170

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
И ОБОРУДОВАНИЕ 178**

*Телешев М.И., Саушин И.И., Гольцман А.Е.,
Хуснутдинова Э.М., Хамидуллина Г.Р.,
Фахреева Д.Р.*
Адаптивность и надежность работы запальных
устройств на коксовом газе для металлургических
производств 178

**ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК
ПРОДУКЦИИ 190**

*Тимирьянова В.М., Красносельская Д.Х.,
Прудников В.Б., Гирфутдинова А.Ф.*
Пространственная автокорреляция цен:
чувствительность к выбору весовой матрицы
и уровню агрегирования данных 190

**PRODUCT QUALITY MANAGEMENT.
STANDARDIZATION. INDUSTRIAL
MANAGEMENT 103**

Vasin S.A., Malikov A.A., Nikolsky S.M.
Justification of the Volume of Control Operations
Based on Statistical Methods of Product Quality
Management 103

Gorelikov A.A., Plakhotnikova E.V.
Hybrid Management Model for System Implementation
Processes of Lean Manufacturing at Metal Structures
Enterprises 110

Musabirova L.A., Galimov F.M., Shabalina O.K.
Development of the Methodology for Monitoring and
Assessing the Quality of Services in the Field of Ensuring
Uniformity of Measurements 119

Kushnarev L.I.
Systemic Problems of Mechanical Engineering
to Improve the Reliability
of Domestic Equipmen 127

*Bobryshov A.P., Kuzmenko V.P., Solyony S.V.,
Kvas E.S.*
Universal Operational Characteristics of Quality
Assessment of Electrical Control and Measuring
Instruments 138

**MODELLING OF METALLURGICAL
PROCESSES 149**

*Polyakova M.A., Izvekov Yu.A., Samodurova M.N.,
Trofimova S.N., Shemetova V.V., Yarushina D.V.*
Predicting the Probability of Obtaining the Functional
Properties of Powder Coatings 149

*Zarochentsev V.M., Rutkovsky A.L., Bolotaeva I.I.,
Kovaleva M.A.*
The Block-Modular Modeling of Bipolar
Electrodeposition of Spongy Lead Precipitation from
Alkaline Solutions 158

*Pivovarova K.G., Pesina S.A., Belov A.Ya.,
Pivovarov F.V., Mogilnykh A.E.*
Simulation of Quasi-Static Loading of a Multilayer
Self- Interlocking Structure Based on Truncated
Cubes 170

**NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES
AND EQUIPMENT 178**

*Teleshev M.I., Saushin I.I., Goltsman A.E.,
Khusnutdinova E.M., Khamidullina G.R.,
Fakhreeva D.R.*
Adaptability and Reliability of Ignition
Device Operation on Coke-Oven Gas for Metallurgical
Production 178

**ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT
MARKET 190**

*Timiryanova V.M., Krasnoselskaya D.Kh.,
Prudnikov V.B., Girkutdinova A.F.*
Spatial Prices' Autocorrelation: Sensitivity
to the Weighting Matrix Choice and Level of Data
Aggregation 190

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАЛЬНОДЕЙСТВУЮЩИХ
ПОВЕРХНОСТНЫХ СИЛ И ЛИНЕЙНОГО НАТЯЖЕНИЯ
НА КРАЕВЫЕ УГЛЫ СМАЧИВАНИЯ ПРИ ФЛОТАЦИИЕвдокимов С.И.¹, Герасименко Т.Е.¹, Горлова О.Е.^{2,3}, Орехова Н.Н.³¹Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия²Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия³Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, Москва, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Золото в перерабатываемых в настоящее время рудах связано с минералами, крупность которых является упорной для эффективного извлечения методом флотации – мелкодисперсными фракциями. Только при наличии технологий их эффективного извлечения минеральное сырье такого качества приобретает у недропользователей и инвесторов лицензионную и инвестиционную привлекательность. **Цель работы.** Научное обоснование и разработка технологии обогащения золотосодержащих руд на основе применения нового способа построения схемы и режима флотации руд, обеспечивающих высокое извлечение мелкодисперсных фракций золота. **Используемые методы.** Разработаны метод и установка для измерения краевого угла смачивания на искусственно составленной смеси минералов при различной доле в ней гидрофобизированного самородного золота и температуре. Разработан способ построения схемы флотации, в которой для увеличения содержания золота в операции основной флотации используют противоточное движение исходного питания и черного концентрата. Для дополнения поверхностными силами структурного происхождения сил, участвующих в селективном разделении мелкодисперсных минералов при выделении черного концентрата, в качестве газовой фазы используют смесь воздуха с горячим водяным паром. **Новизна.** Обосновано, что одной из причин эффективности разработанного способа построения схемы флотации является рост краевого угла смачивания, а режима аэрации пульпы паровоздушной смесью – изменение знака параметра структурных сил и линейного натяжения с ростом температуры воды в граничных слоях пузырьков. **Результат.** Из результатов натурных экспериментов по флотации золотосодержащих руд следует, что использование разработанной технологии позволяет получить прирост извлечения золота от 80,71 до 88,70% при повышении качества концентрата от 65,09 до 100,3 г/т Au за счет уменьшения выхода концентрата на 30,1 отн.%. Из результатов седиментометрического анализа следует, что при использовании разработанной технологии повышение извлечения золота является следствием снижения потерь с хвостами мелких и тонких фракций металла. **Практическая значимость.** Разработанный метод измерения краевых углов на смеси минералов может найти применение в научно-исследовательской практике. Исходя из установленных физических закономерностей, разработанный способ построения схемы флотации и режим аэрации пульпы эффективны (не имеют каких-либо ограничений) при обогащении практически любого типа руд с высоким содержанием мелких и тонких фракций ценного компонента.

Ключевые слова: поверхностные силы, краевой угол, линейное натяжение, параметр структурных сил, золотосодержащая руда, флотация, показатели

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках соглашения № 23-27-00093 «Теоретическое и экспериментальное обоснование механизма поверхностных сил в процессах коагуляции и флотации в условиях теплового воздействия на смачивающие пленки для создания и промышленного освоения технологических процессов эффективного извлечения микродисперсий золота из руд и россыпей».

© Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Горлова О.Е., Орехова Н.Н., 2025

Для цитирования

Исследование влияния далекодействующих поверхностных сил и линейного натяжения на краевые углы смачивания при флотации / Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Горлова О.Е., Орехова Н.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 5-16. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-5-16>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF LONG-RANGE SURFACE FORCES AND LINEAR TENSION ON EDGE WETTING ANGLES DURING FLOTATION

Evdokimov S.I.¹, Gerasimenko T.E.¹, Gorlova O.E.^{2,3}, Orekhova N.N.³

¹North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

²Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

³Institute of Problems of Integrated Subsoil Development named after Academician N.V. Melnikov of the RAS, Moscow, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Gold in currently processed ores is associated with minerals, the size of which is refractory for effective extraction by flotation - fine fractions. Only in the presence of technologies for their effective extraction mineral raw materials of such quality acquire license and investment attractiveness for subsoil users and investors. **Objectives.** Scientific justification and development of technology for enrichment of gold-bearing ores on the basis of new method application of the scheme construction and mode of ores flotation, providing high extraction of fine fractions of gold. **Methods Applied.** The method and unit for measuring the wetting edge angle on the artificially composed mixture of minerals at different proportion of hydrophobized nugget gold in it and temperature are developed. A method of flotation scheme construction was developed, in which countercurrent movement of initial feed and rough concentrate is used to increase the gold content in the main flotation operation. To complement the surface forces of structural origin forces involved in the selective separation of fine minerals in the separation of the rough concentrate, a mixture of air and hot water vapor is used as the gas phase. **Originality.** It is proved that one of the reasons for the efficiency of the developed method of flotation scheme construction is the growth of the wetting edge angle, and the mode of pulp aeration by steam-air mixture is the change of the parameter sign of structural forces and linear tension with the growth of water temperature in the boundary layers of bubbles. **Result.** From the results of field experiments on flotation of gold-bearing ores it follows that the use of the developed technology allows to obtain an increase in gold extraction from 80.71 to 88.70 % with an increase in concentrate quality from 65.09 to 100.3 g/t Au due to a decrease in concentrate yield by 30.1 % rel. From the results of sedimentometric analysis it follows that when using the developed technology the increase in gold extraction is a consequence of reduction of losses with tailings of small and fine fractions of metal. **Practical Relevance.** The developed method of measuring the boundary angles on the mixture of minerals can be used in research practice. Based on the established physical regularities, the developed method of flotation scheme construction and pulp aeration mode are effective (do not have any limitations) in the enrichment of almost any type of ores with a high content of small and fine fractions of valuable component.

Keywords: surface forces, edge angle, linear tension, structural forces parameter, gold ore, flotation, indicators

The study was supported by the Russian Science Foundation under agreements No.23-27-00093 «Theoretical and experimental justification of the mechanism of surface forces in the processes of coagulation and flotation under conditions of thermal action on wetting films for the creation and industrial development of technological processes for the effective extraction of gold microdispersions from ores and placers»

For citation

Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E., Gorlova O.E., Orekhova N.N. Investigation of the Influence of Long-range Surface Forces and Linear Tension on Edge Wetting Angles During Flotation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 5-16. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-5-16>

Введение

К настоящему времени достигнуты значительные успехи в понимании роли граничных слоев жидкостей с измененной под влиянием поверхностных сил структурой в образовании краевых углов смачивания, устойчивости симметричных и смачивающих пленок [1–3]. Граничащие с обеих сторон с одинаковыми фазами симметричные пленки изучены лучше смачивающих. Специфика смачивающих пленок, обусловленная тем, что они заключены между разными фазами – газовой и твердой, определяет несимметрич-

ность полей действующих в них поверхностных сил [4–6], абсолютную величину краевого угла смачивания. Исследование этой специфики составляет фундаментальную основу для решения прикладных задач, связанных с управлением свойствами водных дисперсий минералов при их селективной флотации путем изменения краевых углов смачивания, созданием процессов водоочистки [7–10].

В теории ДЛФО [11–13] основой для количественного анализа состояния и устойчивости пленок жидкостей, дисперсных и коллоидных систем являются силы Лондона-Ван-дер-Ваальса – молекулярная

компонента расклинивающего давления и ионно-электростатические взаимодействия – электростатическая компонента расклинивающего давления.

При наличии в дисперсных системах поверхностных сил, вызванных отличием свойств и параметров структуры воды на границе раздела фаз (твердое-жидкость и газ-жидкость) от их объемных значений (гидрофобно-гидрофильными взаимодействиями), а также другими механизмами (объединенными в литературе под общим названием «не-ДЛФО»-силы [14-16]), используют расширенную теорию ДЛФО (XDLO [17, 18]) – структурную компоненту расклинивающего давления [19].

Теоретические положения

Объектом исследования в работе является краевой угол смачивания, образуемый при использовании нового способа построения схемы флотации и режима аэрации пульпы [7–9]. Зависимость свойств объекта от действующих поверхностных сил и линейного натяжения составляет предмет исследования.

В теории смачивания Фрумкина-Дерягина краевой угол Юнга θ_0 выражен через параметры изотермы расклинивающего давления смачивающих пленок $\Pi(h)$ при равновесной толщине смачивающей пленки h_0 , соответствующей α -ветви изотермы при давлении $p = p_0$ и $\Pi = 0$:

$$\sigma_{lv} \cos \theta_0 = \sigma_{lv} + p_0 h_0 + \int_{h_0}^{\infty} \Pi(h) dh, \quad (1)$$

где σ_{lv} – поверхностное натяжение на границе раздела фаз газ-жидкость.

Развитая Лифшицем макроскопическая теория дисперсионных сил для пленки толщиной h дает следующее выражение для молекулярной компоненты расклинивающего давления [13]:

$$\Pi_m(h) = -\frac{A_{123}}{6\pi h^3}, \quad (2)$$

где A_{123} – константа Гамакера.

Изотерма расклинивающего давления при расчете сил электростатического отталкивания имеет следующий вид [20]:

$$\Pi_e(h) = (2\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot k^2 \cdot \psi^2) \exp(k \cdot h), \quad (3)$$

где ε – диэлектрическая постоянная дисперсионной среды; ε_0 – электрическая постоянная; k – обратный дебаевский радиус.

Зависимость гидрофобных сил притяжения от толщины прослойки описывается уравнением [21, 22]

$$\Pi_s(h) = -K \exp(-h/\lambda), \quad (4)$$

где K и λ – параметры структурных сил, характеризующие соответственно их величину и дальность действия.

Прилипание частицы к пузырьку возможно при критической толщине смачивающей пленки h_{cr} [23], заканчивается заходом изотермы расклинивающего давления $\Pi(h)$ в область его отрицательных значений $\Pi < 0$, что связано с преобладанием сил гидрофобного притяжения ($\Pi < 0$) над силами структурного гидрофильного отталкивания ($\Pi > 0$) и образованием краевого угла θ [22]. Однако и в этом случае поверхность минерала состоит из участков с различным режимом смачивания – Венцеля и Касси-Бакстера [24], каждый из которых отличается своим краевым углом θ . Если доля участка с краевым углом θ_i в общей поверхности минерала составляет f_i часть, то краевой угол θ над химически гетерогенной поверхностью минерала может быть определен (по Касси) [25, 26] как

$$\cos \theta = \sum_i f_i \cdot \cos \theta_i. \quad (5)$$

Для системы из N минералов соотношение (5) принимает вид

$$\cos \theta = \sum_l \sum_i f_{si} \cdot \cos \theta_i \quad (6)$$

и моделирует закрепление на пузырьке минерального агрегата (флокулы) с поверхностью частиц S , краевые углы каждой из которых определяются соотношением (5).

Исходя из соотношения (6), расход жидкости через слой осадка складывается из потоков над участками поверхности с $\theta \rightarrow 0^\circ$ (выполняется условие прилипания при скорости потока $u = 0$) и над участками поверхности с $\theta \rightarrow 180^\circ$ (выполняется условие скольжения Навье $u = b \frac{\partial u}{\partial n}$). Здесь b – длина скольжения

при касательном напряжении $\partial u / \partial n$ [27].

В работе операцию основной флотации выполняют на трех параллельных потоках (струях) пульпы, смешивая черновой концентрат 1-й струи с исходным питанием 2-й, черновой концентрат которой направляют в 3-ю струю с выделением готового чернового концентрата. В соответствии с (6), при объединении исходного питания с черновым концентратом краевой угол θ увеличивается за счет роста количества гидрофобных минералов в смеси, что является причиной экспоненциального роста сил прилипания [21].

Изменение θ возможно за счет нагрева смачивающей пленки на толщину h_{cr} [28], внутри которой локализовано действие структурных сил, отличающихся высокой температурной чувствительностью. Другим механизмом роста θ может быть появление объемных нанопузырьков в результате смешения разнотемпературных потоков (по Sherma A. [29]).

При флотации смесью воздуха с горячим ($T \geq 104^\circ\text{C}$) паром в холодной ($T = 15\text{--}20^\circ\text{C}$) пульпе температура воды в граничном слое пузырька за счет теплоты конденсации в течение $\sim 10^{-3}$ с достигает температуры насыщенного пара (оставаясь на $2\text{--}5^\circ\text{C}$ ниже). Режим паровоздушной флотации используют в потоке пульпы, выдающем готовый черновой концентрат, затрачивая 15-20% времени флотации.

В соответствии с уравнением Уошборна, записанного для горизонтально расположенного сквозного капилляра длиной l с радиусом r в виде

$$u = \frac{r^2}{8l\eta} \left[\frac{2\sigma_{lv}}{r} \cos\theta - \Delta p \right], \quad (7)$$

искомое значение θ рассчитывают по углу наклона линейной зависимости $u(\Delta p)$, полученной по скорости потока жидкости u (с вязкостью η), измеренной при различных значениях избыточного давления $\Delta p = \text{const}$.

Цель работы – научное обоснование причин высокой эффективности извлечения мелкодисперсного золота при использовании разработанной технологии.

Объект исследования и оборудование

Повышение температуры значимо влияет на величину краевого угла смачивания [30–32]. В работе для исследования температурной зависимости параметра структурных сил по величине краевого угла для его измерения разработана установка (рис. 1).

При определении θ фактически измеряется скорость фильтрации жидкости через пористую перегородку (мембрану) в виде спрессованного исследуемого материала. Конструкция установки позволяет проводить измерения при различной температуре.

В установке заполненная исследуемым материалом кассета 1 через уплотнения в опорах 3 помещена в термостатированный канал 2. Для поддержания температуры на заданном уровне установка оснащена дифференциальным манометром 4, трубкой Пито 6 и термопарами 5, 7-16. Скорость течения воды определяют по ее массовому расходу (г/с). Система измерения массы фильтрата 17, 18 включает контейнер жидкости 18, лабораторные электронные весы 17 модификации HR-202i с интерфейсом RS-232 ("A&D Co.LTD", Япония) для подключения к ПК (23, 24). Весы обеспечивают наибольший/наименьший пределы взвешивания 220/0,001 г при цене поверочного деления 1 мг в диапазоне рабочих температур от $+5$ до $+40^\circ\text{C}$. Термоэлектрический модуль включает пусковой ключ 19, реостат 20, вольтметр 21 и милливольтметр 22. Подаваемый на стенку канала 2 через реостат 20 электрический ток нагревает ее, что фиксируется вольтметром 21; ЭДС системы хромель-копелевых термопар 7-16 преобразуется в температуру, значение которой определяют по показаниям милливольтметра 22. Тепловой поток (количество теплоты) определяют по закону Джоуля-Ленца передается от стенки канала 2 в его рабочую зону (с учетом потерь в окружающую среду).

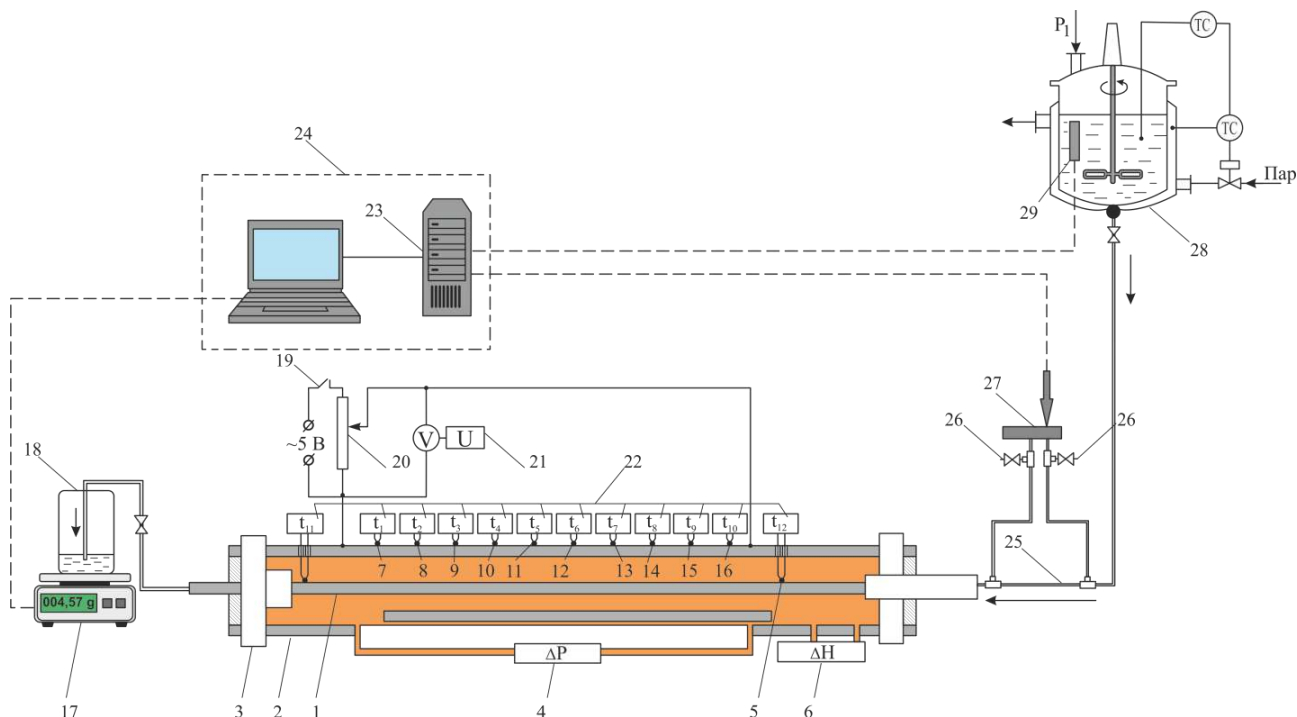


Рис. 1. Схема измерительной установки
Fig. 1. Scheme of measuring unit

Связь сигнала с датчика дифференциального давления HDP-701 (с выходным токовым сигналом от 4 до 20 мА) и погруженного в термостат 28 высокоомногобу-синкового терморезистора 29 с ПК обеспечивает через USB-интерфейс встроенный в шасси cDAQ-9172 универсальный модуль аналогового ввода NI-9219 С-серии (24-битный). Модуль в сравнении с АЦП Е14-440 обеспечивает повышенную точность измерений. Температура в термостате поддерживается паром.

В экспериментах использовали россыпное золото. Золото мелкое: в классе крупности $(-4,0+1,0)$ мм сосредоточено 9% металла, в классе $(-1,0+0,25)$ мм – 36% и в классе $(-0,5+0,1)$ мм – 55% массы золота. В морфологическом отношении 31,8% металла – это изометричные (уплощенные, комковидные) золотины, 59% золотины – чешуйчатого морфотипа и 9,2% – прочего морфологического типа (в основном дендриты). Характерно, что если в исходных песках доля пластинчатого золота составляет около 20%, то в эфелях после промывки песков мелкая фракция $(-0,1)$ мм на 80-90% представлена пластинчатым, чешуйчатым и листовидным золотом. При шагреновой и ячеистой поверхности окатанность золотины в целом низкая, в том числе присутствуют золотины рудного облика.

По данным пробирного (3 определения) и атомно-абсорбционного анализа (4 определения) проба золота изменяется в широких пределах – от 834 до 993‰ (в среднем составляет 937‰). Установлено, что в состав золотины в виде микропримесей входят: медь (от 0,14 до 2,70%), селен (от 0,14 до 0,37%) и мышьяк (от 0,15 до 0,20%); в одиночном анализе выявлены палладий (0,25%), ртуть (до 4,03%), калий (0,73%) и хлор (0,91%).

При измерении краевых углов золото смешивали со стекловым кварцевым песком, содержащим до 99,8% массовой доли оксида кремния SiO_2 (песок марки ООВС-010-В); массовая доля оксида железа Fe_2O_3 была в пределах 0,010-0,03%, а оксида алюминия Al_2O_3 – в пределах 0,1–2,0%. Песок содержал более 5% частиц крупностью более 0,8 мм и не более 15% частиц крупностью менее 0,1 мм.

Результаты и их обсуждение

Если расклинивающее давление в смачивающей пленке представить в виде алгебраической суммы уравнений (1)-(3), то параметр K можно определить из равенства

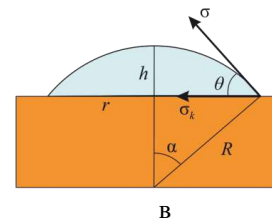
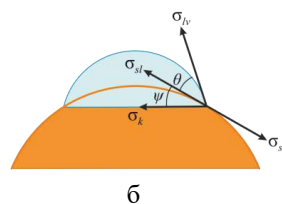
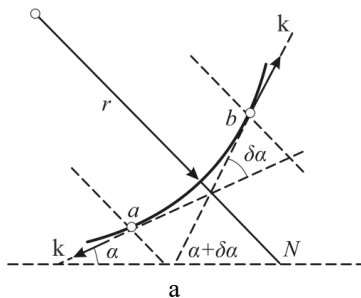


Рис. 2. К механике системы с линией трехфазного контакта

Fig. 2. Toward the mechanics of a system with a three-phase contact line

$$\cos \theta_0 = 1 + (1/\sigma_{lv}) \times$$

$$\times \left[\frac{A_0}{12 \pi h_0^2} - \frac{\varepsilon_0 (\psi_1 - \psi_2)^2}{8 \pi h_0} + K \lambda \exp(-h_0/\lambda) \right]. \quad (8)$$

По методике, приведенной в [33], величина параметра K может быть найдена в виде разности между экспериментальными значениями краевых углов и рассчитанными по теории ДЛФО, учитывающей только Π_m - и Π_e -составляющую.

Далее рассмотрим систему с линией трехфазного контакта с радиусом r (рис. 2) [34], к которой проведем нормаль N и выберем две точки – a и b , расположенные симметрично по обе ее стороны и по касательным к которым действует натяжение k . Если искривление поверхности раздела фаз газ-жидкость приводит к появлению капиллярного давления p_0 , то следствием искривления линии трехфазного контакта является возникновение двумерного натяжения (или давления) σ_k .

С учетом обозначения величин, принятых на рис. 2, кривизна линии R_L в точке, к которой стягивается дуга $ab \rightarrow 0$, равна $\lim (\delta \alpha / ab) = 1/r = L_r$. Тогда выражение для σ_k получим в виде

$$\sigma_k = \lim_{ab \rightarrow 0} \frac{2k \sin \frac{\delta \alpha}{2}}{ab} = k \lim_{ab} \frac{\delta \alpha}{ab} = k L_r = \frac{k}{r}. \quad (9)$$

Следуя уравнению Юнга (и Неймана)

$$\sigma_{lv} \cos \theta_0 = \sigma_{sv} - \sigma_{sl} \quad (10)$$

и с учетом (6), при искривлении линии трехфазного контакта к механическому балансу межфазных натяжений σ по периметру капли, смачивающей под углом θ_0 твердую поверхность, следует добавить натяжение σ_k :

$$\sigma_{sv} - \sigma_{sl} - \sigma_{lv} \cos \theta_0 - \sigma_k \cos \psi = 0, \quad (11)$$

или в случае $\psi = 0$

$$\sigma_{sv} - \sigma_{sl} - \sigma_{lv} \cos \theta_0 - \frac{k}{r} = 0. \quad (12)$$

Сила линейного натяжения k стремится сократить (при $k > 0$) или увеличить (при $k < 0$) длину линии трехфазного контакта, вдоль которой она действует. В то же время величина k характеризует избыток большого термодинамического потенциала (свободной энергии) в системе с линией трехфазного контакта. Таким образом, закреплению частицы на пузырьке препятствуют силовой и энергетический барьеры, являющиеся следствием линейного натяжения k , появляющегося при искривлении линии трехфазного контакта. Нижний предел размера частицы R_{cr} при котором закрепление частицы на пузырьке заканчивается образованием периметра смачивания, определяется из выражения [32]

$$k = \sqrt{\frac{2}{3} \rho g \sigma_{lv}} (1 - \theta_0) R_{cr}^2, \quad (13)$$

где ρ – разность плотности твердого и жидкости.

На **рис. 3, а** приведены результаты измерений краевого угла смачивания при различной доле самородного золота в смеси со стекловым кварцем. Поверхность золота гидрофобизировали раствором (концентрацией 25 мг/л) бутиловым ксантогенатом калия.

Из результатов измерений следует, что его абсолютная величина увеличивается с ростом доли гидрофобного золота в смеси (**рис. 3, а**). Увеличение краевого угла связано с изменением химической гетерогенности поверхности: уменьшением доли площади поверхности с гомогенным режимом смачивания Венцеля и ростом площади участков с гетерогенным режимом смачивания Касси-Бакстера. Другим механизмом может быть интенсификация процесса заполнения паром полостей (по Ющенко В.С. [35]), образованных сдвиговым потоком жидкости [36], в результате расслоения тонкого пристенного газожидкостного слоя (по Виноградовой О.И. [27]) или изменение длины свободного пробега фононов и ориента-

ции диполей молекул воды (по Бойнович Л.Б. [35]). Рост дальнедействующих сил притяжения связан (по J. Eriksson [35]) с увеличением числа водородных связей на одну молекулу воды вблизи гидрофобной поверхности по сравнению с таковым в объемной фазе – механизмом упорядочения молекул воды, основанным на введении феноменологического параметра порядка (по S. Macelia, N. Radic [35]). Эти механизмы при увеличении доли гидрофобного золота в смеси могут быть причиной роста сил структурного (гидрофобного) притяжения при одновременной убыли сил структурного (гидрофильного) отталкивания (**рис. 3, б**). Эндотермический характер гидрофобного притяжения является причиной роста краевого угла и изменения знака и величины параметра K при повышении температуры (**рис. 3, в**).

Из теории смачивания Фрумкина-Дерягина и уравнения (4) следует, что краевой угол образуется, когда площадь захода изотермы S_2 в область $\Pi < 0$ становится больше ее площади S_1 в области $\Pi > 0$ (**рис. 4, а, б**): осуществляется переход от гетерофильного смачивания (**рис. 4, кривые 1, 3**) к гетерофобному (**рис. 4, кривые 2, 4**). Переход $S_1 \rightarrow S_2$ является следствием роста температуры $T_2 > T_1$ (**рис. 4, б**).

Следовательно, одной из причин эффективности схемы флотации, в соответствии с которой исходное питание смешивают с черновым концентратом, является увеличение краевого угла.

Инверсия знака (см. **рис. 3, б, в**) параметра структурных сил K (знака фоновой составляющей расклинивающего давления по Бойнович Л.Б.) позволяет предположить, что силы гидрофильного отталкивания и гидрофобного притяжения имеют одну физическую природу и связаны с изменениями структуры и свойств воды вблизи границы раздела фаз. Причем только в области $\theta > 60^\circ$ силы структурного гидрофильного отталкивания (отрицательные значения K) сменяются силами структурного гидрофобного притяжения и значения K становятся положительными.

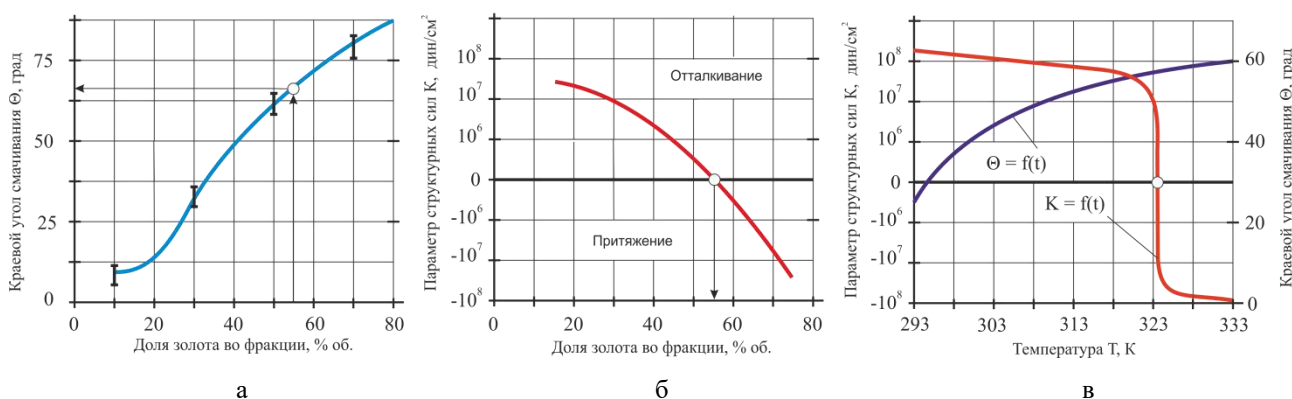


Рис. 3. Результаты измерения краевого угла (а) и расчета параметра структурных сил при различной доле золота в смеси (б) и температуре (в)

Fig. 3. Results of edge angle measurement (a) and structural force parameter calculation at different gold fraction in the mixture (б) and temperature (в)

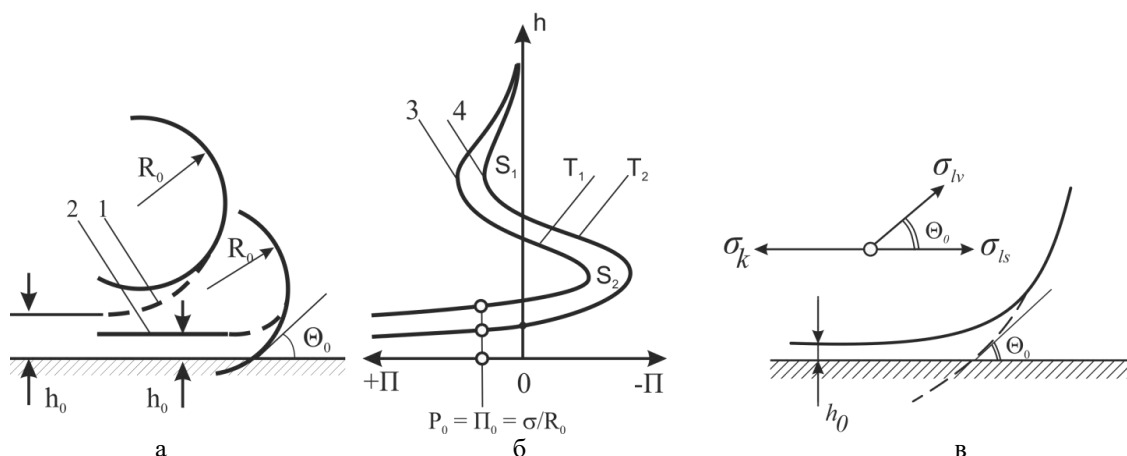


Рис. 4. Схемы равновесных состояний смачивающих пленок с объемной жидкостью
Fig. 4. Schemes of equilibrium states of wetting films with bulk liquid

Снижение равновесной толщины смачивающей пленки h_0 на изотерме расклинивающего давления $\Pi(h)$ с ростом температуры может быть при флотации действенным технологическим приемом изменения знака параметра K .

Если в качестве модели тонкой пленки жидкости принять разделяющую поверхность Гиббса, то можно записать

$$k = 2 r_0 \sigma (\cos \theta_0 - \cos \theta_\infty), \quad (14)$$

где θ_0, θ_∞ – краевые углы для круглой смачивающей пленки радиусом r_0 и $r_0 \rightarrow \infty$ соответственно.

Увеличение краевого угла с ростом температуры (см. рис. 3, в) является причиной изменения направления действия силы линейного натяжения – знак линейного натяжения изменяется с положительного ($k \sim +10^{-9}$ Н) на отрицательный ($k \sim -10^{-9}$ Н). Физически это означает увеличение длины линии периметра контакта (понижение пиннинга [33]) в результате ослабления ее стягивания. Расширение линии трехфазного контакта способствует эффективности прилипания (рис. 4, в).

Натурные эксперименты по флотации проведены на пробе золотосодержащих руд месторождения Наталка (рис. 5). По базовой технологии извлечение золота из руд осуществляли по гравитационно-флотационной схеме. Эксперимент выполнен по схеме, моделирующей замкнутый цикл обогащения. В «золотую головку» (817,88 г/т Au) методом гравитации извлечено 65,43% Au. Из хвостов гравитации золото доизвлекали методом флотации по схеме операции основной флотации плюс две операции контрольной флотации с тремя перечистками чернового концентрата. Для подавления органического углерода использовали крахмал из расчета 500 г/т, что позволяет понизить содержание углерода в концентрате от 6,1 до 1,4%, а извлечение – от 47,0 до 1,4%. Золотосодержащие сульфиды активировали сульфатом меди

при загрузке карбоната натрия до pH 8,5–8,7. С использованием бутилового ксантогената и пенообразователя Т-92 во флотоконцентрат извлечено еще 15,28% Au.

На рис. 6 приведены результаты флотации руд (цикл основной флотации) с использованием чернового концентрата в качестве минералов-носителей для извлечения микродисперсий золота (по струйной схеме флотации).

На рис. 6 приведены результаты выделения готового чернового концентрата по схеме в «три приема» и использованием режима агитации пульпы паровоздушной смесью в третьей струе флотации. Дополнение схемы тремя перечистками чернового концентрата и двумя контрольными операциями флотации позволяет получить концентрат, содержащий 39,0 г/т Au при извлечении 31,6% Au (с учетом концентрата гравитации – 100,3 г/т Au при извлечении 88,7% Au и выходе 1,3%) и отвальные хвосты с содержанием 0,168 г/т Au при потерях 11,3% Au. Снижение выхода концентрата на 30,1 отн. % (от 1,86% по схеме на рис. 5 до 1,3% по струйной схеме) можно объяснить увеличением краевого угла с ростом концентрации извлекаемого минерала. Селективное обогащение питания, которое изменяет в благоприятном направлении отношение полезного и загрязняющего минерала, является конкурентным преимуществом в борьбе за место на поверхности пузырька: золотосодержащий пирит выдавливает из нее минералы породы, и избирательность минерализации увеличивается. При паровоздушной флотации наблюдается синергетичность эффектов от роста краевого угла и «горячей» поверхности пузырька.

Из сравнения распределения золота по классам крупности в концентратах следует, что одним из факторов, способствующих приросту извлечения золота, является увеличение извлечения мелких фракций (рис. 7).

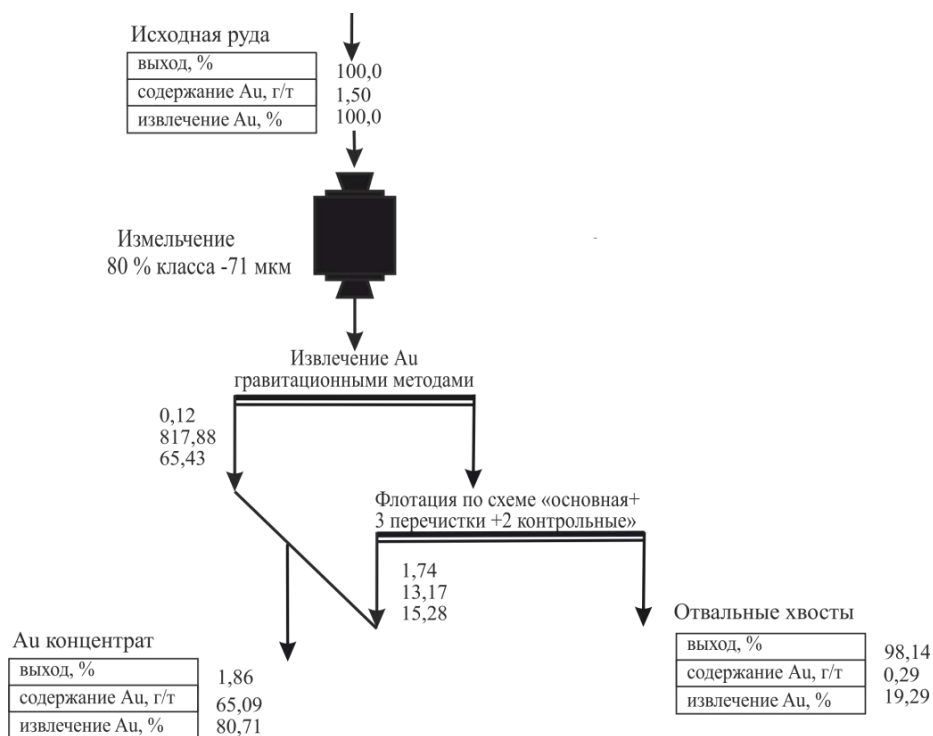


Рис. 5. Принципиальная блок-схема флотации руд месторождения Наталка по базовой технологии
Fig. 5. Principal block diagram of flotation of ores of Natalka deposit using the basic technology

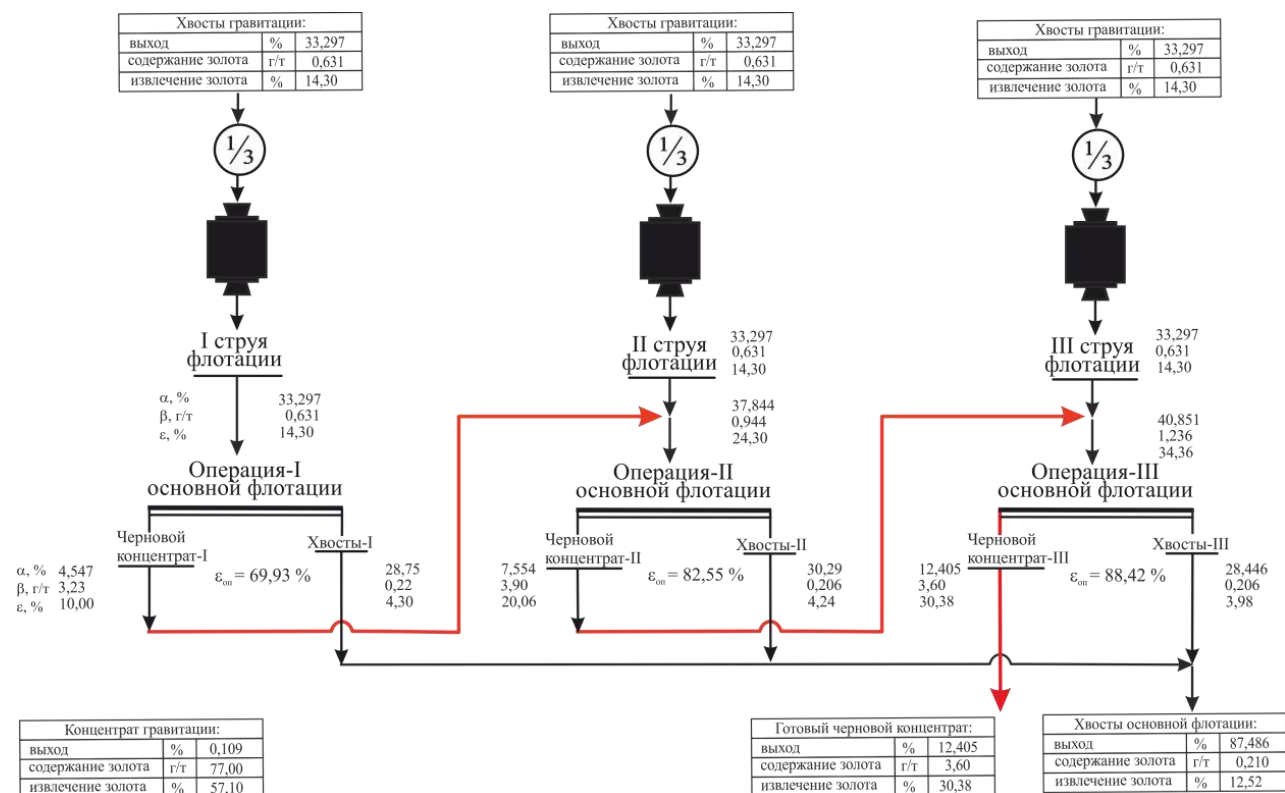


Рис. 6. Принципиальная блок-схема флотации руд месторождения Наталка с выделением черного концентрата по струйной схеме в «три приема»
Fig. 6. Principal block diagram of flotation of ores of Natalka deposit with separation of rough concentrate by jet scheme in “three steps”

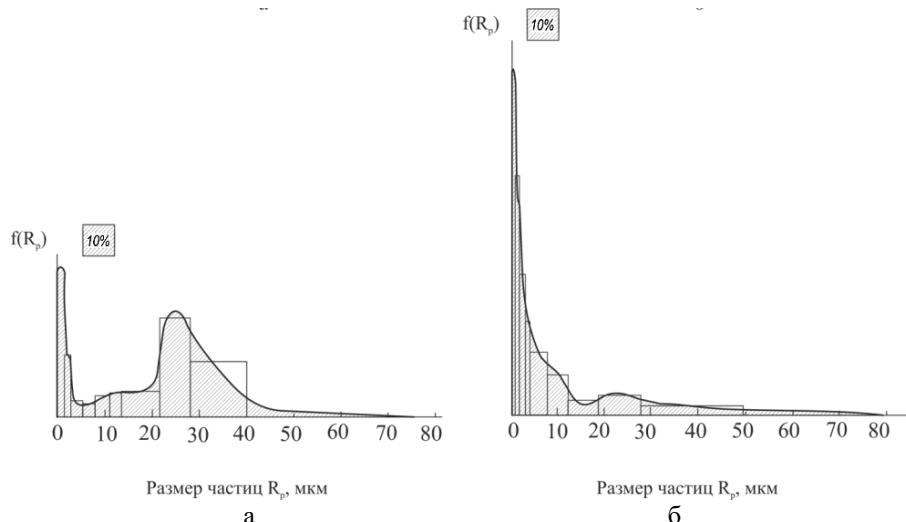


Рис. 7. Гистограммы и дифференциальные функции распределения частиц по размерам $f(R_p)$ для концентратов, полученных из золотосодержащих руд месторождения Наталка с применением базовой (а) и разработанной (б) технологий

Fig. 7. Histograms and differential functions of particle size distribution $f(R_p)$ for concentrates obtained from gold-bearing ores of Natalka deposit using basic (a) and developed (б) technologies

Закключение

Разработаны схема и режим флотации, в соответствии с которыми черновой концентрат выделяют из трех параллельных потоков (струй) пульпы, дважды смешивая оборотный черновой концентрат с исходным питанием. В третьей струе флотации для аэрации пульпы (в течение 15–20% от времени в операции флотации) используют смесь воздуха с горячим водяным паром.

Показано, что одной из причин эффективности разработанной схемы флотации является увеличение краевого угла с ростом доли гидрофобного золота в материале. С ростом краевого угла увеличивается заход изотермы расклинивающего давления в область его отрицательных значений в результате преобладания в смачивающей пленке структурных сил притяжения над структурными силами отталкивания.

Выявленная инверсия знака параметра структурных сил позволяет предположить, что одной из причин появления структурных сил является отклонение свойств и параметров структуры воды от объемных значений.

Силовым и энергетическим барьером для извлечения мелких частиц является линейное натяжение. При повышении температуры уменьшается площадь захода изотермы в область ее положительных значений (краевой угол увеличивается), что является причиной изменения направления действия силы линейного натяжения и способствует росту эффективности извлечения мелких и тонких частиц.

Натурные эксперименты по флотации выполнены на пробе золотосодержащих руд месторождения Наталка. Использование разработанной технологии позволяет получить прирост извлечения золота от

80,71 до 88,70% при повышении качества концентрата от 65,09 до 100,3 г/т Au за счет уменьшения выхода концентрата на 30,1 отн. %. Из сравнения распределения золота по классам крупности в концентратах следует, что одним из факторов, способствующих приросту извлечения золота при использовании разработанной технологии, является увеличение извлечения в концентрат мелких фракций золотосодержащего материала.

Список источников

1. Surface interaction mechanisms in mineral flotation: Fundamentals, measurements, and perspectives / Xie L., Wang J., Lu Q., Hu W., Yang D., Qiao C., Peng X., Peng Q., Wang T., Sun W., Liu Q., Zhang H., Zeng H. // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021, vol. 295, article 102491.
2. Determination of the typical interactions among dispersed phases relevant to flotation applications: A review / Li D., Wang H., Li C., Liang Y., Yan X., Zhang H. // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021, vol. 288, article 102359.
3. Theory of surface forces in multivalent electrolytes / Misra R.P., De Souza J.P., Blankschtein D., Bazant M.Z. // *Langmuir*. 2019, vol. 35, issue 35, pp. 11550-11565.
4. Mohamad H.S., Neuber S., Helm C.A. Surfaces forces of asymmetrically grown polyelectrolyte multilayers: Searching for the charges // *Langmuir*. 2019, vol. 35, issue 48, pp. 15491-15499.
5. Interfacial forces across ionic liquid solutions: Effects of ion concentration and water domains / Adibnia V., Mirbagheri M., Latreille P.L., Banquy X., De Crescenzo G., Rochefort D. // *Langmuir*. 2019, vol. 35, issue 48, pp. 15585-15591.
6. Huang K., Yoon R.H. Surface forces in the thin liquid films (TLFS) of water confined between n-alkane drops

- and hydrophobic gold surfaces // *Langmuir*. 2019, vol. 35, issue 48, pp. 15681-15691.
7. Studying flotation of gold microdispersions with carrier minerals and pulp aeration with a steam-air mixture / Evdokimov S.I., Golikov N.S., Pryalukhin A.F., Kondratiev V.V., Mishedchenko A., Kuzina A.V., Bryukhanova N.N., Karlina A.I. // *Minerals*. 2024, vol. 14, no. 1, pp. 108.
8. Studying the flotation of gold-bearing ores using carrier minerals / Evdokimov S.I., Golikov N.S., Zadkov D.A., Voitovich E.V., Kondratiev V.V., Petrovskiy A.A., Konukhov V.Y., Gladikh V.A. // *Minerals*. 2024, vol. 14, no. 1, pp. 88.
9. Механизм коагуляции в условиях флотации микродисперсий золота минералами-носителями / Евдокимов С.И., Гусева Е.А., Константинова М.В., Вайтекунене Е.Л., Филюшина Е.В. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 11-1. С. 190-206.
10. Чантурия В.А., Шадрюнова И.В., Горлова О.Е. Инновационные процессы глубокой и экологически безопасной переработки техногенного сырья в условиях новых экономических вызовов // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13. № 2 (48). С. 224-237.
11. Unraveling the hydrophobic interaction mechanisms of hydrocarbon and fluorinated surfaces / Gong L., Wu F., Yang W., Huang C., Li W., Wang X., Wang J., Tang T., Zeng H. // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2023, vol. 635, pp. 273-283.
12. Nikolov A., Lee J., Wasan D. DLVO surface forces in liquid films and statistical mechanics of colloid oscillatory structural forces in dispersion stability // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2023, vol. 313, article 102847.
13. Rajupet S. DLVO interactions between particles and rough surfaces: An extended surface element integration method // *Langmuir*. 2021, vol. 37, issue 45, pp. 13208-13217.
14. Guo H., Kovscek A.R. Investigation of the effects of ions on short-range non-DLVO forces at the calcite/brine interface and implications for low salinity oil-recovery processes // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019, vol. 552, pp. 295-311.
15. Atomic force microscopy study of non-DLVO interactions between drops and bubbles / Li K., Wang W., Xiao F., Ge Y., Jin H., Yu Z., Gong J., Gao W., Peng Z. // *Langmuir*. 2021, vol. 37, issue 22, pp. 6830-6837.
16. Bal V. Stability characteristics of nanoparticles in a laminar linear shear flow in the presence of DLVO and non-DLVO forces // *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*. 2019, vol. 35, no. 34, pp. 11175-11187.
17. Wall function model for particulate fouling applying XDLVO theory / Ojaniemi U., Riihimäki M., Manninen M., Pattiangas T. // *Chemical Engineering Science*. 2012, vol. 84, pp. 57-69.
18. Gomez-Flores A., Solongo S.K., Heyes G.W. Bubble-particle interaction with hydrodynamics, XDLVO theory, and surface roughness for flotation in an agitated tank using CFD simulations // *Minerals Engineering*. 2020, vol. 152, article 106368.
19. Mozhdzheev A., Mercury L., Slodczyk A. Ubiquity of the micrometer-thick interface along quartz-water boundary // *Langmuir*. 2024, vol. 40, issue 25, pp. 13025-13041.
20. Филиппов А.В. Электростатическое взаимодействие двухслойных макрочастиц // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2023. Т. 164. Вып. 1 (7). С. 37-55.
21. Direct measurement of interaction force between solid surface and air bubble: Relationship between interaction force and contact angle / You K., Lim K., Han S., Kwon S. // *Minerals Engineering*. 2020, vol. 152, 106358.
22. Hu P., Liang L. The role of hydrophobic interaction in the heterocoagulation between coal and quartz particles // *Minerals Engineering*. 2020, vol. 154, 106421.
23. Pan L., Yoon R.-H. Measurement of hydrophobic forces in thin liquid films of water between bubbles and xanthate-treated gold surfaces // *Minerals Engineering*. 2016, vol. 98, pp. 240-250.
24. Transition of liquid drops on microstructured hydrophobic surfaces from the impaled Wenzel state to the "fakir" Cassie-Baxter state / Tzitzilis D., Tsekeridis C., Ntakoumis I., Papadopoulos P. // *Langmuir*. 2024, vol. 40, issue 26, pp. 13422-13427.
25. Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. Развитие учения о поверхностных силах – от концепции расклинивающего давления к современным нанотехнологиям // Журнал физической химии. 2020. Т. 94. № 3. С. 371-380.
26. Luo Y., Pang A.-P., Lu X. Liquid-solid interface under dynamic shear flow: Recent insights into the interfacial slip // *Langmuir*. 2020, vol. 38, issue 15, pp. 4473-4482.
27. Nizkaya T.V., Asmolov E.S., Vinogradova O.I. Gas cushion model and hydrodynamic boundary conditions for superhydrophobic textures // *Physical Review E*. 2014, vol. 90 (4), pp. 043017.
28. Nanoscale investigation into dynamics of thin liquid films during bouncing and attachment of rising air bubbles on hydrophilic and hydrophobic surfaces / Hamidzadeh F., Huang K., Ye X., Pan L. // *Langmuir*. 2023, vol. 39, issue 49, pp. 18082-18092.
29. Sherma A., Nirmalkaz N. Bulk nanobubbles through gas supersaturation originated by hot and cold solvent mixing // *Langmuir*. 2024, vol. 40, issue 24, pp. 12729-12743.
30. Song J.-W., Fan L.-W. Temperature dependence of the contact angle of water: A review of research progress, theoretical understanding and implications for boiling heat transfer // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021, vol. 288, article 102339.
31. Song J.-W., Zeng D.-L., Fan L.-W. Temperature dependence of contact angles of water on a stainless steel surface at elevated temperatures and pressure: In situ characterization and thermodynamic analysis // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2020, vol. 561, pp. 870-880.
32. Есипова Н.Е., Русанов А.И., Соболев В.Д. Температурная зависимость краевого угла сидячего пузырька на границе вода-кремний // Коллоидный журнал. 2020. Т. 82. № 5. С. 569-575.
33. Чураев Н.В., Соболев В.Д. Вклад структурных сил в смачивание поверхности кварца растворами электростатически заряженных ионов // Коллоидный журнал. 2020. Т. 82. № 5. С. 576-585.

тролита // Коллоидный журнал. 2000. Т. 62. № 2. С. 278-285.

34. Современная теория капиллярности: к 100-летию теории капиллярности Гиббса / под ред. А.И. Русанова, Ф.Ч. Гудрича. Л.: Химия, 1980. 344 с.
35. Емельяненко К.Ф., Емельяненко А.М., Бойнович Л.Б. Обзор современного состояния исследований адгезионных явлений на границах твердых тел с твердыми и жидкими водными средами // Коллоидный журнал. 2022. Т. 84. № 3. С. 274-300.
36. Bubble growth on hydrophobic rough surfaces in the shear flow / Li J., Li X., Wang C., He P., Chen H. // Langmuir. 2024, vol. 40, issue 18, pp. 9630-9635.

References

1. Xie L., Wang J., Lu Q., Hu W., Yang D., Qiao C., Peng X., Peng Q., Wang T., Sun W., Liu Q., Zhang H., Zeng H. Surface interaction mechanisms in mineral flotation: Fundamentals, measurements, and perspectives. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021;295:102491.
2. Li D., Wang H., Li C., Liang Y., Yan X., Zhang H. Determination of the typical interactions among dispersed phases relevant to flotation applications: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021;288:102359.
3. Misra R.P., De Souza J.P., Blankschtein D., Bazant M.Z. Theory of surface forces in multivalent electrolytes. *Langmuir*. 2019;35(35):11550-11565.
4. Mohamad H.S., Neuber S., Helm C.A. Surfaces forces of asymmetrically grown polyelectrolyte multilayers: Searching for the charges. *Langmuir*. 2019;35(48):15491-15499.
5. Adibnia V., Mirbagheri M., Latreille P.L., Banquy X., De Crescenzo G., Rochefort D. Interfacial forces across ionic liquid solutions: Effects of ion concentration and water domains. *Langmuir*. 2019;35(48):15585-15591.
6. Huang K., Yoon R.H. Surface forces in the thin liquid films (TLFS) of water confined between n-alkane drops and hydrophobic gold surfaces. *Langmuir*. 2019;35(48):15681-15691.
7. Evdokimov S.I., Golikov N.S., Pryalukhin A.F., Kondratiev V.V., Mishedchenko A., Kuzina A.V., Bryukhanova N.N., Karlina A.I. Studying flotation of gold microdispersions with carrier minerals and pulp aeration with a steam-air mixture. *Minerals*. 2024;14(1):108.
8. Evdokimov S.I., Golikov N.S., Zadkov D.A., Voitovich E.V., Kondratiev V.V., Petrovskiy A.A., Konyukhov V.Y., Gladikh V.A. Studying the flotation of gold-bearing ores using carrier minerals. *Minerals*. 2024;14(1):88.
9. Evdokimov S.I., Guseva E.A., Konstantinova M.V., Vaitekunene E.L., Filushina E.V. Mechanism of coagulation in the conditions of flotation of gold microdispersions with carrier minerals. *Gorniy informacionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)* [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)], 2023;(11-1):190-206. (In Russ.)
10. Chanturia V.A., Shadrinova I.V., Gorlova O.E. Innovative processes of deep and ecologically safe processing of man-made raw materials in the conditions of new economic challenges. *Ustoichivoe razvitie gornyh territoriy* [Sustainable development of mountain territories], 2021;(13-2(48)):224-237. (In Russ.)
11. Gong L., Wu F., Yang W., Huang C., Li W., Wang X., Wang J., Tang T., Zeng H. Unraveling the hydrophobic interaction mechanisms of hydrocarbon and fluorinated surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2023;635:273-283.
12. Nikolov A., Lee J., Wasan D. DLVO surface forces in liquid films and statistical mechanics of colloid oscillatory structural forces in dispersion stability. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2023;313.
13. Rajupet S. DLVO interactions between particles and rough surfaces: An extended surface element integration method. *Langmuir*. 2021;37(45):13208-13217.
14. Guo H., Kovscek A.R. Investigation of the effects of ions on short-range non-DLVO forces at the calcite/brine interface and implications for low salinity oil-recovery processes. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019;552:295-311.
15. Li K., Wang W., Xiao F., Ge Y., Jin H., Yu Z., Gong J., Gao W., Peng Z. Atomic force microscopy study of non-DLVO interactions between drops and bubbles. *Langmuir*. 2021;37(22):6830-6837.
16. Bal V. Stability characteristics of nanoparticles in a laminar linear shear flow in the presence of DLVO and non-DLVO forces. *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*. 2019;35(34):11175-11187.
17. Ojaniemi U., Riihimäki M., Manninen M., Pattiangas T. Wall function model for particulate fouling applying XDLVO theory. *Chemical Engineering Science*. 2012;84:57-69.
18. Gomez-Flores A., Solongo S.K., Heyes G.W. Bubble-particle interaction with hydrodynamics, XDLVO theory, and surface roughness for flotation in an agitated tank using CFD simulations. *Minerals Engineering*. 2020;152:106368.
19. Mozdeheei A., Mercury L., Slodczyk A. Ubiquity of the micrometer-thick interface along quartz-water boundary. *Langmuir*. 2024;40(25):13025-13041.
20. Filippov A.V. Electrostatic interaction of two-layer macroparticles. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki* [Journal of Experimental and Theoretical Physics], 2023;(164-1(7)):37-55. (In Russ.)
21. You K., Lim K., Han S., Kwon S. Direct measurement of interaction force between solid surface and air bubble: Relationship between interaction force and contact angle. *Minerals Engineering*. 2020;152:106358.
22. Hu P., Liang L. The role of hydrophobic interaction in the heterocoagulation between coal and quartz particles. *Minerals Engineering*. 2020;154:106421.
23. Pan L., Yoon R.-H. Measurement of hydrophobic forces in thin liquid films of water between bubbles and xanthate-treated gold surfaces. *Minerals Engineering*. 2016;98:240-250.
24. Tzitzilis D., Tsekeridis C., Ntakoumis I., Papadopoulos P. Transition of liquid drops on microstructured hydrophobic surfaces from the impaled Wenzel state to the "fakir" Cassie-Baxter state. *Langmuir*. 2024;40(26):13422-13427.
25. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M. Development of the doctrine of surface forces - from the concept of proclining pressure to modern nanotechnology. *Zhurnal fizicheskoy himii* [Journal of Physical Chemistry], 2020;94(3):371-380. (In Russ.)

26. Luo Y., Pang A-P., Lu X. Liquid-solid interface under dynamic shear flow: Recent insights into the interfacial slip. *Langmuir*. 2020;38(15):4473-4482.
27. Nizkaya T.V., Asmolov E.S., Vinogradova O.I. Gas cushion model and hydrodynamic boundary conditions for superhydrophobic textures. *Physical Review E*. 2014;90(4):043017
28. Hamidzadeh F., Huang K., Ye X., Pan L. Nanoscale investigation into dynamics of thin liquid films during bouncing and attachment of rising air bubbles on hydrophilic and hydrophobic surfaces. *Langmuir*. 2023;39(49):18082-18092.
29. Sherma A., Nirmalkaz N. Bulk nanobubbles through gas supersaturation originated by hot and cold solvent mixing. *Langmuir*. 2024;40(24):12729-12743.
30. Song J.-W., Fan L.-W. Temperature dependence of the contact angle of water: A review of research progress, theoretical understanding and implications for boiling heat transfer. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021;288:102339.
31. Song J.-W., Zeng D.-L., Fan L.-W. Temperature dependence of contact angles of water on a stainless steel surface at elevated temperatures and pressure: In situ characterization and thermodynamic analysis. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2020;561:870-880.
32. Esipova N.E., Itskov S.V., Sobolev V.D. Temperature dependence of sessile bubble contact angle at a water-silicon interface. *Kolloidnyi zhurnal [Colloid Journal]*, 2023;(85-2):158-166. (In Russ.)
33. Churaev N.V., Sobolev V.D. Contribution of structural forces to wetting of quartz surface by electrolyte solutions. *Kolloidnyi zhurnal [Colloid Journal]*, 2000;(62-2):278-285. (In Russ.)
34. Rusanov A.I., Goodrich F.Ch. *Sovremennaya teoriya kapillyarnosti: k 100-letiyu teorii kapillyarnosti Gibbsa [Modern theory of capillarity: To the 100th anniversary of Gibbs' theory of capillarity]*. Leningrad: Khimiya, 1980, 344 p. (In Russ.)
35. Emelianenko K.A., Emelianenko A.M., Boinovich L.B. Review of the current state of research adhesion phenomena on the boundaries of solids with solid and liquid aqueous media. *Kolloidnyi zhurnal [Colloid Journal]*, 2022;(84-3):274-300. (In Russ.)
36. Li J., Li X., Wang C., He P., Chen H. Bubble growth on hydrophobic rough surfaces in the shear flow. *Langmuir*. 2024;40(18):9630-9635.

Поступила 04.05.2024; принята к публикации 10.09.2024; опубликована 28.03.2025
Submitted 04/05/2024; revised 10/09/2024; published 28/03/2025

Евдокимов Сергей Иванович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия.
Email: eva-ser@mail.ru. ORCID0000-0002-2960-4786

Герасименко Татьяна Евгеньевна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия.
Email: gerasimenko_74@mail.ru. ORCID0000-0001-7048-4379

Горлова Ольга Евгеньевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, Москва, Россия.
Email: gorlova_o_e@mail.ru

Орехова Наталья Николаевна – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, Москва, Россия.
Email: n_orehova@mail.ru

Sergey I. Evdokimov – PhD (Eng.), Lead Researcher, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia.
Email: eva-ser@mail.ru. ORCID 0000-0002-2960-4786

Tatiana E. Gerasimenko – PhD (Eng.), Lead Researcher, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia.
Email: gerasimenko_74@mail.ru. ORCID 0000-0001-7048-4379

Olga E. Gorlova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Geology, Mine Surveying and Mineral Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; Institute of Problems of Integrated Subsoil Development named after Academician N.V. Melnikov of the RAS, Moscow, Russia.
Email: gorlova_o_e@mail.ru

Natalia N. Orekhova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Lead Researcher, Institute of Problems of Integrated Subsoil Development named after Academician N.V. Melnikov of the RAS, Moscow, Russia.
Email: n_orehova@mail.ru

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.765.061.2
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-17-25



ВЛИЯНИЕ ТРЕТИЧНЫХ АЦЕТИЛЕНОВЫХ СПИРТОВ «ДМИПЭК» НА ФЛОТАЦИЮ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД

Петухов В.Н.¹, Свечникова Н.Ю.¹, Волощук Т.Г.¹, Юдина С.В.¹, Щелкунов С.А.², Малышев О.А.²

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

²ООО «БиоХимПром», Москва, Россия

Аннотация. В статье изложены результаты исследований факторов, влияющих на эффективность флотации золотосодержащих руд. Одной из основных проблем при обогащении золотосодержащих рудных месторождений является извлечение мелких классов золота. Для оценки энергии образования химических связей реагентов с поверхностью минералов выполнены квантово-химические расчеты ацетиленсодержащего реагента «ДМИПЭК» с использованием метода молекулярной механики (ММ+), разработанного для органических молекул в программе NureChem-7 (NCh-7). Для визуальных исследований закономерностей флотации мелких минеральных частиц в графическом редакторе Inkscape были созданы схемы, иллюстрирующие процессы образования флотокомплексов с участием реагентов в безынерционном режиме. Также продемонстрированы схемы предполагаемого взаимодействия мелких минеральных частиц с пузырьками газа при флотации. Селективное избирательное взаимодействие молекул ацетиленсодержащих реагентов с поверхностью мелких минералов обусловлено характером донорно-акцепторного взаимодействия и не зависит от отсутствия или наличия гидрофобного эффекта, позволяет фиксировать мелкие частицы минералов на поверхности пенных пузырьков, в структуре бимолекулярных оболочек которых находятся ацетиленсодержащие молекулы. Отмечены особенности образования органоминеральных комплексов и π -комплексов золота с окисленной и сульфидной поверхностями минералов. Положительные результаты по флотации золотосодержащей руды Акбакайского ГОКа получены при применении ацетиленсодержащего реагента «ДМИПЭК» в количестве 33-50 г/т. При применении ацетиленсодержащего реагента «ДМИПЭК» наблюдается дополнительное извлечение металлов в концентраты при наличии частиц руды не менее 80% класса -0,074 мм.

Ключевые слова: третичные ацетиленовые спирты, флотореагент «ДМИПЭК», золотосодержащая руда, гидрофобный эффект, π -комплексы

© Петухов В.Н., Свечникова Н.Ю., Волощук Т.Г., Юдина С.В., Щелкунов С.А., Малышев О.А., 2025

Для цитирования

Влияние третичных ацетиленовых спиртов «ДМИПЭК» на флотацию золотосодержащих руд / В.Н. Петухов, Н.Ю. Свечникова, Т.Г. Волощук, С.В. Юдина, С.А. Щелкунов, О.А. Малышев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 17-25.
<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-17-25>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

INFLUENCE OF DMIPEK TERTIARY ACETYLENE ALCOHOLS ON THE FLOTATION OF GOLD-BEARING ORES

Petukhov V.N.¹, Svechnikova N.Y.¹, Voloshchuk T.G.¹, Yudina S.V.¹, Shchelkunov S.A.²,
Malyshev O.A.²

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

²LLC BioChemProm, Moscow, Russia

Abstract. The article presents the studies results of factors affecting the effectiveness of flotation of gold-bearing ores. One of the main problems in the enrichment of gold-bearing ore deposits is the extraction of small grades of gold. To estimate the energy of chemical bonds formation of reagents with the surface of minerals, quantum chemical calculations of the acetylene-containing reagent DMIPEK were performed using the method of molecular mechanics (MM+) developed for organic molecules in the HyperChem - 7 (HCh - 7) program. For visual studies of the patterns of flotation of small mineral particles, diagrams illustrating the formation of flotation complexes with the participation of reagents in the inertialess mode were created in the Inkscape graphic editor. Schemes of the proposed interaction of small mineral particles with gas bubbles during flotation are also demonstrated. The selective interaction of acetylene-containing reagent molecules with the surface of small minerals is due to the nature of the donor-acceptor interaction and does not depend on the absence or presence of a hydrophobic effect. It allows to detect small mineral particles on the surface of bubbles, in the structure of the bimolecular shells of which acetylene-containing molecules are located. The features of the formation of organomineral complexes and π -complexes of gold with oxidized and sulfide surfaces of minerals are noted. Positive results on the flotation of the gold-bearing ore of the Akbakai Mining and Processing Plant were obtained using the acetylene-containing reagent DMIPEK in the amount of 33-50 g/t. When using the DMIPEK acetylene-containing reagent, additional extraction of metals into concentrates is observed in the presence of ore particles of at least 80% of the 0.074 mm grade.

Keywords: tertiary acetylene alcohols, DMIPEK flotation reagent, gold-containing ore, hydrophobic effect, π -complexes

For citation

Petukhov V.N., Svechnikova N.Y., Voloshchuk T.G., Yudina S.V., Shchelkunov S.A., Malyshev O.A. Influence of DMIPEK Tertiary Acetylene Alcohols on the Flotation of Gold-Bearing Ores. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 17-25. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-17-25>

Введение

Обогащению золотосодержащих руд методом флотации уделялось значительное количество исследований [1, 2]. Одной из основных проблем при обогащении золотосодержащих рудных месторождений является извлечение мелких классов золота. Поскольку золото фракций менее -0,07 мм гравитационными методами не извлекается, для их обогащения применяются флотационные методы.

Реагенты, содержащие в своей структуре ацетиленовую связь, достаточно успешно испытаны российскими учеными при флотации руд и коксующихся углей, где показали устойчивые результаты по дополнительному извлечению углей на 3–8% и улучшенному качеству (сниженной зольности) на 1,5–3% получаемых концентратов [3–7].

Применение ацетиленсодержащих соединений в качестве реагентов для флотации сульфидных руд цветных и драгоценных металлов показало, что в оптимальном сочетании и дозировке с базовыми реагентами они позволяют получать дополнительное извлечение металлов в соответствующие концентраты от 1 до 12%.

Флотореагент «ДМИПЭК», основным веществом которого является диметил(изопропенилэтинил)карбинол, имеет структурную химическую формулу – $(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{OH})\text{C}\equiv\text{CC}(\text{CH}_3)=\text{CH}_2$ и был успешно испытан на ряде золотосодержащих руд [8, 9].

Селективное избирательное взаимодействие молекул ацетиленсодержащих реагентов с поверхностью мелких минералов обусловлено характером донорно-акцепторного взаимодействия и не зависит от отсутствия или наличия гидрофобного эффекта, позволяет фиксировать мелкие частицы минералов на поверхности пенных пузырьков, в структуре бимолекулярных оболочек которых находятся ацетиленсодержащие молекулы.

Такое явление, как существование гидрофобных или в общем случае сольвофобных эффектов, не является в химии большей аномалией, чем существование сильных и слабых электролитов или ионных растворов, не подчиняющихся закону Дебая-Хюккеля, однако оно имеет гораздо большие последствия по причине исключительной технологической значимости гидрофобных эффектов в процессе флотационного разделения минералов [11].

Гидрофобный эффект обусловлен упрочнением связей между молекулами воды и неполярными молекулами, растворенными в ней. Относительно недавно теоретические разработки начали объяснять и количественно определять многие особенности гидрофобного эффекта как явления разделения масла и воды [11-13].

Существенным отличием от свойств всех известных традиционных собирателей, которым обладают ацетиленовые третичные спирты, является наличие гидроксильной группировки в составе их молекул и адсорбционного центра, представляющего собой тройную связь, которая не является утроенной простой, а представляет собой комбинированную, состоящую из трех связей: одной σ - и двух π -связей. В молекулах третичных ацетиленовых спиртов имеются три σ -связи (одна связь C–C и две связи C–H) и две π -связи между двумя атомами углерода. Вследствие этого третичные ацетиленовые спирты обладают свойствами слабых C–H, где константа кислотной диссоциации $K_a \sim 25$. Такие молекулы участвуют одновременно в двух контактах, группа OH находится в пенной оболочке, а через тройную связь образуется π -комплекс с поверхностью сульфидных минералов. Это определяет устойчивость образующихся комплексов минерал-реагент-пузырек пены в отсутствие полярного растворителя (воды) в пенном слое.

Теоретические основы взаимодействия ацетиленсодержащих соединений с поверхностью минералов

Для оценки энергии образования химических связей реагентов с поверхностью минералов выполнены квантово-химические расчеты построенных моделей с использованием метода молекулярной механики (ММ+), разработанного для органических молекул в программе HyperChem-7 (HCh-7) [14].

Для визуальных исследований закономерностей флотации мелких минеральных частиц были созданы схемы реагентов в графическом редакторе Inkscape с жидкостью в безынерционном режиме.

Квантово-химические расчеты построенных моделей с использованием метода молекулярной механики (ММ+), разработанного для органических молекул в программе HyperChem-7 (HCh-7) реагента диметил(изопропенилэтил)карбинол «ДМИПЭК», приведены в табл. 1.

С физико-химической точки зрения селективность для ацетиленсодержащих реагентов при образовании π -комплексов с катионами металла определяется совпадением строения их внешних перекрывающихся молекулярных орбиталей [15]. Согласно общему принципу квантовой химии, волновые функции атомных орбиталей тем легче перекрываются с образованием молекулярных орбиталей, чем ближе они по энергии. Заселение орбиталей осуществляется при соблюдении Принципа Паули в соответствии с Правилом Гунда [16-18]. Для визуальных исследований закономерностей флотации мелких минеральных частиц были созданы схемы в графическом редакторе Inkscape с жидкостью в безынерционном режиме

(рис. 1–6), они обтекают воздушные пузырьки, не контактируя с ними.

Таблица 1. Рассчитанные квантово-химические показатели молекул «ДМИПЭК»
Table 1. Calculated quantum chemical parameters of DMIPEK molecules

Показатель	Расчетные модели, значения
Растяжка	0,2429
Изгиб	0,7118
Растяжка-Изгиб	0,0542
Кручение	0,4761
Не-1,4 СВД	-1,7603
1,4 ВДВ	4,0342
Диполь/Диполь	1,0760
Полная энергия, ккал/моль	4,8350

На рис. 1 показан выделенный фрагмент π -комплекса, образованного молекулой ацетиленсодержащего реагента с адсорбированной OH-группировкой в водную оболочку пузырька пены, и комплексом, образованным через ацетиленовую связь с сульфидом металла.

Несмотря на то, что кинетическая теория флотации мелких частиц в настоящее время получила достаточно широкое распространение, тем не менее по-прежнему параметры флотации каждого конкретного объекта можно определить только экспериментальным путем [19-23].

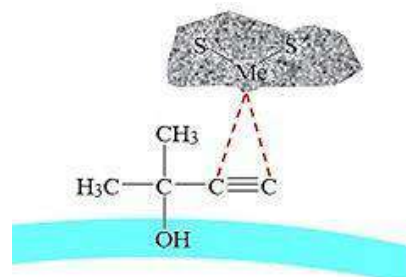


Рис. 1. Фрагмент I модели закрепления мелких минералов на оболочке пенного пузырька в пенном слое

Fig. 1. Fragment I of the model of fixing small minerals on the shell of a bubble in froth bed

Крупные частицы 1 (см. рис. 2) могут закрепляться на поверхности газовых пузырьков за счет инерционного удара, средние частицы 2 за счет сочетания сил инерционного действия и прижимной гидростатической силы. Отклонение траектории малых частиц 3 от прямолинейного пути к поверхности пузырька на расстояниях порядка размера пузырька обусловлено гидродинамическим взаимодействием, которое принято называть дальним взаимодействием [24, 25].

Возмущение, которое вносит пузырёк в поток пульпы, существенно влияет только на движение очень мелких частиц и практически не влияет на

движение крупных частиц, когда он движется в пульпе. Крупные частицы (см. **рис. 3**) могут закрепляться на пузырьках газа в пульпе и выноситься на поверхность пульпы.

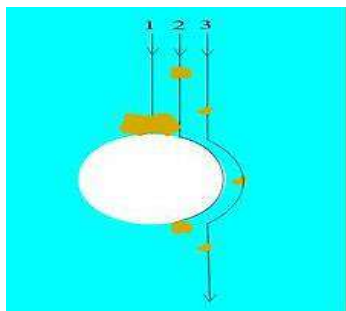


Рис. 2. Траектория движения частиц вблизи воздушного пузырька: 1 – инерционная; 2 – слабоинерционная; 3 – безынерционная

Fig. 2. The trajectory of the particles near the air bubble: 1 is inertial, 2 is weak-inertial, 3 is inertialess

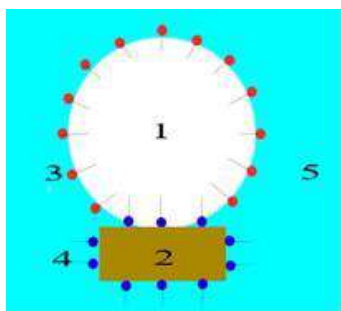


Рис. 3. Модель закрепления крупного минерала на пузырьке газа в пульпе: 1 – пузырек газа в пульпе; 2 – частица минерала; 3 – слой из молекул пенообразователя; 4 – молекулы адсорбированного на минерале собирателя; 5 – пульпа

Fig. 3. A model of fixing a large mineral on a gas bubble in a pulp: 1 is a gas bubble in the pulp, 2 is a mineral particle, 3 is a layer of frothing agent molecules, 4 is molecules of a collector adsorbed on the mineral, 5 is a pulp

При образовании бимолекулярной оболочки пузырька пены при пересечении границы раздела жидкость/газ на поверхности пульпы крупные частицы остаются прикрепленными к пузырькам пены (см. **рис. 4**).

Между тем может реализоваться модель взаимодействия, когда крупный минерал сталкивается с пузырьком пены не в пульпе, а на поверхности флотационной пульпы (см. **рис. 5**).

При таком взаимодействии минерала 2 с поверхностью пенного пузырька 1 важную роль начинает играть действие гидрофобного эффекта 4, возникающего между молекулами пенообразователя 3, пузырьком пены и молекулами собирателя 5, адсорбированными на поверхности минеральной частицей. Мелкие минеральные частицы 6 во взаимодействии не участ-

вуют. Предполагаемая модель закрепления мелких частиц на пенных пузырьках в случае применения ацетиленсодержащих реагентов показана на **рис. 6**.

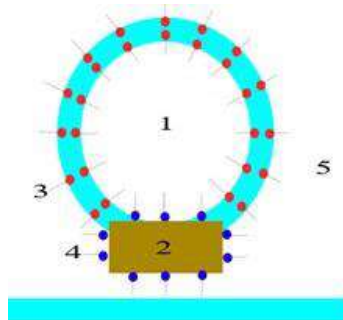


Рис. 4. Модель закрепления крупного минерала на пузырьке пены: 1 – пузырек пены в пенном слое; 2 – частица минерала; 3 – бимолекулярная оболочка из молекул обычного пенообразователя; 4 – молекулы обычного собирателя, адсорбированного на крупном минерале; 5 – межпузырьковое пространство пены

Fig. 4. A model of fixing a large mineral on a bubble: 1 is a bubble in froth bed, 2 is a particle of mineral, 3 is a bimolecular shell of molecules of an ordinary froth converter, 4 is molecules of an ordinary collector adsorbed on a large mineral, 5 is the bubble space of froth

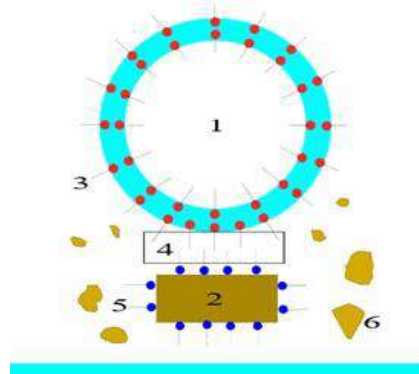


Рис. 5. Модель закрепления крупного минерала на пузырьке в пенном слое: 1 – пузырек пены в пенном слое; 2 – крупная частица минерала; 3 – бимолекулярная оболочка из молекул обычного пенообразователя; 4 – зона действия гидрофобного эффекта; 5 – молекулы обычного собирателя, адсорбированного на крупной частице минерала; 6 – мелкие частицы минералов

Fig. 5. A model of fixing a large mineral on a bubble in froth bed where: 1 is a bubble in froth bed, 2 is a large particle of a mineral, 3 is a bimolecular shell of molecules of a conventional frothing agent, 4 is a zone of action of a hydrophobic effect, 5 is molecules of an ordinary collector adsorbed on a large particle of a mineral, 6 is small mineral particles

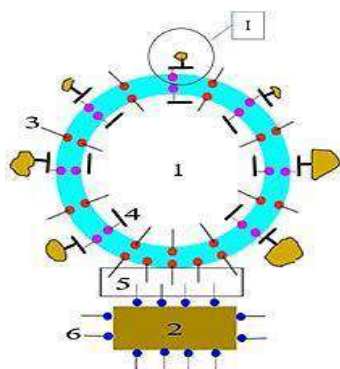


Рис. 6. Модель закрепления крупных и мелких минералов в пенном слое: 1 – пузырек пены в пенном слое; 2 – крупная частица минерала; 3 – бимолекулярная оболочка из молекул стандартного и ацетиленсодержащего пенообразователей; 4 – молекула ацетиленсодержащего реагента; 5 – зона действия гидрофобного эффекта; 6 – молекулы обычного собирателя, адсорбированного на крупной минеральной частице

Fig. 6. A model for fixing large and small minerals in froth bed where: 1 is a bubble in froth bed, 2 is a large particle of a mineral, 3 is a bimolecular shell of molecules of standard and acetylene-containing frothing agents, 4 is a molecule of an acetylene-containing reagent, 5 is a zone of action of a hydrophobic effect, 6 is molecules an ordinary collector adsorbed on a large mineral particle

Таким образом, тонкая оболочка из жидкости (воды) у пузырька пены позволяет закрепиться в ней ацетиленовому реагенту с группой OH . Что дает возможность удерживать тонкую частицу сульфидного минерала на пузырьке, с которой молекула реагента соединилась посредством образования связей с ионами металла на поверхности частицы.

Продemonстрированные схемы предполагаемого взаимодействия мелких минеральных частиц с пузырьками газа при флотации определяются неотъемлемыми физико-химическими свойствами молекул ацетиленсодержащих реагентов. Селективное избирательное взаимодействие молекул ацетиленсодержащих реагентов с поверхностью мелких минералов обусловлено характером донорно-акцепторного взаимодействия и не зависит от отсутствия или наличия гидрофобного эффекта, позволяет фиксировать мелкие частицы минералов на поверхности пенных пузырьков ацетиленсодержащих молекул. Таким образом, пенные пузырьки, сформированные ацетиленсодержащими молекулами, отличаются адсорбционными свойствами от обычных пенных пузырьков флотации по отношению к мелким частицам сульфидных минералов. Такие свойства пенных пузырьков и обеспечивают получение дополнительного извлечения металлов.

Согласно теории флотации, осаждение малых частиц (в отличие от крупных) на поверхность пузырька

протекает безынерционно и не сопровождается существенной деформацией поверхности. Расклинивающее давление двойных электрических слоев в зоне контакта частиц и пузырьков является наиболее общим фактором, затрудняющим флотацию малых частиц, поэтому для его преодоления рекомендовано применение ионогенных ПАВ или агрегация [26–30].

Исследование причин, оказывающих влияние на неполное извлечение минералов при флотации, позволит получить ответ на вопрос о том, что являются ли минералы, перешедшие в хвосты обогащения, утраченными или представляют собой извлекаемый резерв.

Полученные результаты и их обсуждение

Положительные результаты по флотации золотосодержащей руды Акбакайского ГОКа (Республика Казахстан) получены при применении реагента «ДМИПЭК» в количестве 33–50 г/т. В качестве реагента собирателя применялся бутиловый ксантогенат (БК) в количестве 200 г/т. Исследованием установлено, что использование реагента-вспенивателя «ДМИПЭК» вместо реагента Т-80 позволяет повысить извлечение золота на 6,5–10,54%, при равном выходе концентратов на уровне 5,0–5,2%, что свидетельствует о высокой селективной способности реагента «ДМИПЭК» (табл. 2). Необходимо отметить, что золотосодержащую руду Акбакайского ГОКа измельчали до содержания частиц диаметром менее 0,074 мм в количестве 85 мас. %, содержание руды в пульпе составляло 20%, время флотации 5 мин.

Представляют интерес исследования ПАО «Иргиредмет» реагентов-вспенивателей Т-92 и «ДМИПЭК» при флотации сурьмяных руд месторождений «Сарылах» (проба ТП-2013-1) и «Северный Акташ» компании «GeoProMining», результаты которых приведены в табл. 3, 4.

Флотация состоит из основной и контрольной операций. Питанием флотации являются хвосты гравитационного обогащения сурьмяных руд. Измельчение хвостов гравитационного обогащения проводили до крупности руды 80% 0,074 мм, время основной флотации 10 мин, контрольной флотации 20 мин.

Визуально отмечено, что реагент «ДМИПЭК» обеспечивает более плотную и нагруженную пену, по сравнению с реагентом Т-92.

Получено дополнительное извлечение соответствующих металлов в концентраты: золота/сурьмы от 1,88/0,48 до 7,16/0,27% при увеличении выхода концентрата соответственно на 5,51 и 5,97%.

В основной флотации заметно повысилось извлечение золота и сурьмы (на 26,3 и 9,6% соответственно), а также значительно увеличился выход флотоконцентрата основной флотации: с 6,1 до 14,4% – практически в 2,4 раза, извлечение ценных компонентов в общий концентрат получено несколько выше: золота на 2,4%, сурьмы на 1,2%, чем при базовом режиме флотации.

В проведенных исследованиях единственным изменяемым фактором является добавление к базовым режимам нового реагента «ДМИПЭК», что способствует дополнительному извлечению золота.

Таблица 2. Результаты флотации золотосодержащей руды Акбакайского ГОКа
Table 2. Results of flotation of gold-bearing ore of Akbakai Mining and Processing Plant

Номер опыта	Продукты флотации	Выход, %	Содержание, г/т		Извлечение, %		Реагентный режим	
			Au	Ag	Au	Ag	СобираТЕЛЬ	Вспениватель
1	Концентрат	5,1	174,5	84,2	82,4	55,2	БК 200 г/т	Т-80 80 г/т
	Хвосты	94,9	2,00	3,7	17,6	45,0		
	Исходная руда	100,0	10,80	7,80	100,0	100,0		
2	Концентрат	5,0	192,3	88,75	88,9	56,9	БК 200 г/т	«ДМИПЭК» 33 г/т
	Хвосты	95,0	1,3	3,54	11,1	43,1		
	Исходная руда	100,0	10,80	7,80	100,0	100,0		
3	Концентрат	5,2	193	78,75	92,94	52,6	БК 200 г/т	«ДМИПЭК» 50 г/т
	Хвосты	94,8	0,8	3,9	7,06	47,4		
	Исходная руда	100,0	10,80	7,80	100,0	100,0		

Таблица 3. Показатели флотации сурьмяной руды месторождения «Сарылах» (проба ТП-2013-1) при использовании реагентов-вспенивателей Т-92 и «ДМИПЭК»

Table 3. Indicators of antimony ore flotation at the Sarylakh deposit (TP-2013-1 sample) using T-92 and «DMIPEK» frothing reagents

Номер опыта	Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, г/т			Извлечение, %			Расход реагентов, г/т	
			Au	Sb	As	Au	Sb	As	СобираТЕЛЬ основной/контрольной флотации	Вспениватель основной/контрольной флотации
1	Концентрат основной флотации	15,75	8,50	44,1	0,37	72,8	86,7	63,32	Pb(NO ₃) ₂ 600/300	БКК 350/170 Т-92 60/40
	Концентрат контрольной флотации	16,89	2,05	5,6	0,50	18,8	11,8	27,90		
	Общий концентрат	32,64	5,16	24,17	0,26	91,6	98,50	91,22		
	Хвосты	67,36	0,23	0,176	0,012	8,4	1,5	8,78		
	Исходный (хвосты гравитации)	100,0	1,84	8,01	0,092	100,0	100,0	100,0		
2	Концентрат основной флотации	17,37	8,8	42,8	0,31	81,16	97,27	62,97	Pb(NO ₃) ₂ 600/300	БКК 350/170 «ДМИПЭК» 60/40
	Концентрат контрольной флотации	21,24	1,1	0,62	0,12	12,32	1,71	30,28		
	Общий концентрат	38,61	4,55	19,59	0,21	93,48	98,98	93,25		
	Хвосты	61,39	0,20	0,126	0,0094	6,52	1,02	6,75		
	Исходный (хвосты гравитации)	100,0	1,88	7,64	0,0855	100,0	100,0	100,0		

Таблица 4. Показатели флотации сурьмяной руды месторождения «Северный Акташ» при использовании «ДМИПЭК»

Table 4. Indicators of antimony ore flotation of the Severny Aktash deposit when using «DMIPEK» frothing reagent

Номер опыта	Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, г/т		Извлечение, %		Расход реагентов	
			Au	Sb	Au	Sb	СобираТЕЛЬ	Вспениватель
1	Концентрат основной флотации	6,1	10,2	2,86	30,7	64,4	Основная флотация: Pb(NO ₃) ₂ 150 г/т, CuSO ₄ 300 г/т, БКК 200 г/т	Основная флотация: Т-92 40 г/т контрольная флотация: ДТФА 100 г/т
	Концентрат контрольной флотации	26,6	3,88	0,269	51,0	26,4		
	Общий концентрат	32,7	5,05	0,75	81,7	90,8		
	Хвосты	67,3	0,55	0,037	18,3	9,2		
	Исходный	100,0	2,02	0,27	100,0	100,0		
2	Концентрат основной флотации	14,4	8,4	1,42	57,0	74,0	Основная флотация: Pb(NO ₃) ₂ 150 г/т, CuSO ₄ 300 г/т, БКК 200 г/т	Основная флотация: «ДМИПЭК» 40 г/т контрольная флотация: ДТФА 100 г/т
	Концентрат контрольной флотации	22,1	2,6	0,225	27,1	18,0		
	Общий концентрат	36,5	4,88	0,71	84,1	92,0		
	Хвосты	63,5	0,53	0,035	15,9	8,0		
	Исходный	100,0	2,12	0,28	100,0	100,0		

Заключение

Таким образом, практика флотационного обогащения золотосодержащих руд показала технологическую значимость гидрофобного эффекта в процессе селективного флотационного разделения частиц минералов для традиционных видов собирателей и существенное различие их собирательного действия по сравнению с собирателями, представляющими третичные ацетиленовые реагенты «ДМИПЭК».

Список источников

1. Cruz N., Peng Y., and Wightman E. Interactions of clay minerals in copper-gold flotation: part 2-influence of some calcium bearing gangue minerals on the rheological behavior // *International Journal of Mineral Processing*. 2015, vol. 141, pp. 51–60.
2. Otsuki A., Yue C. Coal-oil gold agglomeration assisted flotation to recover gold from refractory ore // *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 879, 5th International Conference New Achievements in Materials and Environmental Science (NAMES'16) 7–9 November 2016, Nancy, France.
3. Исследование физико-химических закономерностей процесса флотации графитовой спели / Н.В. Фадеева, Н.Н. Орехова, Е.В. Колодежная, Н.Н. Нигматова // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2022. Т. 20. № 4. С. 37–46. DOI 10.18503/1995-2732-2022-20-4-37-46.
4. Yushina T.I., Purev B., Namuungerel B. Substantiation of the erdenetiyn-ovoo copper-molybdenum ore flotation technology with the use of tertiary acetylene alcohols // *Non-Ferrous Metals*. 2020, vol. 49, no. 2, pp. 3–10. DOI 10.17580/nfm.2020.02.01.
5. Properties of additional collectors foaming agents based on acetylenic alcohols / S. A. Shchelkunov, O. A. Malyshev, T. I. Yushina, V. N. Dunaeva // *Non-Ferrous Metals*. 2015, vol. 2015, no. 2, pp. 3–10.
6. А.с. СССР, МПК В03Д 1/008, В03Д 1/02 № 390836. Собиратель / П.М. Соложенкин, Е.М. Глазунова, В.П. Федулов, К.В. Гиацинтова. Бюл. № 31. 390836 (СССР); заявл. 10.05.1972; опубл. 25.07.1973.
7. А.с. СССР, МПК В03Д 1/008, В03Д 1/02 405595. Собиратель / А.В. Глембоцкий, И.Б. Быстрова, О.В. Глембоцкий, Б.В. Хамидов, В.Ф. Моисеенко, Б.Ф. Сусликов. Бюл. № 45; заявл. 29.10.1972; опубл. 10.12.1973.
8. А.с. СССР, МПК В03Д 1/008, В03Д 1/02 № 1242239. Способ флотации угля / В.Н. Петухов, С.Ф. Караев, А.С. Кязимов, В.П. Чалина. Бюл. № 25; заявл. 27.03.1986; опубл. 07.08.1987.
9. А.с. СССР, МПК В03Д 1/008, В03Д 1/02 № 1253664. Способ флотации угля / В.Н. Петухов, С.Ф. Караев, А.С. Кязимов, Т.В. Михайлова. Бюл. № 32; заявл. 04.02.1994; опубл. 20.12.1996.
10. А.с. СССР, МПК В03Д 1/008, В03Д 1/02 № 937024. Собиратель-вспениватель для флотации угольных шламов / А.А. Данчина, Н.М. Овчинникова, Н.С. Власова, А.В. Щелкунов, И.Ю. Кибина, Ш.М. Мустаева, И.Е. Черевко, А.Р. Молявко, Р.В. Мерцалов, И.Г. Лурье, Ю.Б. Черняк, И.А. Данчин. Бюл. № 23; заявл. 23.07.1980; опубл. 23.06.1982.
11. Изучение флотационных свойств дополнительных собирателей-пенообразователей на основе ацетиленовых спиртов / С.А. Щелкунов, О.А. Малышев, Т.И. Юшина, И.О. Крылов, В.Н. Дунаева // *Труды XXIV Международного научного симпозиума «Неделя горняка-2016»*, 26 января 2016. М., 2016.
12. Гидрофобные и гидрофильные эффекты в системах вода-органический растворитель аминокислота / Кустов А.В., Бекенева А.В., Смирнова Н.Л. и др. // *XIII Симпозиум по межмолекулярному взаимодействию и конформациям молекул*. СПб., 2006. С. 114.
13. Кустов А.В. Гидрофобные эффекты: структурные, термодинамические, прикладные аспекты. Достижения последних лет. М.: Красанд, 2013. 224 с.
14. Соложенкин П.М., Кубак Д.А., Петухов В.Н. Компьютерное моделирование сульфгидрильных соединений с гидроксильными радикалами и прогноз их в качестве флотореагентов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2016. Т. 14. № 1. С. 26–33. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-59-68.
15. David Chandler. Interfaces and the driving force of hydrophobic assembly. *Nature* volume 437, pages 640 – 647(2005). Химический факультет, Калифорнийский университет, Беркли, Калифорния, 94720, США.
16. Кесслер Ю.М., Зайцев А.Л. Сольвофобные эффекты. Теория, эксперимент, практика. Л.: Химия, 1989. 312 с.
17. Peculiarities of the DC-80 reagent based on acetylenic alcohols effect in flotation processes / T.I. Yushina, O.A. Malyshev, S.A. Shchelkunov, D.P. Khrustalev // *Non-ferrous Metals*. 10.17580/nfm.2016.02.02.
18. Пат. 2552430 Российская Федерация, МПК В03Д 1/004, В03Д 101/04. Пенообразователь для флотации полезных ископаемых и способ его получения / Щелкунов С.А., Малышев О.А.; заявл. 16.12.2013; опубл. 10.06.2015.
19. Пат. 027616 Российская Федерация, МПК В03Д 1/001, В03Д 101/04. Пенообразователь для флотации полезных ископаемых / Щелкунов С.А., Малышев О.А.; заявл. 26.08.2013; опубл. 10.12.2014.
20. Дерягин Б. В., Духин С. С., Рулев Н. Н. Кинетическая теория флотации малых частиц // *Успехи химии*. 1982. №51(1). С. 92–118.
21. Темкин О.Н., Шестаков Г.К., Трегер Ю.А. Ацетилен. Химия. Механизмы реакций. Технология. М.: Химия, 1991. 415 с.
22. Глинка Н.Л. Общая химия: учеб. пособие для вузов / под. ред. А.И. Ермакова. 30-е изд., испр. М.: Интеграл-Пресс, 2003. 728 с.
23. Давыдов А. С. Квантовая механика. М.: Наука, 1973. 334 с.
24. Багоцкий В.С. Основы электрохимии. М.: Химия, 1988. 400 с.
25. Дерягин Б.В., Духин С.С., Рулев Н.Н. Микрофлотация: водоочистка, обогащение. М.: Химия, 1986. 112 с.
26. Классен В.И., Мокроусов В.А. Введение в теорию флотации. М.: Госгортехиздат, 1959. 636 с.
27. Глембоцкий В.А., Классен В.И. Флотационные методы обогащения. М.: Недра, 1981. 304 с.

28. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985. 300 с.
29. Nagaraj D.R., Farinato R.S. Evolution of flotation chemistry and chemicals: A century of innovations and the lingering challenges // Minerals Engineering. October 2016, vol. 96–97, pp. 2–14.
30. Райхардт К. Растворители и эффекты среды в органической химии: пер. с англ. М.: Мир, 1991. 763 с.

References

1. Cruz N., Peng Y., Wightman E. Interactions of clay minerals in copper-gold flotation: part 2-influence of some calcium bearing gangue minerals on the rheological behavior. International Journal of Mineral Processing. 2015;141:51–60.
2. Otsuki A., Yue C. Coal-oil gold agglomeration assisted flotation to recover gold from refractory ore. Journal of Physics: Conference Series, Volume 879, 5th International Conference New Achievements in Materials and Environmental Science (NAMES'16) 7–9 November 2016, Nancy, France.
3. Fadeeva N.V., Orekhova N.N., Kolodezhnaya E.V., Nigmatova N.N. Investigation of physico-chemical regularities of primary graphite flotation process. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2022;20(4):37–46. (In Russ.) DOI 10.18503/1995-2732-2022-20-4-37-46.
4. Yushina T. I. Purev B., Namuungerel B. Substantiation of the erdenetiyn-ovoo copper-molybdenum ore flotation technology with the use of tertiary acetylene alcohols. Non-Ferrous Metals. 2020;49(2):3–10. DOI 10.17580/nfm.2020.02.01.
5. Shchelkunov S.A., Malyshev O.A., Yushina T.I., Dunaeva V.N. Properties of additional collectors foaming agents based on acetylenic alcohols. Non-Ferrous Metals. 2015;2015(2):3–10.
6. Solozhenkin P.M., Glazunova E.M., Fedulov V.P., Giatsintova K.V. Collector [Collector]. A.c. USSR, MPK B03D 1/008, B03D 1/02, no. 390836, 1973.
7. Glembotsky A.V., Bystrova I.B., Glembotsky O.V., Khamidov B.V., Moiseenko V.F., Suslikov B.F. Collector [Collector]. A.c. USSR, IPC B03D 1/008, B03D 1/02 405595, 1973.
8. Petukhov V.N., Karaev S.F., Kazimov A.S., Chalina V.P. Sposob flotacii uglya [Method of coal flotation]. A.c. USSR, MPK B03D 1/008, B03D 1/02, no. 1242239, 1987.
9. Petukhov V.N., Karaev S.F., Kazimov A.S., Mikhailova T.V. Sposob flotacii uglya [Method of coal flotation]. A.c. USSR, MPK B03D 1/008, B03D 1/02, no. 1253664, 1996.
10. Danchina A.A., Ovchinnikova N.M., Vlasova N.S., Shchelkunov A.V., Kibina I.Y., Musataeva Sh.M., Cherevko I.E., Molyavko A.R., Mertsalov R.V., Lurie I.G., Chernyak Yu.B., Danchin I.A. Sobiratel-vspenivatel dlya flotacii ugolnyh shlamov [Collector-fother for coal sludge flotation]. A.c. USSR, IPC B03D 1/008, B03D 1/02, no. 937024, 1982.
11. Shchelkunov S.A., Malyshev O.A., T.I. Yushina, I.O. Krylov, Dunaeva V.N. Studying the flotation properties of additional froth collectors based on acetylene alcohols. Trudy XXIV Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma «Nedelya gornyaka-2016» [Proceedings of the International Scientific Symposium “Miner's Week-2016”], January 26, 2016. Moscow, 2016. (In Russ.)
12. Kustov A.B., Bekeneva A.B., Smirnova H.L. et al. Hydrophobic and hydrophilic effects in water-organic solvent amino acid systems. XIII Simpozium po Mezhmolekulyarnomu vzaimodejstviyu i konformatsiyam molekul [XIII Symposium on Intermolecular Interaction and Conformations of Molecules]. Saint Petersburg, 2006, pp. 114. (In Russ.)
13. Kustov A.V. Gidrofobnye efekty: strukturnye, termodinamicheskie, prikladnye aspekty. Dostizheniya poslednih let [Hydrophobic effects: structural, thermodynamic, applied aspects. Achievements of recent years]. Moscow: KRASAND, 2013, 224 p. (In Russ.)
14. Solozhenkin P.M., Kubak D.A., Petukhov V.N. Computer modeling of sulfhydryl compounds with hydroxyl radicals and their prediction as flotation reagents. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016;14(1):26–33. (In Russ.) doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-59-68.
15. David Chandler. Interfaces and the driving force of hydrophobic assembly. Nature. 2005;437:640–647.
16. Kessler Y.M., Zaitsev A.L. Solvofobnye efekty. Teoriya, eksperiment, praktika. [Solvophobic effects. Theory, experiment, practice]. Leningrad: Chemistry, 1989, 312 p. (In Russ.)
17. Yushina T. I., Malyshev O. A., Shchelkunov S. A., Khrustalev D. P. Particularities of the DC-80 reagent based on acetylenic alcohols effect in flotation processes. Non-ferrous Metals. 10.17580/nfm. 2016.02.02.
18. Shchelkunov S.A., Malyshev O.A. Penobrazovatel dlya flotacii poleznyh iskopaemyh i sposob ego polucheniya [Frothing agent for mineral flotation and the method of its production]. Patent RF, no. 2552430, 2015.
19. Shchelkunov S.A., Malyshev O.A. Penobrazovatel dlya flotacii poleznyh iskopaemyh [Frothing agent for flotation of minerals]. Patent RF, no. 027616, 2014.
20. Deryagin B.V., Dukhin S.S., Rulov N.N. Kinetic theory of flotation of small particles. Uspekhi khimii [The successes of chemistry], 1982;51-1:92–118. (In Russ.)
21. Temkin O.N., Shestakov G.K., Treger Yu.A. Acetilen. Himiya. Mekhanizmy reakcij. Tekhnologiya [Acetylene. Chemistry. Mechanisms of reactions. Technology]. Moscow: Khimiia, 1991, 415 p. (In Russ.)
22. Glinka N.L. Obshchaya himiya: ucheb. posobie dlya vuzov [General chemistry: Textbook]. Moscow: Integral Press, 2003, 728 p. (In Russ.)
23. Davydov A.S. Kvantovaya mekhanika [Quantum mechanics]. Moscow: Nauka, 1973, 334 p. (In Russ.)
24. Bagotsky V.S. Osnovy elektrokhimii [Fundamentals of electrochemistry]. Moscow: Khimiia, 1988, 400 p. (In Russ.)
25. Deryagin B.V., Dukhin S.S., Rulov N.N. Mikroflotaciya: vodoочистка, obogashchenie [Microflotation: water treatment, enrichment]. Moscow: Khimiia, 1986, 112 p. (In Russ.)
26. Klassen V.I., Mokrousov V.A. Vvedenie v teoriyu flotacii [Introduction to the theory of flotation]. Moscow: Gosgortehizdat, 1959, 636 p. (In Russ.)

27. Glembotsky V.A., Klassen V.I. *Flotacionnye metody obogashcheniya* [Flotation methods of enrichment]. Moscow: Nedra, 1981, 304 p. (In Russ.)
28. Deryagin B.V., Churaev N.V., Muller V.M. *Poverhnostnye sily* [Surface forces]. Moscow: Nauka, 1985, 300 p. (In Russ.)
29. Nagaraj D.R., Farinato R.S. Evolution of flotation chemistry and chemicals: A century of innovations and the lingering challenges. *Minerals Engineering*. 2016;96-97:2-14.
30. Reichardt K. *Rastvoriteli i efekty sredy v organicheskoy khimii* [Solvents and environmental effects in organic chemistry]. Moscow: Mir, 1991, 763 p. (In Russ.)

Поступила 17.06.2024; принята к публикации 22.01.2025; опубликована 28.03.2025
Submitted 17/06/2024; revised 22/01/2025; published 28/03/2025

Петухов Василий Николаевич – профессор, доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: chief.petuhov2013@yandex.ru.

Свечникова Наталья Юрьевна – доцент, кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: natasha-svechnikova@yandex.ru. ORCID 0000-0001-9821-3183

Юдина Светлана Владимировна – старший преподаватель,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: yudinasv1478@mail.ru. ORCID 0000-0001-7505-9005

Волощук Татьяна Геннадьевна – доцент, кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: votagen@mail.ru

Щелкунов Сергей Анатольевич – кандидат химических наук, технический директор,
ООО «БиоХимПром», Москва, Россия.
Email: shelkunov66@mail.ru.

Малышев Олег Анатольевич – кандидат технических наук, генеральный директор,
ООО «БиоХимПром», Москва, Россия.
Email: moa_biohimprom@mail.ru. ORCID 0000-0001-8736-6897

Vasily N. Petukhov – Professor, DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: chief.petuhov2013@yandex.ru.

Natalia Yu. Svechnikova – Associate Professor, PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: natasha-svechnikova@yandex.ru. ORCID 0000-0001-9821-3183

Svetlana V. Yudina – Senior Lecturer,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: s.yudina.magtu@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7505-9005

Tatiana G. Voloshchuk – Associate Professor, PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: votagen@mail.ru.

Sergey A. Shchekunov – PhD (Eng.), Technical Director,
LLC BioChemProm, Moscow, Russia.
Email: shelkunov66@mail.ru.

Oleg A. Malyshev – PhD (Eng.), General Director,
LLC BioChemProm, Moscow, Russia.
Email: moa_biohimprom@mail.ru. ORCID 0000-0001-8736-6897



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.271.1:622.236.73

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-26-35

ОДИН ИЗ ПОДХОДОВ К КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ РУДНО-РОССЫПНОГО УЧАСТКА ПРИАМУРЬЯ

Хрунина Н.П.

Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия

Аннотация. Актуальность и цель исследования. Успешное развитие ядерной и термоядерной энергетики, электротехнической и электронной промышленности возможно только при условии поиска, анализа и освоения новых источников природного сырья. Таким перспективным источником могут стать забалансовые и техногенные золотоносные россыпные и рудные месторождения Дальневосточного региона, содержащие цирконий, титан, олово, вольфрам, серебро, теллур, лантан, церий, свинец, висмут, селен, марганец, иттрий, скандий, гадолиний, лютеций и др. Важным аспектом является разработка технических средств переработки с учетом минералогического и гранулометрического анализа техногенных пород. **Цель работы.** Обоснование гравитационной подготовки техногенных высокоглинистых пород рудно-россыпного узла с повышенным содержанием мелких и тонких частиц ценных компонентов посредством инновационных гидродинамических установок с учетом полученных экспериментальных данных минералогического, элементного, фазового и гранулометрического состава пород. **Результаты.** Осуществлен предварительный анализ высокоглинистой породы техногенных участков рудно-россыпного месторождения Приамурья. С помощью электронного микроскопа получены энергодисперсионные спектры, массовый и атомный состав части минералов. Методом атомно-эмиссионной спектроскопии установлено наличие содержания серебра, преобладание содержания элементов ванадия, марганца и др. В результате предварительной гравитационной обработки проб и плазмохимического воздействия выделены сферические образования оксидов железа FeO до 47%, меди, алюминия. Предложена технологическая схема переработки исследуемой глинистой породы с трудноразрушаемым минералом монтмориллонитом, включающая установку новой конструкции с гравитационным разделением минеральной массы в тонкослойных потоках после предварительного гидродинамического воздействия струей, взаимодействующей с кавитационными элементами. **Выводы.** Установлена перспективность развития исследований в области освоения забалансовых и техногенных золотоносных россыпных и рудных месторождений Дальневосточного региона. На основе предложенных инновационных технических средств обоснована гравитационная подготовка техногенных высокоглинистых пород с повышенным содержанием мелких и тонких частиц ценных компонентов для обеспечения эффективной плазмохимической, электролизной и сорбционной обработки.

Ключевые слова: техногенные высокоглинистые породы, механоактивация, тонкослойное разделение, плазмовыработка

© Хрунина Н.П., 2025

Для цитирования

Хрунина Н.П. Один из подходов к комплексной переработке техногенного сырья рудно-россыпного участка Приамурья // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 26-35. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-26-35>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ONE OF THE APPROACHES TO COMPLEX PROCESSING OF MAN-MADE ORE-PLACER RAW MATERIALS OF THE AMUR REGION

Khrunina N.P.

Mining Institute, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Successful development of nuclear and thermonuclear energy, electrical and electronic industries is possible only if new sources of natural raw materials are searched, analyzed and developed. Such a promising source can be off-balance and man-made gold-bearing placer and ore deposits of the Far Eastern region containing zirconium, titanium, tin, tungsten, silver, tellurium, lanthanum, cerium, lead, bismuth, selenium, manganese, yttrium, scandium, gadolinium, lutetium, etc. An important aspect is the development of technical means of processing, taking into account the mineralogical and granulometric analysis of man-made rocks. **Objective.** It is required to substantiate gravity preparation of man-made high-clay rocks of an ore-placer site with a high content of small and fine particles of valuable components by means of innovative hydrodynamic systems, taking into account the experimental data obtained on the mineralogical, elemental, phase and granulometric composition of rocks. **Results.** A preliminary analysis of the high-clay rock of the man-made sites of the Priamur ore-placer deposit has been carried out. Energy dispersion spectra, mass and atomic composition of some minerals were obtained using an electron microscope. The presence of silver content and the predominance of the vanadium, manganese elements and etc. have been established by atomic emission spectroscopy. As a result of preliminary gravity processing of samples and plasma chemical exposure, spherical formations of iron oxides (FeO up to 47%), copper and aluminum were extracted. A technological scheme for processing the clay rock under study with the intractable mineral montmorillonite is proposed, including the installation of a new unit with gravitational separation of the mineral mass in thin-layer streams after preliminary hydrodynamic action by a jet interacting with cavitation elements. **Conclusions.** The prospects for the research development in the field of the development of off-balance and man-made gold-bearing placer and ore deposits in the Far Eastern region have been established. Based on the proposed innovative technical means, the gravitational preparation of man-made high-clay rocks with a high content of small and fine particles of valuable components is justified to ensure effective plasma chemical, electrolysis and sorption treatment.

Keywords: man-made high-clay rocks, mechanical activation, thinly layered separation, plasma processing

For citation

Khrunina N.P. One of the Approaches to Complex Processing of Man-Made Ore-Placer Raw Materials of the Amur Region. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 26-35. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-26-35>

Введение

Освоение на территории Дальнего Востока России техногенных россыпеобразований и рудно-россыпных узлов с ресурсным потенциалом сотни тонн не только золота, но и платины, вольфрамит, шеелита, касситерита, магнетита, ильменита, циркона, рутила, монацита, ксенотима, тантало-ниобата, хромита, киновари, может быть обеспечено посредством развития специальных поисковых исследований с выделением ассоциаций полезных минералов и ареалов их концентраций для попутной или самостоятельной добычи [1–3]. Перспективным направлением является анализ возможных новых источников природного сырья и разработка технологий вовлечения в переработку нетрадиционного техногенного и забалансового сырья, являющегося источником ценных компонентов [3–7]. Продолжаются минералогические

исследования шлихов хвостов доводки и шлихов промприборов россыпных месторождений Хабаровского и Приморского краев, Амурской области. Выделено более 80 золотороссыпных месторождений, содержащих кроме золота – цирконий, титан, олово, вольфрам, серебро, редкие и редкоземельные элементы. При высоком содержании золота некоторые месторождения Приморского края содержат теллур, лантан, церий, высокое содержание олова, свинца, висмута, серебра, селена, марганца, иттрия, скандия, теллура, встречаются гадолиний, лютеций. В шлихах Амурской области отмечено высокое содержание магнетита, титаномагнетита, ильменита, сфена, граната, циркона [1].

Изучение и освоение комплексных россыпей Дальнего Востока становится актуальной задачей в связи с попутной добычей многих дефицитных металлов. В природных золотоносных россыпях Даль-

него Востока представлены ванадинит, содержащий V_2O_5 до 19,3% и более, монацит, содержащий редкоземельные металлы от 50 до 68% (Ce, La, ...) PO_4 , (Ce, La, Th, Ca) $[PO_4, SiO_4, SO_4]$, фергусонит (Y, Er, Ce...) $(Nb, Ta, Ti)O_4$, содержащий Y до 36,2%, Nb – до 37,7%, Ta – 7,5%, Y_2O_3 – 46%, ксенотим (YPO_4), содержащий Y_2O_3 – 63,1%, и торит ($ThSiO_4$, U_3O_8), содержащий в примесях Nb до 29,7% и Ta до 31,9%) [7]. Вследствие близости ионных радиусов ванадия, железа и титана ванадий не образует большого скопления собственных минералов, а его носителями являются многочисленные минералы титана (титаномагнетит, сфен, рутил, ильменит, галенит). Важнейшие ванадийсодержащие минералы – это патронит $V(S_2)_2$, ванадинит $Pb_5(VO_4)_3Cl$ и некоторые другие [8].

Во многих странах развитие данного направления осуществляется в огромных масштабах. Из комплексных россыпей в значительных количествах извлекаются концентраты минералов редкоземельных, танталониобиевых, вольфрамовых и ряда других редких элементов. Перспективными направлениями использования ванадия считаются ядерная и термо-ядерная энергетика, электротехника, производство электрохимических источников тока, полупроводниковых материалов. Соединения ванадия применяют как замедлитель нейтронов в ядерных реакторах [9, 10]. Церий и лантан добываются и перерабатываются промышленным способом из бастнезита, монацита и ксенотима. Из ксенотима извлекается иттрий. Из глинистых минералов в Китае посредством ионной адсорбции извлекаются тяжелые редкоземельные элементы тербий и диспрозий [11].

Развитие и дальнейшая модернизация стратегических высокотехнологичных отраслей России – авиастроение, космическая и атомная промышленность, радиоэлектроника и зеленая энергетика – потребует расширения минерально-сырьевой базы для обеспечения стратегическими металлами. Отмечается расширение востребованности таких металлов, как Re, Be, Nb, Ta, Ti, In, Zr, Hf, Li, Cd и Ga, редкоземельных элементов [12]. Подчеркивается, что инновационная деятельность является одним из основных направлений развития минерально-сырьевой базы, важным фактором которого является разработка и применение современных прорывных технологий комплексной переработки минерального сырья. Расширение возможных новых источников природного сырья и разработка технологий вовлечения в переработку нетрадиционного техногенного и забалансового сырья в настоящее время является актуальной задачей. При этом получение высококачественной продукции возможно только при минимизации ущерба окружающей среде [13–15].

Освоение техногенных высокоглинистых месторождений южной части Хабаровского края требует поиска и создания более эффективных технологий на основе совершенствования процессов микродезинтеграции с выделением ценных компонентов гравита-

ционными методами [16–18] для последующего извлечения сорбцией или восстановлением в процессе термической обработки [19, 20]. Развитие исследований по изучению активизации гидродинамической микродезинтеграции и разделению полиминеральной составляющей в гидросмесях идет с расширением внедрения данного направления в производство. Имеют место установки с использованием различных способов воздействия на перерабатываемый материал импульсной энергии физического типа [21, 22]. Известны способы для первичной переработки глинистого материала с использованием теплоносителей и вибровозбудителей – импульсных генераторов переменного тока и соленоидов – в процессе гравитационного разделения на фракции [23]. Данные установки обладают низкой надежностью, износостойкостью и эффективностью.

Рассматриваются аппараты автономного комплекса с безопасными стандартами обогащения для извлечения свободного золота, апробированы высокоэффективные опытные образцы горно-обогатительного оборудования [24]. Для интенсификации вскрытия концентратов определена возможность энергетического воздействия и селективной дезинтеграции. Интересные исследования и актуальные результаты получены обработкой микроэлементов потоком ускоренных электронов, которые интенсифицируют процесс новообразования сплавов изометричных и игольчатых индивидов субмикронного размера, и СВЧ-плазмой [25–28]. Установлено, что механоактивация концентрата приводит к увеличению извлечения редкоземельных элементов и циркония на 35,0–44,9% [29, 30]. Переработка техногенного сырья посредством активационной микродезинтеграции является актуальной научно-технической проблемой, решение которой позволит расширить минерально-сырьевую базу месторождений, снизить удельную себестоимость переработки.

Целью исследования является обоснование гравитационной подготовки техногенных высокоглинистых пород рудно-россыпного узла с повышенным содержанием мелких и тонких частиц ценных компонентов посредством гидродинамических установок нового типа с учетом полученных экспериментальных данных элементного, фазового и гранулометрического состава пород.

Результаты исследования

Сотрудниками лаборатории геомеханики и лаборатории разработки россыпных месторождений ИГД ДВО РАН проведены исследования проб техногенного участка 2U месторождения в районе поселка Удинск. Осуществлялось изучение элементного, фазового и гранулометрического состава пород для обоснования рекомендаций по разработке участка. На **рис. 1** представлено изображение исследуемой пробы в исходном состоянии.

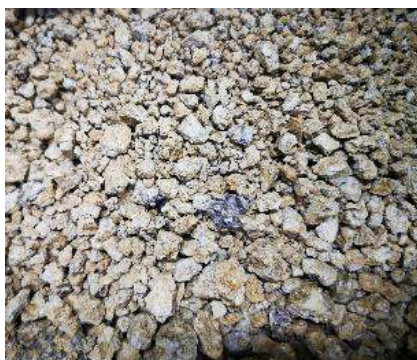


Рис. 1. Изображение исследуемой пробы техногенного участка

Fig. 1. Image of the test sample of a man-made site

Определение гранулометрического состава грунта выполняли по ГОСТ 12536-2014. Отобранная проба глинистого грунта высушивалась в сушильном шкафу и просеивалась сквозь сито с размером отверстий 1 мм. Из просеянной пробы методом квартования отобраны навески массой 30 г. Определено преимущественное содержание мелких, тонких частиц ценных компонентов и в смесях размером частиц менее 0,1 мм. Пробы месторождения имеют число пластичности от 0,096 (9,6%) до 0,146 (14,6%) и относятся к тяжелым суглинкам. Электронно-микроскопическими исследованиями установлено

наличие основного глинистого минерала – монтмориллонита. Монтмориллонит относится к трудноразрушаемым минералам. На рис. 2 представлено изображение минеральных частиц с электронного микроскопа во вторичных электронах, энергодисперсионные спектры, массовый и атомный состав части минералов исследуемой пробы техногенного участка.

По результатам спектрального анализа методом атомно-эмиссионной спектроскопии на установке «Гранд» установлено наличие содержания серебра Ag, преобладание содержания элементов P(130), V(100), Mn(80) со средним содержанием в исходной пробе (г/т), в том числе – Cr(30), Li(25), Ni(18), Pb(13), W, Zn(13), Cu(25), Sn(10), Co(4), Bi, молибдена Mo(0,6), сурьмы Sb(40), мышьяка As(10) (см. таблицу).

Интерес для извлечения по результатам спектрального анализа представляют ванадий, марганец, хром и литий. Для предварительной гравитационной переработки техногенных пород с повышенным содержанием глинистой составляющей необходимо создание условий перехода их в фазу обогащения посредством интенсивного гравитационного воздействия и разделения фракций в тонкослойных потоках. Решение поставленной задачи возможно посредством установки гравитационного типа новой конструкции, осуществляющей процесс не только разделения, но и предварительной механоактивации до микроуровня.

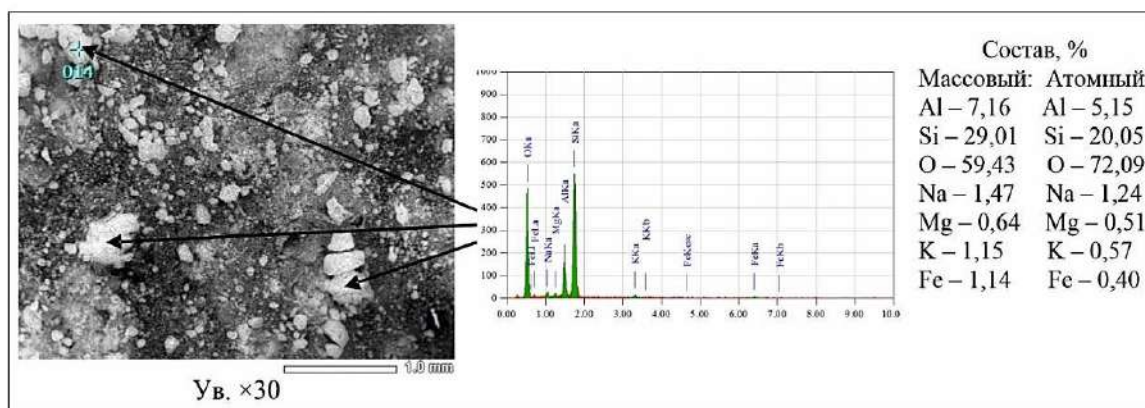


Рис. 2. Изображение исследуемой пробы техногенного участка во вторичных электронах, энергодисперсионные спектры, массовый и атомный состав минералов

Fig. 2. Image of the test sample of a man-made site in secondary electrons, energy dispersion spectra, mass and atomic composition of minerals

Таблица. Результаты спектрального анализа проб техногенного участка

Table. Results of spectral analysis of man-made site samples

Элемент	Ag	As	Cu	Bi	Co	Cr	Li	Mn	Mo	Ni	P	Pb	Sb	Sn	V	W	Zn
Предел обнаружения, г/т	0,03	10	1	1	1	10	10	10	0,1	10	100	1	10	1	1	10	10
Проба 1/2U	0,04	10	25	<1	4	30	25	80	0,6	18	130	13	40	10	100	<10	13

На **рис. 3** представлен общий вид технологической схемы переработки техногенных высокоглинистых песков, содержащих ценные компоненты, посредством разработанных автором установок. Комплекс технологических средств снабжен установкой для извлечения ценных минералов в тонкослойных потоках (Заявка на изобретение РФ № 2024107355 от 18.03.2024г.) и гидродинамическими дезинтеграторами, осуществляющими в условиях низких энергозатрат гравитационную микродезинтеграцию кавитационными элементами (**рис. 4**) [31, 32]. Интенсификация процесса переработки техногенных глинистых пород обеспечивается комбинацией активных гидродинамических воздействий и мягкой активизацией гидродинамических эффектов в условиях тонкослойного разделения на фракции в новой установке. После размыва и классификации гидросмесь с фракциями минеральных компонентов $-0,5$ мм перед подачей в центробежный концентратор подвергается микродезинтеграции. Гидросмесь с частицами размером $+0,5$ мм поступает в дезинтегратор с тонкослойным разделением, на входе которого посредством активных гидродинамических воздействий осуществляется первичное разрушение микросвязей минеральных

частиц под действием энергии давления струи, изменения скоростного режима и кавитации (см. **рис. 4**).

Скорость потока гидросмеси V определяется в зависимости от ее объемного расхода Q и диаметра выходного сечения сопла d по формуле

$$V = \frac{4Q}{3,14d^2}. \quad (1)$$

Изменение термодинамического потенциала системы dE зависит от конструктивных особенностей установки и коэффициента полезного действия η , энергии давления струи W , Н/м^2 , турбулентности d_m , образующейся в результате взаимодействия потока с поверхностью, и изменения времени воздействия подводимой энергии dt [31]:

$$dE = \eta W d_m dt. \quad (2)$$

Гидросмесь разделяется на два потока и по наклонным направляющим 1 поступает в секции 2, 3 наклонных желобов дезинтегратора для разделения на фракции посредством гидродинамических эффектов в процессе тонкослойного разделения (см. **рис. 4**).



Рис. 3. Технологическая схема переработки техногенных высокоглинистых песков

Fig. 3. Technological scheme for the processing man-made high-clay sands

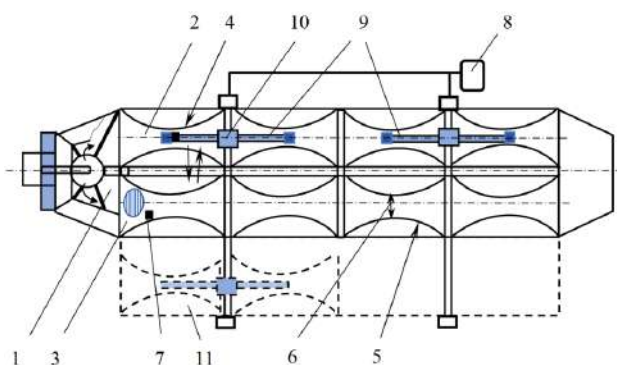


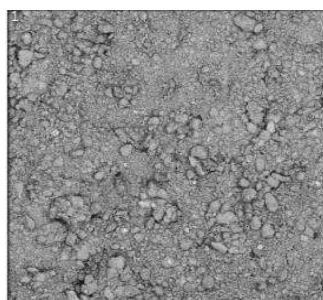
Рис. 4. Гидродинамический дезинтегратор
Fig. 4. Hydrodynamic disintegrator

Наклонные желоба снабжены дугообразными стенками 4, 5, которые формируют сужение пространства при перемещении тонкослойного потока, способствующее усилению активизации расслоения, образованного зазором 6. Происходит дополнительное разрушение связей мелких глинистых частиц с минеральными компонентами посредством периодического волнообразного и стесненного продвижения потока гидросмеси и осаждение более тяжелых частиц. Накопление тяжелой фракции в съемных уловителях фиксируется датчиками 7 автоматической системы управления 8. Подается команда на разгрузку, и штанги 9 механизма подъема 10 позиционируются над секциями гидродинамической активизации. Посредством срабатывания захватов с элементами крепления осуществляется перемещение съемных уловителей мелких фракций ценного компонента в зону разгрузки 11. Съемные уловители могут быть выполнены из полиуретана, композитного материала или стеклопластика с элементами шероховатости

различной конфигурации в зависимости от крупности частиц в гидросмеси. Выделенные хвосты поступают в центробежный концентратор. После концентратора хвосты поступают на электролиз и дополнительную обработку разрядом СВЧ с последующей селективной сорбцией серебра Ag, ванадия V, марганца Mn и других ценных компонентов.

В лаборатории физико-химических основ технологии материалов ИМ ХФИЦ ДВО РАН были проведены исследования по обработке проб исследуемой техногенной высокоглинистой породы, участок – 3У, посредством СВЧ-плазмы на опытной установке. Проба предварительно подвергалась микродезинтеграции. Удельная мощность потока СВЧ-излучения достигала 10^4 – 10^5 Вт/см², частота электромагнитного поля составляла 2,44 ГГц, температура на выходе из сопла составляла 9-10 тыс. К. После плазмохимического синтеза многокомпонентной глинистой породы посредством сканирующего электронного микроскопа «VEGA 3 LMN», а также на рентгеновском дифрактометре «MiniFlex II Rigaku» с трубкой из Cu, мощность 0,45 кВт, минимальный шаг $2\theta = 0,01^\circ$, получены данные фазового и элементного анализа образцов. Результаты сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) перед и после обработки СВЧ представлены на рис. 5, 6.

На снимке изображения структур после обработки СВЧ выделяются сферические образования оксидов железа FeO до 47,10%, меди и алюминия. Полученные данные подтвердили возможность развития исследований с использованием данной технологии для техногенного сырья и необходимость совершенствования конструктивных параметров плазмохимических установок.



Элемент	Вес. %	Сигма Вес. %	Атом. %	Оксид	Вес. % оксида	Сигма вес. % оксида
O	47.81		63.28			
Na	0.78	0.04	0.72	Na ₂ O	1.05	0.05
Mg	0.59	0.03	0.51	MgO	0.97	0.05
Al	10.72	0.07	8.41	Al ₂ O ₃	20.26	0.13
Si	0.47	0 10	22.97	SiO ₂	65.19	0.22
K	2.10	0.04	1.14	K ₂ O	2.53	0.05
Ca	0.41	0.03	0 22	CaO	0.58	0.0
Ti	0.71	0.04	0.31	TiO ₂	1.18	0.07
Fe	6.41	0.09	2.43	FeO	8.25	0.12

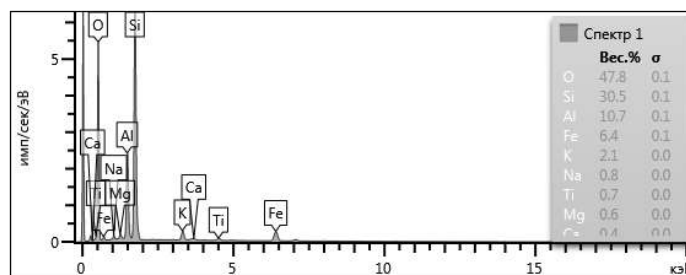
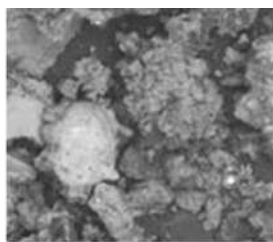


Рис. 5. СЭМ-изображение структур и спектрограмма пробы глины перед синтезом
Fig. 5. SEM image of structures and spectrogram of clay sample before synthesis



Элемент	Вес.%	Сигма Вес. %	Атом. %	Оксид	Вес.% оксида	Сигма вес. % оксида
O	31.30		56.16			
Al	11.20	0.20	11.92	Al ₂ O ₃	21.17	0.37
Si	6.19	0.14	6.32	SiO ₂	13.24	0.29
K	0.31	0.04	0.23	K ₂ O	0.38	0.05
Ti	0.26	0.05	0.16	TiO ₂	0.43	0.09
Fe	36.61	0.38	18.82	FeO	47.10	0.49
Cu	14.13	0.45	6.38	CuO	17.68	0.56

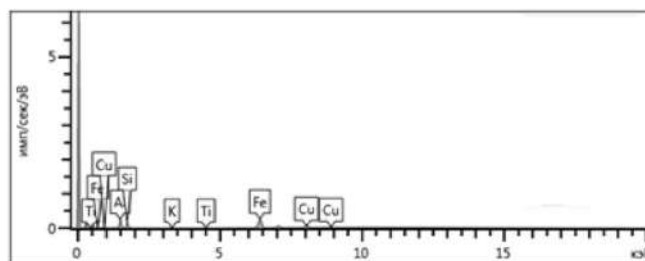


Рис. 6. СЭМ-изображение структур и спектрограмма пробы глины после синтеза
Fig. 6. SEM image of structures and spectrogram of clay sample after synthesis

Возможна комбинация извлечения благородных металлов из растворов и пульп с использованием специального реактора путем обжига и выщелачивания. При этом выщелачивание будет обеспечено снижением расхода растворов за счет существенной микродезинтеграции минерального сырья и активации.

По предварительным оценкам предлагаемая система переработки с активацией микродезинтеграции техногенного сырья с трудно разрушаемыми глинистыми составляющими, структурно связанными с микрочастицами ценных компонентов, повысит качественные характеристики извлечения посредством последующего электролиза, селективной сорбции или цианирования. Дальнейшие исследования в данном направлении будут способствовать развитию промышленного освоения техногенных и забалансовых месторождений региона.

Заключение

1. Проанализирована перспективность развития исследований в области освоения забалансовых и техногенных золотороссыпных и рудных месторождений Дальневосточного региона, содержащих кроме золота – цирконий, титан, олово, вольфрам, серебро, редкие и редкоземельные элементы. Некоторые месторождения содержат теллур, лантан, церий, высокое содержание свинца, висмута, селена, марганца, иттрия, скандия, гадолиния, лютеция, магнетита, титаномагнетита, ильменита, сфена, граната, циркона и др. Проведены исследования образцов высокоглинистой породы техногенных участков рудно-россыпного месторождения в районе поселка Удинск.

2. С помощью энергодисперсионного анализа и атомно-эмиссионной спектроскопии установлено наличие содержания серебра Ag, преобладание содержания элементов (г/т) ванадия V(100), марганца Mn(80), а также Cr, Li, Ni, Pb, W, Zn, Cu, Sn, Co, Bi, Mo, Sb.

3. Предпринята попытка обосновать применение технологической схемы переработки исследуемой гли-

нистой породы с трудноразрушаемым минералом монтмориллонитом, включающая установку новой конструкции с гравитационным разделением минеральной массы в тонкослойных потоках после предварительного гидродинамического воздействия струей, взаимодействующей с кавитационными элементами.

4. В результате обработки проб в дуговой плазменной установке, производимой после механоактивации, выделены сферические образования оксидов железа, меди, титана, алюминия с содержанием оксида железа FeO до 47,10%.

5. После гидродинамического и кавитационного воздействия изменяется термодинамический потенциал минеральных частиц, активизируется реакционная способность при электролизной и плазмохимической обработках, повышается уровень селективной сорбции.

6. Необходимо расширение дальнейших исследований по изучению характеристик техногенного, забалансового сырья и совершенствованию процессов переработки.

Список источников

1. Ван-Ван-Е А.П. Ресурсная база природно-техногенных золотороссыпных месторождений. М.: Изд-во «Горная книга», Изд-во Моск. гос. горного ун-та, 2010. 268 с. ISBN 978-5-98672-222-1.
2. Дистанционное зондирование Земли в рамках исследований по оценке объема техногенного сырья и экологической ситуации при разработке россыпей / Литвинцев В.С., Усиков В.И., Озарян Ю.А., Алексеев В.С. // Георесурсы. 2021. Т. 23(4). С. 116-123. DOI: 10.18599/grs.2021.4.13
3. Multiscale recycling rare earth elements from real waste trichromatic phosphors containing glass / Hu Liu, Shiyin Li, Bo Wang, Kun Wang, Ruize Wu, Christian Ekberg, Alex A. Volinsky // Journal of Cleaner Production. 2019, vol. 238, article 117998. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117998

4. Александрова Т.Н., Афанасова А.В., Александров А.В. Применение микроволновой обработки для снижения степени упорности углеродистых концентратов // ФТПРПИ. 2020. Т. 56. С. 148-154. DOI: 10.15372/ftprpi20200116
5. Increase in recovery efficiency of iron-containing components from ash and slag material (coal combustion waste) by magnetic separation / Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Chenlong D., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. // Minerals. 2024, vol. 14, no. 2, pp. 136. DOI: 10.3390/min14020136
6. Фундаментальные проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности и энергетики России / Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Лаломов А.В., Мурашов К.Ю. // Геология рудных месторождений. 2022. Т. 64(6). С. 617-633. DOI: 10.31857/S0016777022060028
7. Хрунина Н.П., Стратечук О.В. Новые аспекты научных и технологических основ направленного изменения состояния и физико-механических свойств песчано-глинистых пород золотосодержащих россыпей. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2007. 138 с. ISBN 978-5-7389-0555-1
8. Чурилов А.Е., Мукаев Е.Г., Горбунова А.В. Ванадий-содержащие ресурсы и химические способы их переработки // Теория и технология металлургического производства. 2017. №3(22). С. 30-33.
9. Kear G., Shah A.A., Walsh F.C. Development of the all-vanadium redox flow battery for energy storage: a review of technological, financial and policy aspects // International Journal of Energy Research. 2012, vol. 36, no. 11, pp. 1105–1120. DOI: 10.1002/er.1863
10. Чижевский В.Б., Шавакулева О.П., Гмызина Н.В. Обогащение титаномагнетитовых руд Южного Урала // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 2. С.5 – 7.
11. URL: <https://www.ftmmachinery.com/blog/how-to-process-rare-earth-elements.html>
12. Чантурия В.А., Николаев А.И., Александрова Т.Н. Инновационные экологически безопасные процессы извлечения редких и редкоземельных элементов из комплексных руд сложного вещественного состава // Геология рудных месторождений. 2023. № 65. С. 425-437. DOI: 10.1134/S1075701523050045
13. Xiong C., Chen X. and Liu X. Synthesis, characterization and application of ethylenediamine functionalized chelating resin for copper preconcentration in tea samples // Chem. Eng. J. 2012, vol. 203, pp. 115–122.
14. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами / Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95-111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100
15. Opare E.O., Struhs E. and Mirkouei A. A comparative state-of-technology review and future directions for rare earth element separation // Renewable Sustainable Energy Rev. 2021, vol. 143, no. 110917. DOI: 10.1016/J.RSER.2021.110917
16. Khrunina N.P., Cheban A.Yu. Substantiation of the hydrodynamic disintegration of hydraulic fluid's mineral component of high-clay sand in precious metals placers // Georesources. 2018, vol. 20, no. 1, pp. 51-56. DOI: 10.18599/grs.2018.1.51-56
17. Khrunina N.P., Korneeva S.I. Improving mining methods of high-clay deposits of precious metals // Eurasian Mining. 2014. № 1. С. 15-17.
18. Хрунина Н.П. Совершенствование комплекса средств для переработки высокоглинистых золотосодержащих россыпей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19. №2. С. 14–22. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-14-22.
19. Direct evidence for ferromagnetic spin polarization in gold nanoparticles / Yamamoto Y., Miura T., Suzuki M., Kawamura N., Miyagawa H., Nakamura T., Kobayashi K., Teranishi T., Hori H. // Physical Review Letters. 2014, vol. 93, no. 11, 116801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.116801.
20. Дас Н., Девлина Д. Извлечение редкоземельных металлов методом биосорбции: обзор // Редкие земли. 2013. Т. 31. № 10. С. 933-943.
21. Чантурия В.А., Бунин И.З. Достижения в области технологий переработки полезных ископаемых с использованием импульсной энергии // Минералы. 2022. Т. 12. № 9. С. 1177.
22. Gueroult R., Rax J-M., Fisch N.J. Opportunities for plasma separation techniques in rare earth elements recycling // J. Clean Prod. 2018, vol. 182, pp. 1060–1069. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.066
23. Пат. 2262385 РФ. Шлюз для осаждения концентратов тяжелых минералов из пульпы и улавливающий коврик для него / В.Т. Кардаш, А.Э. Чертилин; опубл. 20.10.2005. Бюл. №29.
24. Научно-экспериментальные основы сухого обогащения руд полезных ископаемых / Матвеев А.И., Лебедев И.Ф., Винокуров В.Р., Львов Е.С. // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 613-622. DOI: 10.31897/PMI.2022.90.
25. Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals / Jha M.K., Kumari A., Panda R. et al. // Hydrometallurgy. 2016, vol. 165, part 1, pp. 2-26. DOI: 10.1016/j.hydromet.2016.01.003.
26. Ростовцев В.И. Разработка технологических схем и рекомендаций по переработке бокситов с повышенным содержанием железа и тонких частиц ценных компонентов // ФТПРПИ. 2023. № 6. С. 130-141. DOI: 10.15372/FTPRPI120230612/
27. Balakhonov D.I., Nikolenko S.V. Tungsten Borides Prepared from Tungsten-Containing Concentrate via Exposure to Microwave Plasma // Inorganic Materials. 2023, vol. 59, no. 6, pp. 576-582. DOI: 10.1134/s0020168523060031.
28. Пат. 2264869 РФ. Способ направленного изменения свойств горной породы посредством СВЧ-термомеханического, ультразвукового и гравитационно-аэродинамического воздействий / Н.П. Хрунина, Ю.А. Мамаев, А.В. Жуков, О.В. Стратечук; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН; опубл. 27.11.2005. Бюл. № 33.
29. Чантурия В.А. Научное обоснование и разработка инновационных процессов извлечения циркона и

- РЗЭ при глубокой и комплексной переработке эвдиалитового концентрата // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 505-516. DOI: 10.31897/PMI.2022.31
30. Александрова Т.Н. Комплексная и глубокая переработка минерального сырья природного и техногенного происхождения: состояние и перспективы // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 503-504.
 31. Хрунина Н.П. Совершенствование конструкции аппарата для микродезинтеграции минеральных компонентов в гидросмесьях // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 5-14. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-5-14
 32. Хрунина Н.П. Моделирование гидродинамических эффектов при микродезинтеграции высокоглинистых минеральных компонентов в гидросмесьях // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 26-34. DOI:10.18503/1995-2732-2022-20-3-26-34
- ### References
1. Van-Van-E A.P. *Resursnaya baza prirodno-tekhnogennykh zolotorossyynykh mestorozhdeniy* [Resource base of natural and technogenic gold placer deposits]. Moscow: Gornaya kniga publishing house, Moscow state mining university publ., 2010, 268 p. (In Russ.) ISBN 978-5-98672-222-1.
 2. Litvintsev V.S., Usikov V.I., Ozaryan Yu.A., Alekseev V.S. Remote sensing of the Earth within the framework of research on the assessment of the volume of technogenic raw materials and the ecological situation in the development of placers. *Georesursy* [Georesources], 2021;23(4):116-123. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.13>
 3. Hu Liu, Alex A. Volinsky, et al. Multiscale recycling rare earth elements from real waste trichromatic phosphors containing glass. *Journal of Cleaner Production*. 2019;238(117998). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117998>
 4. Aleksandrova T.N., Afanasova A.V., Aleksandrov A.V. The use of microwave treatment to reduce the degree of refractoriness of carbon concentrates. *FTPRPI* [Journal of Mining Science], 2020;56:148-154. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/ftprpi20200116>
 5. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Chenlong D., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. Increase in recovery efficiency of iron-containing components from ash and slag material (coal combustion waste) by magnetic separation. *Minerals*. 2024;14(2):136. <https://doi.org/10.3390/min14020136>
 6. Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L., Vikentyev I.V., Lalomov A.V., Murashov K.Y. Fundamental problems of the development of the mineral resource base of high-tech industry and energy in Russia. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of Ore Deposits], 2022;64(6):313-328. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0016777022060028>
 7. Khrunina N.P., Stratechuk O.V. Novye aspekty nauchnykh i tekhnologicheskikh osnov napravlenno go izmeneniya sostoyaniya i fiziko-mekhanicheskikh svoystv peschano-glinistykh porod zolotosoderzhashchih rossypey [New aspects of scientific and technological foundations of directed changes in the state and physical and mechanical properties of sandy-clay rocks of gold-containing placers]. Khabarovsk: Pacific National University Publishing House, 2007, 138 p. ISBN 978-5-7389-0555-1 (In Russ.)
 8. Churilov A.E., Mukaev E.G., Gorbunova A.V. Vanadium-containing resources and chemical methods of their processing. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and Technology of Metallurgical Production], 2017;3(22):30-33. (In Russ.)
 9. Kear G., Shah A.A., Walsh F.C. Development of the all-vanadium redox flow battery for energy storage: a review of technological, financial and policy aspects. *International Journal of Energy Research*. 2012;36(11):1105-1120. <https://doi.org/10.1002/er.1863>
 10. Chizhevsky V.B., Shavakuleva O.P., Gmyzina N.V. Enrichment of titanomagnetite ores of the Southern Urals. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012;(2):5- 7. (In Russ.)
 11. Electronic resource. Available at: <https://www.ftmmachinery.com/blog/how-to-process-rare-earth-elements.html>
 12. Chanturia V.A., Nikolaev A.I., Aleksandrova T.N. Innovative ecologically safe processes for extracting rare and rare earth elements from ores of complex material composition. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of ore deposits], 2023;(65):425-437. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1075701523050045>
 13. Xiong C., Chen X., and Liu X., Synthesis, characterization and application of ethylenediamine functionalized chelating resin for copper preconcentration in tea samples. *Chem. Eng. J*. 2012;203:115-122.
 14. Litvinenko V.S., Petrov E.I., Vasilevskaya D.V., Yakovenko A.V., Naumov I.A., Ratnikov M.A. Assessment of the state role in the management of mineral resources. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2023;259:95-111. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>
 15. Opere E.O., Struhs E., and Mirkouei A., A comparative state-of-technology review and future directions for rare earth element separation. *Renewable Sustainable Energy Rev*. 2021;143(110917). <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.110917>
 16. Khrunina N.P., Cheban A.Yu. Substantiation of the hydrodynamic disintegration of hydraulic fluid's mineral component of high-clay sand in precious metals placers. *Georesources*. 2018;20(1):51-56. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.1.51-56>
 17. Khrunina N.P., Korneeva S.I. Improving mining methods of high-clay deposits of precious metals. *Eurasian Mining*. 2014;(1):15-17.
 18. Khrunina N.P. Improvement of the complex of means for the processing of high-clay gold-bearing sands of placers. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University],

- 2021;19(2):14-22. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-14-22>.
19. Yamamoto Y., Miura T., Suzuki M., Kawamura N., Miyagawa H., Nakamura T., Kobayashi K., Teranishi T., Hori H.. Direct evidence for ferromagnetic spin polarization in gold nanoparticles. *Physical Review Letters*. 2014;93(11):116801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.116801>.
 20. Nilanjana Das, Devlina Das. Extraction of rare earth metals through biosorption: An overview. *Redkie zemli* [Journal of Rare Earths], 2013;31(10):933-943
 21. Chanturia V.A., Bunin I.Z. Achievements in the field of mineral processing technologies using pulsed energy. *Mineraly* [Minerals], 2022;12(9):1177. (In Russ.)
 22. Gueroult R., Rax J.-M., Fisch N.J. Opportunities for plasma separation techniques in rare earth elements recycling. *J. Clean Prod.* 2018;182:1060–1069. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.066>
 23. Kardash V.T., Chertilin A.E. *Shlyuz dlya osazhdeniya koncentratov tyazhelykh mineralov iz pulpy iulavlivayushchiy kovrik dlya nego* [Sluice for precipitation of heavy mineral concentrates from pulp and catching carpet for it]. Patent RF, no. 2262385, 2005.
 24. Matveev A. I., Lebedev I. F., Vinokurov V. R., Lvov E. S. Scientific and experimental bases of dry enrichment of mineral ores. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2022;256:613-622. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.90>.
 25. Jha M.K., Kumari A., Panda R. et al. Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals. *Hydrometallurgy*. 2016;165(1):2-26. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.01.003>.
 26. Rostovtsev V.I. Development of technological schemes and recommendations for the processing of bauxite with a high content of iron and fine particles of valuable components. *FTPRPI* [Journal of Mining Science], 2023;6:130-141. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRPI120230612/>
 27. Balakhonov D.I., Nikolenko S.V. Tungsten borides prepared from tungsten-containing concentrate via exposure to microwave plasma. *Inorganic Materials*. 2023;59(6):576-582. <https://doi.org/10.1134/s0020168523060031>.
 28. Khrunina N.P., Mamaev Yu.A., Zhukov A.V., Stratechuk O.V. Sposob napravlennoy izmeneniya svoystv gornoj porody posredstvom SVCH-termomekhanicheskogo, ultrazvukovogo i gravitacionno-aerodinamicheskogo vozdeystviy [Method of directed change of rock properties by microwave thermomechanical, ultrasonic and gravitational aerodynamic effects]. Patent RF, no. 2264869, 2005.
 29. Chanturia V.A. Scientific substantiation and development of innovative processes for the extraction of zircon and REE in deep and complex processing of eudialyte concentrate. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2022;256:505-516. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.31>
 30. Aleksandrova T.N. Complex and deep processing of mineral raw materials of natural and man-made origin: state and prospects. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2022;256:503-504. (In Russ.)
 31. Khrunina N.P. Improvement of the design of the apparatus for microdisintegration of mineral components in hydromixtures. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2023;21(3):5-14. (In Russ.) doi: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-5-14
 32. Khrunina N.P. Modeling of hydrodynamic effects in microdisintegration of high-clay mineral components in hydromixtures. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2022;20(3):26-34. (In Russ.) doi:10.18503/1995-2732-2022-20-3-26-34

Поступила 21.06.2024; принята к публикации 12.12.2024; опубликована 28.03.2025
Submitted 21/06/2024; revised 12/12/2024; published 28/03/2025

Хрунина Наталья Петровна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник,
Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра
Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия.
Email: npetx@mail.ru. ORCID 0000-0001-8117-0922

Natalia P. Khrunina – PhD (Eng.), Lead Researcher,
Mining Institute, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia.
Email: npetx@mail.ru. ORCID 0000-0001-8117-0922

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ
METAL FORMING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.771.07: 621.787.6

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-36-43

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАПАЗОНА КОЛЕБАНИЙ ПАРАМЕТРОВ
МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛОСЫ ПРИ ДРЕССИРОВКЕ
ЕЕ В ШЕРОХОВАТЫХ ВАЛКАХ ДРЕССИРОВОЧНОГО СТАНА

Звягина Е.Ю., Огарков Н.Н., Терентьев Д.В., Румянцев М.И.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Предложен теоретический метод определения диапазона колебания параметров микрогеометрии поверхности холоднокатаной полосы при дрессировке ее в шероховатых валках с учетом возмущающего действия элементов оборудования дрессировочного стана и разнотолщинности подката. Получены количественные данные по влиянию нестабильности натяжения дрессируемой полосы, биению опорных валков и изменению состояния шероховатых поверхностей валка и подката на диапазон колебания коэффициента репродукции параметра $R_{ав}$ поверхности валка на полосу и параметра $R_{ап}$ поверхности продрессированной полосы. На примере наиболее востребованного проката шириной 1500-2000 мм и толщиной 0,65-0,9 мм с допускаемыми отклонениями от $\pm 0,07$ до $\pm 0,11$ мм в зависимости от группы его точности по ГОСТ 19904-90 показано, что колебание параметра R_a продрессированной полосы только по разнотолщинности составляет от 3,4% для высокой точности проката до 5,6% для нормальной точности. С учетом влияния всех возмущающих факторов на процесс дрессировки диапазон колебаний параметра R_a шероховатой поверхности полосы может достигать значений 10,2 и 13,8% в зависимости от уровня действия возмущающих факторов, если не используются системы автоматического регулирования толщины полосы (САРТ). Полученные результаты могут быть использованы специалистами прокатного производства для корректировки состояния оборудования дрессировочного стана и условий его эксплуатации с целью удовлетворения потребителей холоднокатаного листа дрессированной полосы по показателям диапазона колебания параметра R_a .

Ключевые слова: колебание параметров шероховатости, холоднокатаная полоса, дрессировка

© Звягина Е.Ю., Огарков Н.Н., Терентьев Д.В., Румянцев М.И., 2025

Для цитирования

Определение диапазона колебаний параметров микрогеометрии поверхности полосы при дрессировке ее в шероховатых валках дрессировочного стана / Е.Ю. Звягина, Н.Н. Огарков, Д.В. Терентьев, М.И. Румянцев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 36-43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-36-43>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

DETERMINING THE FLUCTUATION RANGE IN THE MICROGEOMETRY PARAMETERS OF THE STRIP SURFACE DURING TEMPER ROLLING IN ROUGH ROLLS OF THE TEMPER MILL

Zvyagina E.Yu., Ogarkov N.N., Terentyev D.V., Rumyantsev M.I.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russi

Abstract. A theoretical method is proposed for determining the fluctuations range in the parameters of the microgeometry of the cold-rolled strip surface during its tempering in rough rolls, taking into account the disturbing effect of the temper mill equipment elements and the thickness of semi-finished rolled stock. Quantitative data were obtained on the effect of tension instability of the tempered strip, run-out of the support rolls and changes in the state of the rough surfaces of the roll and semi-finished rolled stock on the range of fluctuations in the reproduction coefficient of the parameter R_{av} of the roll surface on the strip and the parameter R_{ap} of the surface of the tempered strip. Using the example of the most popular rolled products with a width of 1500-2000 mm and a thickness of 0.65-0.9 mm with acceptable deviations from ± 0.07 to ± 0.11 mm, depending on the accuracy group according to GOST 19904-90, it is shown that the variation in the R_a parameter of the tempered strip only in thickness ranges from 3.4% for high accuracy to 5.6% for normal accuracy. Taking into account the influence of all disturbing effects on the tempering process, the range of fluctuations in the R_a parameter of the rough surface of the strip can reach values of 10.2 and 13.8%, depending on the level of disturbing effects, if automatic strip thickness control systems are not used. The results obtained can be used by rolling mill specialists to adjust the condition of the temper mill equipment and its operating conditions in order to satisfy consumers of cold-rolled sheet of tempered strip in terms of the fluctuations range of the parameter R_a .

Keywords: fluctuation of roughness parameters, cold-rolled strip, tempering

For citation

Zvyagina E.Yu., Ogarkov N.N., Terentyev D.V., Rumyantsev M.I. Determining the Fluctuation Range in the Microgeometry Parameters of the Strip Surface During Temper Rolling in Rough Rolls of the Temper Mill. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 36-43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-36-43>

Введение

Потребители холоднокатаной тонкой листовой стали постоянно повышают требования к ее качеству, что связано с намерениями получать больший экономический эффект на последующих ее переделах. Одним из показателей качества холоднокатаной листовой стали является соответствие параметров микрогеометрии ее поверхности регламентируемым значениям ГОСТ и ТУ. При этом довольно жесткие требования предъявляются к обеспечению минимума колебаний этих параметров как по длине, так и по ширине холоднокатаной полосы.

Основным способом окончательного формирования микрогеометрии поверхности холоднокатаной полосы является дрессировка отожженной без покрытия или оцинкованной полосы в шероховатых валках дрессировочного стана с репродукцией в той или иной степени параметров микрогеометрии поверхности рабочего вала на поверхность дрессируемой полосы. Степень репродукции характеризуется коэффициентом, определяемым отношением усредненного параметра микрогеометрии поверхности дрессируемой полосы $R_{ап}$ к усредненному параметру микрогеометрии поверхности рабочего вала $R_{ав}$ и записывается в виде $K = R_{ап} / R_{ав}$ [1-7].

Этот коэффициент репродукции характерен при номинальных значениях параметров дрессировки. В производственных условиях процесс дрессировки не

реализуется в строго номинальных его параметрах, поскольку имеют место некоторые отклонения от них из-за нестабильности натяжения полосы, биения и крутильных колебаний валковой системы, колебания коэффициента трения в очаге деформации, изменения состояния шероховатых слоев поверхностей вала и дрессируемой полосы, разнотолщинности подката и неравномерности его механических свойств и др.

В целом производители холоднокатаного листа, несмотря на фиксируемые в процессе производства колебания параметров микрогеометрии поверхности полосы, в основном укладываются в жестко регламентируемые потребителями диапазоны допустимых колебаний. Тем не менее, например, в 2012 году претензии в адрес производителя со стороны ОАО «АвтоВАЗ» по несоответствию микрогеометрии составила 36%, исходя из процентного распределения дефектов автомобильного листа. Причиной претензии стало завышенное фактическое значение диапазона колебания параметров микрогеометрии [8].

Исходя из вышеизложенного, следует, что в условиях жесткого регламентирования границ допустимых колебаний параметров микрогеометрии дрессированной полосы необходимо сформулировать представление о влиянии элементов оборудования дрессировочного стана и режимов дрессировки на эти колебания, чтобы минимизировать их возмущающее действие и стабилизировать процесс репродукции

микрогеометрии поверхности рабочего вала на дроссируемую полосу.

Оценку возмущающих действий элементов оборудования и режимов дроссировки выполним с использованием формул для расчета коэффициента репродукции K , приведенных в работах [4, 5]:

$$K = \frac{1}{2}(\sqrt{b^2 + 4ac} - b), \quad (1)$$

где $a=1$; $b=i+2$; $c=i-1$;

$$i = \left[\frac{P\sqrt{3}\pi}{\sigma_s 4(q_b + q_n)} + 2 - \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{S}{h_0} \right) \right]^2.$$

P – давление дроссируемого металла на валки, МПа, определяемое по зависимости

$$P = \frac{\sigma_d h_0 (1 - \varepsilon)}{\mu L} \left\{ \exp \left[\frac{\mu L}{h_0 (1 - \varepsilon)} \right] - 1 \right\}, \quad (2)$$

где ε – степень деформации при дроссировке полосы;

μ – коэффициент трения в очаге деформации;

h_0 – толщина дроссируемой полосы, мм;

L – длина дуги контакта дроссируемой полосы с рабочим валком, мм.

$$L = 0,5 \left[D_b \varepsilon \frac{\mu}{2} + \sqrt{\left(D_b \varepsilon \frac{\mu}{2} \right)^2 + 2 D_b h_0 \varepsilon} \right], \quad (3)$$

где D_b – диаметр рабочего вала, мм;

σ_d – минимальное напряжение, которое необходимо для деформации полосы при дроссировке, МПа.

$$\sigma_d = 1,15 \left[\sigma_s + 1,1 \log \left(\frac{2000 \cdot V}{D_b \mu} \right) \right] - \sigma_t, \quad (4)$$

где V – скорость дроссировки, м/с;

σ_s – предел текучести дроссируемого металла, МПа;

σ_t – растягивающее напряжение в очаге деформации от натяжения дроссируемой полосы, МПа.

Ниже приведены количественные данные по колебанию коэффициента репродукции параметров микрогеометрии поверхности рабочего вала на дроссируемую полосу в зависимости от возмущающих факторов в системе дроссировочного стана, рассчитанные по формулам (1)–(4) без учета разнотолщинности подката. Расчеты выполнены для следующих условий дроссировки: скорость дроссировки 15 м/с, предел текучести материала дроссируемой полосы $\sigma_s = 230$ МПа, ширина полосы 1500–2000 мм, толщина полосы 0,7 мм, диаметр рабочего вала 0,45 м, степень деформации $\varepsilon = 0,02$, натяжение полосы $\sigma_t = 0,2\sigma_s$, относительное количество материала в шероховатом слое поверхности рабочего вала $q_b = 0,538$ и поверхности полосы $q_n = 0,565$ [5], шаг шероховатости поверхности вала $S = 0,09$ мм, исходный высотный па-

раметр микрогеометрии поверхности рабочего вала $R_{an} = 2,7$ мкм, дроссировка «сухая».

Исходя из среднестатистических показателей исследований и опыта эксплуатации дроссировочных станков, определены минимальные и максимальные уровни возмущающих действий на процесс дроссировки [9–14]: колебание натяжения 3–5% σ_t , биение опорного вала с учетом биения цилиндрических, конических шеек и гармоники формы его бочки $\delta S_b = 0,05–0,1$ мм, изменение относительного количества материала в шероховатом слое рабочего вала $\Delta q_b = \pm 0,5\%$ и дроссируемой полосы $\Delta q_n = \pm 0,5\%$ в пределах дроссировки одного рулона.

Изменение шагового параметра ΔS определено по изменению частотного параметра микрогеометрии поверхности рабочего вала дроссировочной клетки. Поскольку между частотным и шаговым параметрами имеет место обратно пропорциональная зависимость, то относительные колебания частотного параметра полностью соответствуют относительным колебаниям шагового параметра. По данным, приведенным в работе [15], усредненные значения колебаний частотного параметра по трем зонам поверхности вала (в центре и по краям) составляют 6% для верхнего вала и 9% для нижнего вала при объеме продроссированного металла 40 т.

Результаты расчетов по формулам (1)–(4) колебания коэффициента репродукции ΔK и параметра микрогеометрии поверхности дроссируемой полосы ΔR_a от их номинальных значений в зависимости от возмущающих действий элементов оборудования дроссировочного стана на процесс дроссировки полосы толщиной 0,7 мм без учета других факторов приведены в табл. 1.

Суммарные значения колебания коэффициента репродукции параметров микрогеометрии поверхности вала на дроссируемую полосу, полученные из условия суперпозиции возмущающих действий от элементов оборудования дроссировочного стана составляют $\Sigma \Delta K = 0,0267$ – при низком их уровне возмущающих действий и $\Sigma \Delta K = 0,048$ – при высоком уровне. Доли участия каждого возмущающего фактора от суммарного возмущающего действия элементов оборудования дроссировочного стана в процентном их выражении иллюстрирует рис. 1.

Наибольшее из возмущающих действий элементов оборудования дроссировочного стана оказывает биение опорных валков, составляющее от 48 до 50% в зависимости от уровня возмущающих действий. Суммарное влияние характеристик шероховатых слоев, участвующих в процессе дроссировки q_b , q_n , S , составляет около 29% независимо от уровня возмущающих действий элементов оборудования.

С целью стабилизировать параметры микрогеометрии поверхности рабочих валков и минимизировать влияние изменения состояния поверхности рабочих валков на коэффициент репродукции в реальных условиях применяют холостую обкатку рабочих валков на дроссировочном стане без полосы между ними [16].

Таблица 1. Колебание коэффициента репродукции ΔK и отклонение параметра R_a микрогеометрии поверхности дрессируемой полосы в зависимости от возмущающих действий элементов дрессировочного стана на процесс дрессировки холоднокатаной полосы толщиной 0,7 мм

Table 1. Fluctuation of the reproduction coefficient ΔK and deviation of the parameter R_a of the microgeometry of the surface of the tempered strip, depending on the disturbing effects of the elements of the temper mill on the tempering process of a 0.7 mm thick cold-rolled strip

Возмущающие параметры оборудования стана	Уровни возмущающих действий	Диапазон колебаний возмущающих действий	Коэффициент репродукции K	Колебания коэффициента репродукции ΔK от номинального	Абсолютное отклонение параметра ΔR_{ap} от номинального, мкм	Относительное отклонение параметра R_{ap} от номинального, %	Доля в суммарном возмущающем действии оборудования дрессировочного стана, %
$\Delta\sigma_t$	низкий	+3% -3%	0,582 0,588	0,003 0,003	0,0081 0,0081	0,513 0,513	22,55
	высокий	+5% -5%	0,580 0,590	0,005 0,005	0,0135 0,0135	0,855 0,855	20,8
δS_b	низкий	0,05 мм	0,598	0,013	0,0351	2,223	48,85
	высокий	0,1 мм	0,609	0,024	0,0648	4,104	50
Δq_v	низкий	+0,5% -0,5%	0,584 0,5655	0,001 0,0015	0,0027 0,004	0,171 0,255	9,36
	высокий	+1,0% -1,0%	0,583 0,588	0,002 0,003	0,0054 0,0081	0,342 0,513	10,4
Δq_n	низкий	+0,5% -0,5%	0,584 0,5655	0,001 0,0015	0,0027 0,004	0,171 0,253	9,32
	высокий	+1,0% -1,0%	0,583 0,588	0,002 0,003	0,0054 0,0081	0,343 0,513	10,4
ΔS	низкий	+6,0% -6,0%	0,5835 0,5862	0,0015 0,0012	0,004 0,0032	0,253 0,203	10
	высокий	+9,0% -9,0%	0,58828 0,5868	0,0022 0,0018	0,006 0,0049	0,38 0,31	8,4
Итого Σ значение	низкий			0,0267	0,0719	4,55	100
	высокий			0,048	0,1297	8,215	100

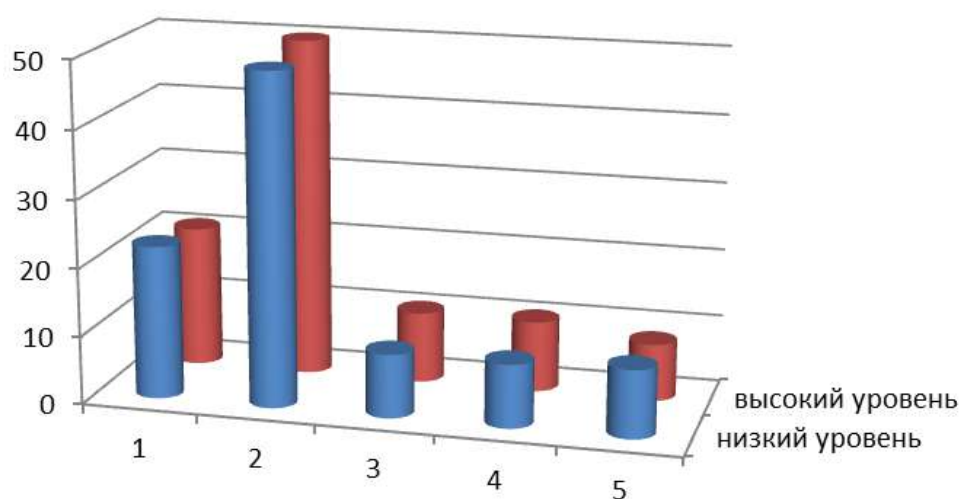


Рис. 1. Процентное распределение возмущающих действий от элементов дрессировочного стана, влияющих на колебание коэффициента репродукции микрогеометрии поверхности рабочего вала на дрессируемую полосу в зависимости от уровня возмущающих действий: 1 – $\Delta\sigma_t$; 2 – δS_b ; 3 – Δq_v ; 4 – Δq_n ; 5 – ΔS

Fig. 1. Percentage distribution of disturbing effects from elements of the temper mill that affect the fluctuation of the reproduction coefficient of the microgeometry of the working roll surface on the temper strip, depending on the level of disturbing effects: 1 – $\Delta\sigma_t$; 2 – δS_b ; 3 – Δq_v ; 4 – Δq_n ; 5 – ΔS

Кроме возмущающих действий на процесс дрессировки холоднокатаной полосы со стороны элементов оборудования, на процесс дрессировки, а соответственно, и на коэффициент репродукции оказывает влияние разнотолщинность подката.

Поскольку разнотолщинность оказывает существенное влияние на величину изменения коэффициента репродукции, то целесообразно оценить его колебания и, соответственно, параметр R_a , на примере наиболее востребованного холоднокатаного проката шириной 1500–2000 мм и толщиной 0,65–0,9 мм. Согласно ГОСТ 19904-90 при таком сортаменте предельные отклонения составляют для проката высокой точности $\pm 0,07$ мм, а для повышенной точности $\pm 0,11$ мм.

Результаты расчетов колебания коэффициента репродукции ΔK и параметра микрогеометрии поверхности дрессируемой полосы R_a в зависимости от предельных отклонений размеров для каждого класса точности, как без учета влияния других возмущающих факторов, так и с учетом вышепринятых значений колебаний натяжения дрессируемой полосы, величины биения опорных валков и изменений характеристик шероховатых слоев поверхности рабочего валка и дрессируемой полосы сведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что доля разнотолщинности подката, оказывающего возмущающее действие на колебание коэффициента репродукции шероховато-

сти поверхности валка на дрессируемую полосу, составляет от 36% при высокой точности проката до 55% при его нормальной точности от суммарного возмущающего действия всех факторов, влияющих на процесс дрессировки. Остальные 45–64% приходятся на возмущающие действия от оборудования дрессировочного стана. Для уменьшения влияния разнотолщинности подката на параметр шероховатости R_a на практике применяют САРТ.

Колебание параметра микрогеометрии поверхности дрессированной холоднокатаной полосы R_a только от допускаемого отклонения от номинальной ее толщины для высокой точности проката от 2,56–3,42% и до 4,1–5,64% для нормальной точности могут стать дефектом, называемым «теневые полосы», поскольку разные участки поверхности металла имеют различную отражательную способность.

Колебание параметра микрогеометрии поверхности R_a дрессируемой полосы с наложением на него влияния всех возмущающих факторов при низком уровне их действий с 7,1–10,2% и при высоком уровне 10,7–13,8% может вызвать не только дефект «теневые полосы», но и дефект «ребристость», если он характеризуется периодичностью, например, от биения опорного валка. Из-за таких дефектов холоднокатаный прокат по качеству переводят из I во II группу отделки поверхности, снижая его стоимость [2, 3, 7, 14].

Таблица 2. Влияние колебания толщины дрессируемой полосы на изменение коэффициента репродукции ΔK параметра микрогеометрии поверхности полосы R_a

Table 2. The effect of fluctuations in the thickness of the tempered strip on the change in the reproduction coefficient ΔK of the microgeometry parameter of the strip surface R_a

Точность изготовления проката (ГОСТ 19904-90)	Допустимые отклонения от номинальной толщины	Толщина полосы h , мм	Коэффициент репродукции K	Отклонение коэффициента репродукции от номинального значения ΔK	Суммарное отклонение ΔK с учетом других возмущающих факторов $\Sigma \Delta K$	Отклонение параметра R_a поверхности полосы только от разнотолщинности проката ΔR_a , мкм	Суммарное отклонение параметра R_a с учетом всех возмущающих факторов ΣR_a , мкм	Относительное отклонение параметра R_a только от разнотолщинности проката, %	Суммарное отклонение параметра R_a с учетом всех возмущающих факторов, %	Доля участия разнотолщинности в суммарном действии всех возмущающих факторов, %
Высокая	+0,07	0,77	0,5697	0,015	$\frac{0,0417}{0,063}$	0,0405	$\frac{0,112}{0,17}$	2,56	$\frac{7,1}{10,77}$	$\frac{36,0}{23,8}$
	-0,07	0,63	0,6047	0,02	$\frac{0,0467}{0,068}$	0,054	$\frac{0,126}{0,184}$	3,42	$\frac{7,98}{11,65}$	$\frac{42,8}{29,4}$
Повышенная	+0,09	0,79	0,5646	0,02	$\frac{0,0467}{0,068}$	0,0543	$\frac{0,126}{0,184}$	3,44	$\frac{7,98}{11,65}$	$\frac{42,8}{29,4}$
	-0,09	0,61	0,611	0,026	$\frac{0,0527}{0,074}$	0,071	$\frac{0,142}{0,2}$	4,5	$\frac{9,0}{12,67}$	$\frac{49,3}{35,0}$
Нормальная	+0,11	0,81	0,5607	0,024	$\frac{0,0507}{0,072}$	0,0648	$\frac{0,137}{0,194}$	4,1	$\frac{8,68}{12,29}$	$\frac{47,3}{33,3}$
	-0,11	0,59	0,618	0,033	$\frac{0,0597}{0,081}$	0,0891	$\frac{0,161}{0,219}$	5,64	$\frac{10,2}{13,87}$	$\frac{55,2}{40,7}$

Примечание. Числитель и знаменатель – соответственно низкий и высокий уровень возмущающих действий элементов оборудования дрессировочного стана.

Анализ колебаний коэффициента репродукции микрогеометрии поверхности валка на дрессируемую полосу и, соответственно, параметра R_a полосы показывают, что они характеризуются существенными отклонениями в зависимости от применяемого оборудования и технологического процесса. Так, например, по данным [17] дрессировка на двухклетевом реверсивном стане холоднокатаной полосы толщиной 0,8 мм и шириной 1400 мм способствует получению полосы с R_a в диапазоне 0,9–1,1 мкм, что в относительном измерении его колебание составляет 18–22%. Дрессировка отожженной холоднокатаной полосы толщиной 0,7 мм аналогичной ширины на непрерывном широкополосном стане сопровождается колебанием параметра R_a в пределах 0,9–1,2 мкм, что соответствует относительной величине колебания R_a в 25–33%. По данным работы [15], колебания параметра R_a после дрессировки полосы на стане 2500 составили от 8,8 до 12,7%.

Сопоставление расчетных значений колебания коэффициента репродукции и параметра R_a микрогеометрии поверхности дрессированной полосы с колебаниями параметра R_a на практике показывает, что расчетные значения удовлетворительно укладываются в диапазон колебаний параметра R_a при дрессировке полос на дрессировочных станах и могут быть использованы для получения более стабильной микрогеометрии поверхности готовой тонколистовой продукции.

Выводы

Сформулировано представление по влиянию возмущающего действия на процесс дрессировки со стороны оборудования дрессировочного стана и разнотолщинности подката. Получены количественные данные по влиянию нестабильности натяжения дрессируемой полосы, биению опорных валков и изменению состояния шероховатых поверхностей валка и подката на диапазон колебания параметра R_a поверхности продрессированной полосы. В зависимости от уровня возмущающего действия со стороны элементов оборудования дрессировочного стана диапазон колебания коэффициента репродукции параметров шероховатости поверхности валка на дрессируемую полосу составляет 0,0267 при низком уровне возмущающих действий и 0,048 при высоком уровне от его номинального значения. Относительное колебание параметра R_a на дрессированной полосе составляет 4,55 и 8,2% соответственно при низком и высоком уровне возмущающих действий со стороны элементов оборудования дрессировочного стана.

На примере наиболее востребованного проката шириной 1500–2000 мм и толщиной 0,65–0,9 мм с допускаемыми отклонениями от $\pm 0,07$ до $\pm 0,11$ мм в зависимости от группы его точности по ГОСТ 19904-90 показано, что колебания параметра R_a продрессированной полосы только от разнотолщинности без учета возмущающих действий со стороны элементов оборудования дрессировочного стана составляет от

3,4% для высокой точности проката до 5,6% для нормальной точности.

С учетом всех возмущающих факторов диапазон колебаний параметра R_a шероховатой поверхности полосы может достигать значений 10,2 и 13,8% в зависимости от уровня действия возмущающих факторов, если не используются системы САРТ.

Полученные в работе результаты могут быть использованы специалистами прокатного производства с применением методологии улучшения листопрокатных технологических систем [18] для корректировки состояния оборудования дрессировочного стана и условий его эксплуатации с целью удовлетворения потребителей дрессированной полосы по показателям диапазона колебания параметра R_a .

Список источников

1. Белов В.К., Губарев Е.В. Сравнение микрофотографии автолиста, произведенного по различной технологии // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы 80-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 18–22 апреля 2022 года. Т. 2. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2022. С. 151. EDN WPYXBK.
2. Мазур В.Л. Качество тонколистовой холоднокатаной стали: обеспечение заданной шероховатости поверхности в производственных условиях // Сталь. 2018. № 1. С. 25-30.
3. Мазур В.Л. Научные основы технологии производства проката с заданной шероховатостью поверхности // Сталь. 2015. № 5. С. 59-66.
4. Анализ и математическое моделирование репродукции микрогеометрии текстурированной поверхности валка на оцинкованной холоднокатаной полосе при ее дрессировке / Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю., Горбатюк С.М., Шешенин Е.В., Ибрагимов Х.Ф. // Металлург. 2024. № 2. С. 88-94.
5. Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю., Исмагилов Р.Р. Теоретический анализ формирования шероховатости автомобильного листа при дрессировке в валках, обработанных дробью // Известие вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 8. С. 600-605.
6. Румянцев М.И., Ахметкужина И.Х. Модель шероховатообразования полосы в очаге деформации при холодной прокатке // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2018. № 24. С. 24-32.
7. Эспехан М., Гюнтинг Г. Передача шероховатости валков на поверхность тонкого холоднокатаного листа // Черные металлы. 1975. № 24. С. 8-14.
8. Лимарев А.С., Маркварт Т.Ю. Улучшение показателей качества поверхности автомобильного листа // Качество в обработке материалов. 2014. №2. С. 65-69.
9. Особенности натяжения полосы на различных участках стана холодной прокатки и их отображение в цифровом двойнике процесса / М.И. Румянцев, А.Н. Завалишин, А.Н. Колыбанов, К.Р. Ахмадиев // Теория и технология металлургического производства. 2022. № 1(40). С. 19-24.

10. Железнов Ю.Д., Коцарь С.Л., Абиев А.Г. Статистические исследования точности тонколистовой прокатки. М.: Металлургия, 1974. 240 с.
11. Тимофеева М.А., Гарбер Э.А. Новая методика моделирования параметров трения в очаге деформации дроссировочного стана // Бюллетень «Черная металлургия». 2017. № 8. С. 60-64.
12. Повышение производительности циклов шлифования валков холодной прокатки путем оптимизации режимов графоаналитическим методом / С. М. Братан, Ю. К. Новоселов, А. О. Харченко, С. И. Рощупкин // Черные металлы. 2023. № 12. DOI: 10.17580/chm.2023.12.13. EDN JYXOPI.
13. Королев А.А. Методика определения продольной разнотолщинности при прокатке тонкой полосы // Сталь. 1971. № 9. С. 816-820.
14. Компьютерное моделирование процесса прокатки тонких полос и совершенствование конструкции продольно-клинового стана / Машеков С.А., Уразбаева Р.Е., Тукібай А.А., Тусупкалиева Э.А. // Известия КГТУ им. Раззакова. 2019. № 49. С. 125-132.
15. Горбунов А.В. Совершенствование технологии производства холоднокатаной листовой стали с требуемыми характеристиками микротопографии поверхности для автомобильной промышленности: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2011. 179 с.
16. Звягина Е.Ю., Огарков Н.Н., Козлов А.В. Стабилизация параметров шероховатости рабочих валков дроссировочного стана в процессе холостой обкатки // Заготовительные производства в машиностроении. 2024. Т. 22. № 1. С. 28-34.
17. Пат. 24144973 Российская Федерация, С1. Способ производства холоднокатаного автомобильного листа / Кочнева Т.М., Лисичкина К.А., Полецков П.П., Антипанов В.Г., Крюков Д.М., Ласьков С.А. № 2009134194/02; заявл. 11.09.2009; опубл. 27.03.2011. Бюл. №9.
18. Румянцев М.И. Некоторые результаты развития и применения методологии улучшения листопркатных технологических систем // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 1. С. 45-55. DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-1-45-55. EDN YGSAND.
4. Ogarkov N.N., Zvyagina E.Yu., Gorbatyuk S.M., Sheshenin E.V., Ibragimov H.F. Analysis and mathematical modeling of reproduction of microgeometry of a textured roll surface on a galvanized cold-rolled strip during its tempering. *Metallurg* [Metallurgist], 2024;(2):88-94. (In Russ.)
5. Ogarkov N.N., Zvyagina E.Yu., Ismagilov R.R. Theoretical analysis of the formation of the roughness of an automobile sheet during tempering in ballized rolls. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2019;62(8):600-605. (In Russ.)
6. Rumyantsev M. I., Akhmetkuzhina I. H. Model of strip roughness in the deformation zone during cold rolling. *Modelirovanie i razvitie processov OMD* [Modeling and development of metal pressure treatment processes], 2018;(24):24-32. (In Russ.)
7. Espehan M., Guntin D. Transfer of the roughness of the rolls to the surface of a thin cold-rolled sheet. *Chernye metally* [Ferrous metals], 1975;(24):8-14. (In Russ.)
8. Limarev A.S., Markwart T.Yu. Improving the quality indicators of the surface of an automobile sheet. *Kachestvo v obrabotke materialov* [Quality in the processing of materials], 2014;(2):65-69. (In Russ.)
9. Rumyantsev M.I., Zavalishchin A.N., Kolybanov A.N., Akhmediev K.R. Features of strip tension in various sections of the cold rolling mill and their display in the digital twin of the process. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and technology of metallurgical production], 2022;(1(40)):19-24. (In Russ.)
10. Zheleznov Yu.D., Kotsar S.L., Abiev A.G. *Statisticheskie issledovaniya tochnosti tonkolistovoy prokatki* [Statistical studies of the accuracy of thin-sheet rolling]. Moscow: Metallurgy, 1974, 240 p. (In Russ.)
11. Timofeeva M.A., Garber E.A. A new technique for modeling friction parameters in the deformation zone of a temper mill. *Byulleten "Chernaya metallurgiya"* [Bulletin of Ferrous Metallurgy], 2017;(8):60-64. (In Russ.)
12. Bratan S.M., Novoselov Yu.K., Kharchenko A.O., Roshchupkin S.I. Improving the productivity of grinding cycles of cold rolling rolls by optimizing modes using a graphoanalytic method. *Chernye metally* [Ferrous metals], 2023;(12). DOI: 10.17580/chm.2023.12.13. (In Russ.) EDN JYXOPI.
13. Korolev A.A. Method of determining the longitudinal thickness difference when rolling a thin strip. *Stal* [Steel], 1971;(9):816-820. (In Russ.)
14. Mashekov S.A., Urazbaeva R.E., Tukibai A.A., Tusupkalieva E.A. Computer modeling of the thin strip rolling process and improvement of the design of a longitudinal wedge mill. *Izvestiya KGTU im. Razzakova* [Izvestia of KSTU named after I. Razzakov], 2019;(49):125-132. (In Russ.)
15. Gorbunov A.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva holodnokatanoj listovoj stali s trebuemymi harakteristikami mikrotopografii poverhnosti dlya avtomobilnoy promyshlennosti: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improvement of the production technology of cold rolled sheet steel with the required characteristics of surface microtopography for the automotive industry. Candidate dissertation]. Magnitogorsk, 2011. 179 p.

References

1. Belov V.K., Gubarev E.V. Comparison of the microtopography of an autolist produced using various technologies. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy 80-i mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Current problems of modern science, technology and education. Proceedings of the 80th International Scientific and Technical Conference], Magnitogorsk, April 18-22, 2022. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2022, p. 151. (In Russ.) EDN WPYXBK.
2. Mazur V.L. The quality of thin-sheet cold-rolled steel: ensuring a given surface roughness in production conditions. *Stal* [Steel], 2018;(1):25-30. (In Russ.)
3. Mazur V.L. Scientific foundations of the production technology of rolled products with a given surface roughness. *Stal* [Steel], 2015(5):59-66. (In Russ.)

16. Zvyagina E.Yu., Ogarkov N.N., Kozlov A.V. Stabilization of the roughness parameters of the working rolls of the temper mill in the process of idle rolling. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Procurement production in mechanical engineering], 2024;22(1):28-34. (In Russ.)
17. Kochneva T.M., Lisichkina K.A., Poletskov P.P., Antipanov V.G., Kryukov D.M., Laskov S.A. *Sposob proizvodstva holodnokatanogo avtomobilnogo lista* [Method of production of cold-rolled automobile sheet]. Patent RF, no. 24144973 C1, 2011.
18. Rumyantsev M. I. Some results of the development and application of the methodology for improving sheet-rolled technological systems. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017;15(1):45-55. DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-1-45-55. (In Russ.) EDN YGSAND.

Поступила 28.05.2024; принята к публикации 10.06.2024; опубликована 28.03.2025
Submitted 28/05/2024; revised 10/06/2024; published 28/03/2025

Звягина Елена Юрьевна – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: zviagina_mmf@mail.ru. AuthorID: 754062

Огарков Николай Николаевич – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: ogarkovnikolai@mail.ru. AuthorID: 399227

Терентьев Дмитрий Вячеславович – доктор технических наук, профессор кафедры МиТОДиМ,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: dtnterentyev@mail.ru. AuthorID: 449858

Румянцев Михаил Игоревич – доктор технических наук, профессор кафедры ТОМ,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: mikhail.rumyantsev54@bk.ru. AuthorID: 423777

Elena Yu. Zvyagina – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: zviagina_mmf@mail.ru. AuthorID: 754062

Nikolay N. Ogarkov – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: ogarkovnikolai@mail.ru. AuthorID: 399227

Dmitry V. Terentyev – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Machines and Technology
of Pressure Treatment and Mechanical Engineering,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: dtnterentyev@mail.ru. AuthorID: 449858

Mikhail I. Rumyantsev – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Material Processing Technologies,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: mikhail.rumyantsev54@bk.ru. AuthorID: 423777



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.777.09

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-44-53

CHARACTERIZATION PROPERTIES AND STRUCTURE FOR WIRES FROM Al-Ce-La SYSTEM ALLOY VIA THE METHOD OF COMBINED ROLLING-EXTRUSION WITH A SINGLE-DRIVEN ROLL

Voroshilov D.S.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. Recently, there has been a need for electrical wire made of aluminum alloys with different contents of rare earth metals (REM) as wiring for various types of advanced equipment. Also, an important factor is the increase in the efficiency of production of deformed semi-finished products due to the use of combined processes that reduce energy consumption, labor costs and increase productivity. **Objective.** The purpose of this study is to develop technological solutions for the production of wire from aluminum alloys containing REM, using asymmetric combined processes of rolling-extrusion (CRE) and casting-rolling-extrusion (CCRE) with one drive roll. **Methods Applied.** The results of experimental studies of the CRE and CCRE processes for obtaining longish deformed semifinished products from alloy 01417 at the CRE-200 laboratory facility are presented. The structure of the metal has been studied. Data on the ultimate tensile strength, elongation to failure and specific electrical resistance of hot-extruded rods and wires in cold-deformed and annealed states were obtained. **Originality.** It was found that it is expedient to implement the process with one driven roll when the task is to reduce the dimensions of the unit and energy-power costs in the production of longish semifinished products from aluminum alloys. **Result.** The results of the theoretical solutions, modelling and experimental studies are adequate and confirm the previously established patterns of change in the temperature–speed and energy–power parameters of the combined metal forming processes. The use of the CRE and CCRE methods with one driven roll made it possible to obtain rods with a diameter of 9 mm and wires with a diameter of up to 0.3 mm in a hard-worked and annealed state from alloy 01417 with the required level of mechanical, electrical and operational properties.

Keywords: cerium, aluminum alloys, mechanical properties, microstructure, plastic deformation, electrical resistance, rolling, extrusion, drawing

The work is performed as a part of the state assignment for the science of Siberian Federal University, project number FSRZ-2020-0013.

For citation

Voroshilov D.S. Characterization Properties and Structure for Wires from Al-Ce-La System Alloy Via the Method of Combined Rolling-Extrusion with a Single-Driven Roll. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 44-53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-44-53>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Ce-La МЕТОДОМ СОВМЕЩЕННОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ С ОДНИМ ПРИВОДНЫМ ВАЛКОМ

Ворошилов Д.С.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация. В последнее время возникает потребность в электротехнической проволоке из сплавов алюминия с различным содержанием редкоземельных металлов в качестве проводки различных образцов перспективной техники. Также немаловажным фактором является повышение эффективности производства деформированных полуфабрикатов за счет применения совмещенных процессов, снижающих энергоемкость, трудозатраты и повышающих производительность. **Цель исследования.** Целью данного исследования является разработка технологических решений для производства проволоки из алюминиевых сплавов, содержащих редкоземельные металлы, с использованием асимметричных совмещенных процессов прокатки-прессования (СПП) и литья-прокатки-прессования (СЛиПП) с одним приводным валком. **Используемые методы.** Представлены результаты экспериментальных исследований совмещенных процессов СПП и СЛиПП для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплава 01417 на лабораторной установке СПП-200. Изучена структура металла. Получены данные по временному сопротивлению, относительному удлинению и удельному электрическому сопротивлению горячепрессованных прутков и проволоки в холоднодеформированном и отожженном состояниях. **Новизна.** Установлено, что при задаче снижения габаритов агрегата и энергосиловых затрат при производстве длинномерных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов целесообразно реализовать процесс с одним приводным валком. **Результат.** Результаты теоретических решений, моделирования и экспериментальных исследований адекватны и подтверждают ранее установленные закономерности изменения температурно-скоростных и энергосиловых показателей совмещенных процессов обработки металлов давлением. Применение методов СПП и СЛиПП с одним приводным валком позволило получить прутки диаметром 9 мм и проволоку диаметром до 0,3 мм в нагартованном и отожженном состоянии из сплава 01417 с требуемым уровнем механических, электрических и эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: церий, алюминиевые сплавы, механические свойства, микроструктура, пластическая деформация, электросопротивление, прокатка, прессование, волочение

Работа выполнена в рамках государственного задания на науку Сибирского федерального университета, номер проекта FSRZ-2020-0013.

© Ворошилов Д.С., 2025

Для цитирования

Ворошилов Д.С. Исследование свойств и структуры проволоки из сплава системы Al-Ce-La методом совмещенной прокатки-прессования с одним приводным валком // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 44-53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-44-53>

Introduction

Aluminum is widely used in various industrial areas [1]. Owing to their high electrical conductivity, high corrosion resistance, and especially light weight, aluminum (including with the addition of rare earth metals) and its alloys are widely used in electrical wire applications, aircraft and rocket space construction, and other industries. With an increase in temperature to 523°C, the electrical resistance of aluminum increases by almost 3 times. When the aluminum temperature decreases to -253°C, the UTS increases by almost 3 times, and elongation to failure (A) decreases by 1.5 times [2, 3]. This metal also successfully replaces copper in high-voltage power lines.

In various branches of nonferrous metallurgy, the volume of wire output is up to 30% of the total volume of metal products (wires, rivets, deoxidizers, and welding wire). Energy enterprises consume more than 80% of the electrical wire they receive.

A special place in this series is occupied by wire made of aluminum alloys with REMs, which are used as electrical conductors for aircraft operating at elevated temperatures (up to 250°C). Numerous studies have shown that these alloys can be successfully used for such purposes since they have improved strength and service properties [4-23]. In [4], the CRE of Al-REM alloys was simulated. Mechanical properties of the Al-REM system alloys described in previous works [5, 6, 10, 12, 13, 16, 23]. The microstructure has been investigated previously [6, 12, 18, 23, 24]. Electrical conductivity of aluminum alloys with REMs has been investigated [5, 7]. Zhang Yu. The authors of [7] described the difference between La and Ce as additives for electrically conductive aluminum alloys. The effects of the addition of La have been reported previously [8, 10, 13, 17-19]. Feng W. et al. [8] studied the homogenization of pure aluminum with the addition of La. Cao X. et al. [15] studied the annealing and aging of an Al-Ce alloy. The influence of Ce in aluminum alloys has been investigated [9, 14, 20, 22]. Effect of

La+Sm combined addition on mechanical properties and microstructure of aluminum alloys described by Yang Q. et al. [11]. Effect of Ce+Sr addition on solidification, as shown in [21].

Important parameters in the development of equipment for combined processing are the simplicity of design and the reduction of energy losses at the stages of its transfer from the drive motor of the unit to the rolls. In previous studies, the results of modelling the asymmetric process of combined rolling-extrusion with two driven rolls were presented, but the process with one driven roll was not studied. The use of this process makes it possible to exclude the gear stand from the composition of the CRE units, thereby ensuring the direct transmission of torque from the gearbox to one of the work rolls, which reduces the dimensions and reduces the cost of the unit. In this context, the task of studying the CRE process with one driven roll seems to be relevant. Notably, in addition to the temperature and speed conditions of processing, the lengths of the zones of action of the active and reactive friction forces, which are determined by the parameters of the deformation zone, strongly influence the CRE and CCRE process.

The purpose of this study is to develop technological and scientific solutions for the production of wire from aluminum alloys containing REMs via an asymmetric CRE and CCRE process with one driven roll.

Materials and methods of research

The chemical composition of the investigated aluminum alloy 01417 is given in **Table 1**.

Table 1. Chemical composition of the investigated 01417 alloy

Таблица 1. Химический состав исследуемого сплава 01417

Component content in the alloy, wt. %						
Al	Ce	La	Fe	Pr	Sm	Si
balance	4.4-4.7	2.3-2.5	0.2	0.1	0.1	0.1

Research on the production of rods as billets for wire for electrical purposes was carried out with a combined processing CRE-200 unit (**Table 2**) [5].

Table 2. Technical characteristics of the combined processing unit CRE-200

Таблица 2. Технические характеристики установки совмещенной обработки СПП-200

Parameters	Values
Initial roll diameter, mm	200
Shaft neck diameter, mm	100
Roll barrel length, mm	240
Roll speed, rpm	4; 8
Maximum clamping force, kN	300
Electric motor power, kW	19
Gear ratio	40

Rheological property data for the 01417 alloy obtained by torsion of samples in different modes over a fairly wide range of changes in the rate and degree of

deformation. For a temperature of 550°C, the graph of the dependence of the resistance to deformation σ_s on the logarithmic degree of deformation at various strain rates is shown in **Fig. 1**. On the basis of an analysis of the scientific and technical literature, this alloy was chosen for research on the production of electrical wires that meet the existing technical requirements for mechanical properties and heat resistance.

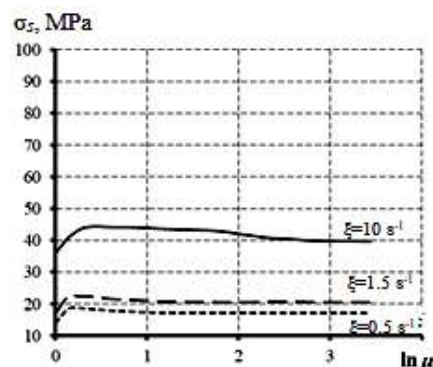


Fig. 1. Resistance to deformation σ_s dependence of the logarithmic deformation $\ln \mu$ of the 01417 alloy at different strain rates ξ and temperatures of the billet heated at 550°C

Рис. 1. Зависимость сопротивления деформации σ_s от логарифмической деформации $\ln \mu$ сплава 01417 при различных скоростях деформации ξ и температурах заготовки, нагретой при 550°C

Metallographic studies were carried out on a Carl Zeiss and an EVO 50 scanning electron microscope (Axio Observer). A1m light microscope, with an Inca Energy 350 energy-dispersive microanalyzer. To investigate the mechanical properties of deformable semifinished products, a universal electromechanical machine LFM 400 with a force of 400 kN was used. To simulate the CRE process with one driven roll, the DEFORM 3D finite element modelling complex was used.

Findings and discussion

Two schemes of processing were used for this research: standard with two driven rolls and with one driven roll (**Fig. 2**). Roll 2, with the largest contact surface made with a groove (cut), acted as a driven roll. Roll 1 with a protrusion was nondriven and formed a closed caliber with a rectangular cross-section with a minimum height h_1 with roll 2. The billet 4 with height h_0 was set into a gauge and covered at the exit from the rolls by die 3, which had a calibrating hole according to the shape and dimensions of the extruded rod 5 with a diameter d .

The study of the metal flow during CRE with one driven roll was carried out via the method of coordinate grids on the underrolled residue, the form of which is shown in **Fig. 3**. Underrolled residue during CRE with one driven roll was obtained on the CRE-200 unit by stopping the roll at the moment the rod was extruded. In this case, a sample was obtained, according to which the

shape of the deformation zone and the features of the metal flow were assessed.

The task of studying the shape change of the metal of a model sample subjected to a CRE with one driven roll was solved via the grid coordinate method. To carry out the experiments, samples with rectangular cross-sections 14×14 mm in size were made with a coordinate grid applied mechanically with an average cell parameter of 2.5 ± 0.2 mm. Next, the samples were subjected to a CRE, and the distortion of the grid cells was used to assess the features of the metal flow during the implementation of a given scheme of combined processing.

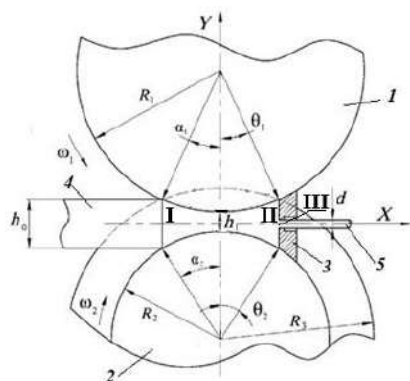


Fig. 2. Scheme of the deformation zone of the CRE process with one driven roll: 1 is roll with the protrusion; 2 is roll with a groove; 3 is die; 4 is billet; 5 is extruded rod; I is rolling zone; II is zone of pressing out; III is extrusion zone

Рис. 2. Схема очага деформации процесса СПП с одним приводным валком: 1 – валок с выступом; 2 – валок с ручьем; 3 – матрица; 4 – заготовка; 5 – прессованный пруток; I – зона прокатки; II – зона распрессовки; III – зона прессования

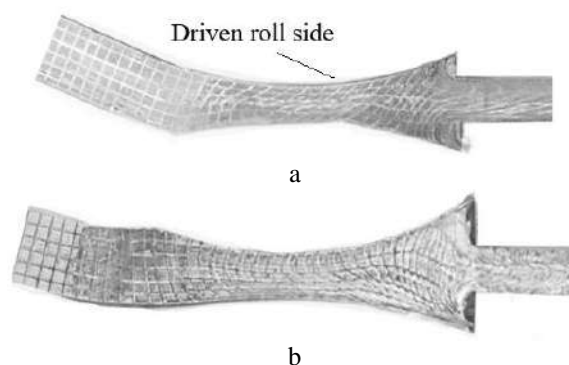


Fig. 3. Type of underrolls in the implementation of the CRE process with one (a) and two (b) driven rolls

Рис. 3. Виды недокатов при реализации процесса СПП с одним (а) и двумя (б) приводными валками

The measurement of the geometric parameters for the coordinate grid for various streamlines was carried out via the AutoCAD software package (scanned image with

a size of 3768×3574 px). On the basis of the measurements, data for the calculation were obtained, which were processed and presented in graphical form for the case of a CRE with one driven roll in **Fig. 4** and **Fig. 5**.

The contact streamline close to the driven roll changes similarly to the streamlines during CRE with two driven rolls. The CRE method with two driven rolls for other streamlines has a different nature. Depending on the active and reactive friction forces on the contact surfaces, the movement of the alloy in the rolling direction is different.

The displacement of the ordinates of the nodes of the coordinate grid near the streamline adjacent to the driven roll begins before the geometric source (**Fig. 4, b**). It bends opposite to the rolling direction, similar to two driven rolls. The alloy particles in contact with the driven roll are ahead of the axial metal layers, and the layers are located on the side of the nondriven roll.

When the billet enters the zone of extrusion during CRE with one driven roll (**Fig. 4, a**), a decrease in movement along the rolling axis is observed. Additionally, from the side of the nondriven roll, the metal lags behind the roll surface, which can be explained by the difference in the movement speeds of different metal layers. In the zone of extrusion from the side of the nondriven roll (roll with a protrusion), an increase in the lag of the metal particles at the contact from the inner layers is observed, but later, they are ahead of the intermediate ones. The metal layers on the side of the nondriven roll have the lowest speed in the deformed billet. The highest value of the change in the horizontal component (**Fig. 5, a**) of the metal flow velocity V_x is associated with parts of the billet located on the side of the driven roll. The vertical component V_y is a significant change (**Fig. 5, b**) in the speed of the axial layers of the metal in comparison to the CRE process with two driven rolls. The change in the speed of the axial layers of the metal in the process of CRE with two driven rolls is insignificant. The velocity V_y decreases in the section of the curve from the alloy entry into the deformation zone. Furthermore, in the extrusion zone, an increase in the velocity component occurs. The velocity component reaches a maximum value in front of the die.

At the beginning of the deformation zone, the billet bends towards the driven roll. An influx of metal is formed from the roll with the protrusion side (without motion), which is caused by the difference in the metal flow rates of the billet (see **Fig. 3**). At the moment of minimum billet height during rolling, the sidewalls of the pass have full contact with the side faces of the billet (the same case with two driven rolls). After passing through the zone of maximum reduction, the metal lags behind the surface of the nondriven roll, which is also due to different metal flow rates. The metal was deposited and extruded out in front of the die along the height of the caliber. A billet with a size equal to the height of the die squeezed out into the hole of the die. The metal flow from the side of the die mirror has a radial character.

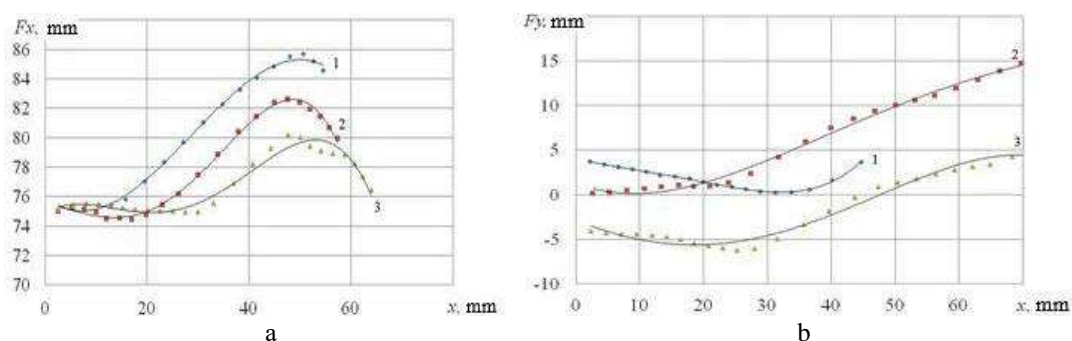


Fig. 4. Distribution over the cross-section of the sample for horizontal F_x (a) and vertical F_y (b) displacements of coordinate grid nodes: 1 is contact current line from the driven roll side; 2 is axial current line; 3 is contact current line from the side of the nondriven roll

Рис. 4. Распределение по сечению образца горизонтальных F_x (a) и вертикальных F_y (b) перемещений узлов координатной сетки: 1 – контактная линия тока со стороны приводного вала; 2 – осевая линия тока; 3 – контактная линия тока со стороны не приводного вала

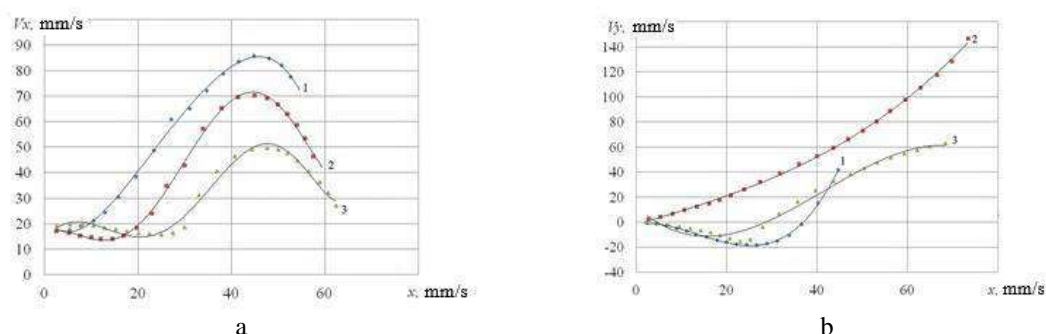


Fig. 5. Changes in the horizontal V_x (a) and vertical V_y (b) components of the metal flow velocity: 1 is contact current line from the driven roll side; 2 is axial current line; 3 is contact current line from the side of the nondriven roll

Рис. 5. Изменение горизонтальной V_x (a) и вертикальной V_y (b) составляющих скорости течения металла: 1 – контактная линия тока со стороны ведомого вала; 2 – осевая линия тока; 3 – контактная линия тока со стороны не ведомого вала

The DEFORM 3D software package is used to analyse and calculate the parameters of the CRE process with one driven roll and establish patterns of their movement, such as, for example, the distribution of moments on the driven and nondriven rolls, the distribution of metal flow velocities, forces on the rolls and die, and temperatures in the deformation zone. To refine the rheological model via mechanical tests, data were obtained on the properties of the experimental alloy at various temperatures and speeds. After analysis, the obtained data were approximated and entered into the database of materials of the DEFORM 3D system.

In the next stage, with the help of the SolidWorks complex, models of the roll tool, die and billet were built. The developed model was imported into the DEFORM 3D preprocessor via STL files.

The calculations in the DEFORM 3D system were carried out under the following assumption:

- the process under consideration is nonisothermal;
- incompressible rolls;
- the billet material is considered to be homogeneous and isotropic;
- Deformable medium - viscoplastic;
- Friction on the rolls and die obeys Siebel's law.

The following are taken as initial parameters. The friction index according to Siebel on the matrix $\psi_m = 0.58$

on the rolls $\psi_v = 0.9$. The dimensions of the cross-section of the cast billet are 14×14 mm. The initial temperature of the cast billet was 550°C . The diameter of the roll with the groove was 162 mm, and the diameter of the roll with the protrusion was 214 mm. The roll speed (n) was 4 rpm. The degree of reduction during rolling is $\varepsilon = 50\%$. The initial temperature of the rolls and the die varied from 80 to 400°C . The number of elements was as follows: billet, 40665; die, 9660; roll with protrusion, 97785; and roll with a groove, 81326. Modelling was carried out up to the steady-state CRE process. The results of modelling the energy–power and temperature–speed parameters of the CRE process with one driven roll are shown in **Fig. 6**.

In this context, studies on the feasibility of the CRE process were carried out for one driven roll, and a comparison of the calculation results with the feasibility of the process when both drive rolls are used. To verify the results of modelling the processes of obtaining extruded semifinished products from an aluminum alloy of the Al-REM system, the CRE and CCRE methods were used. To implement these processes, we used a CRE-200 unit mounted on the basis of a DUO 200 rolling mill (**Table 2**).

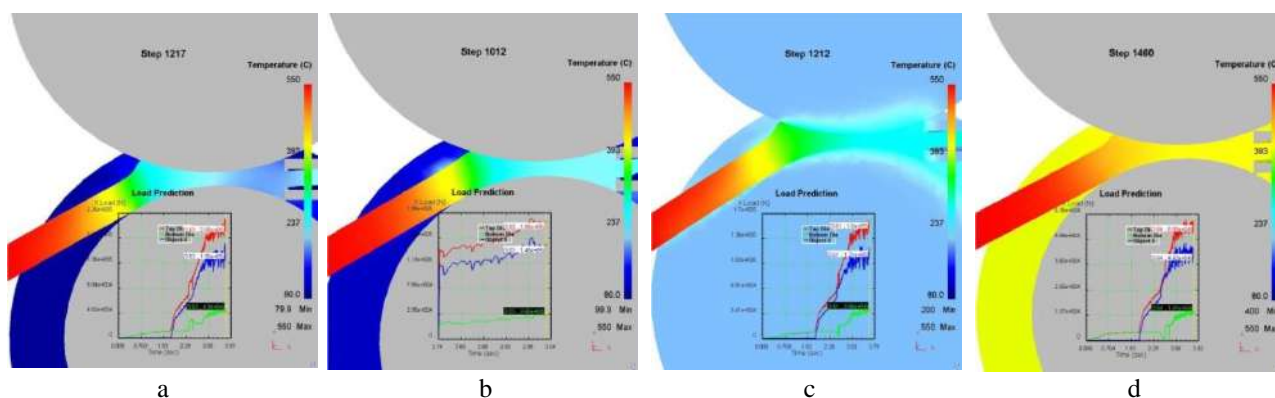


Fig. 6. Temperature distribution of the billet over the deformation zone and the value of the force acting on the die, depending on the initial temperature of the rolls and the die T_i at a billet temperature T_b equal to 550°C:

a is $T_i = 80^\circ\text{C}$; b is $T_i = 100^\circ\text{C}$; c is $T_i = 200^\circ\text{C}$; d is $T_i = 400^\circ\text{C}$

Рис. 6. Распределение температуры заготовки по очагу деформации и величина силы, действующей на матрицу, в зависимости от начальной температуры валков и матрицы T_i при температуре заготовки T_b , равной 550°C: а – $T_i = 80^\circ\text{C}$; б – $T_i = 100^\circ\text{C}$; в – $T_i = 200^\circ\text{C}$; д – $T_i = 400^\circ\text{C}$

Several billets obtained in the electromagnetic mold were simultaneously heated to a predetermined temperature (480–550 °C) and kept for 10–15 minutes in an electric resistance furnace. The heating temperature of the billets was controlled by a chromel–alumel thermocouple and a KSP-3 potentiometer. The rolls were heated to 100 °C in a furnace to form rolls with nichrome heaters. When the billets and rolls were heated to the given temperature, the rolls were rotated, and the billet was set into the caliber of the rolls.

After the billet was gripped by rolls, the tensometric equipment recorded the force exerted by the metal on the rolls with the help of mesdoses. Next, the billet was set into the caliber and reached the die. The die was pressed against the rolls from below. The billet completely filled the caliber in front of the die. Then, the billet was squeezed out in the form of a rod through the calibrating channel of the die. The force acting on the mesdose installed under the die was fixed. The dimensions of the caliber chosen for the experiments varied from 15 to 20 mm. The dimensions of the die were determined by the following two criteria: the feasibility of the process with minimal energy consumption and the quality of the obtained extruded rods.

Experiments with the use of the CCRE process were carried out according to the following procedure. The metal that melted in the crucible via a mixer furnace was fed into the rolls. At the same time, on the surfaces of the water-cooled rolls, the crystallized metal was compressed in a closed caliber, pressed out in front of the die, and squeezed out through the calibrating hole of the die to form a rod of a given shape and size. The frequency of rotation of the rolls in the experiments was changed at two levels: 4 and 8 rpm, and the melt temperature was varied at two levels: 750 and 780°C.

The mechanical properties of the rods obtained by the CRE are given in **Table 3**, which shows that the change in the technological parameters also affected the mechanical properties. The plastic characteristics increase with increasing billet temperature and strain rate, which corresponds to the generally accepted laws of metal formation. The UTS of the metal of the rods obtained via the CRE method averages 140–170 MPa, and $A = 15\text{--}30\%$.

To obtain wires from rods via the CRE and CCRE methods, the following technological stages were used.

1. Preparation of a melt or obtaining a cast billet via EMM while controlling its structure and properties.

2. Rolling-extrusion, for which the melt or heated billets were put into a roll caliber (at a temperature of $T_i = 100^\circ\text{C}$), and hot-extruded rods of various diameters were obtained, while the surface quality was visually assessed, and samples were taken to study the microstructure of the rods, as well as their mechanical properties.

3. Cold sectional rolling was used to obtain a billet for drawing.

4. The obtained billets were drawn to a given size by sampling for mechanical testing and metallographic studies.

Ingot from the alloy of the Al-REM system with a diameter of 15 to 18 mm and a length of approximately 1000 mm, obtained by casting into the EMM, served as initial billets for the research. For the experiments, a combined processing unit, CRE-200, was used (see **Table 2**), as were an AF 200 + 180 R sectional rolling mill and a tenfold drawing machine, T10 N.F.S.

On the basis of the optimal technological modes of the CRE and CCRE for processing the investigated alloy, experimental batches of rods with diameters of 9, 7 and 5 mm were manufactured via the CRE and CCRE methods, which were subjected to deformation via sectional rolling on mill AF 200 + 180 R to reduce the transverse dimensions. The gauges of the rolls of the square-shaped rolling mill had the following dimensions: 9.2 - 8.3 - 7.5 - 6.8 - 6.2 - 5.5 - 5.0 - 4.5 - 4.2 - 3.7 - 3.4 - 3.1 - 2, 8 - 2.6 - 2.4 - 2.2 - 2.0 - 1.8 - 1.6 - 1.5 - 1.4 - 1.3 - 1.2 - 1.1 - 1.0 mm. As a result of sectional rolling, a square section billet for drawing was obtained with dimensions of 1.3×1.3 mm. In the next stage, the resulting wire rod was subjected to cold drawing to obtain a wire with a diameter of 0.3 mm. **Fig. 7** shows examples of semifinished products from the 01417 alloy at various stages of processing.

The wire microstructure is shown in **Fig. 8**. The analysis revealed that the wire obtained via the CRE method has a uniform cross-sectional structure and a fibrous structure.

Table 3. Mechanical properties of 01417 alloy rods produced via the CRE method

Таблица 3. Механические свойства прутков сплава 01417, полученных методом СПП

Parameters		$T_b = 480\text{ }^{\circ}\text{C}$			$T_b = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$		
		$\mu = 4.8$	$\mu = 8.0$	$\mu = 15.7$	$\mu = 4.8$	$\mu = 8.0$	$\mu = 15.7$
$\xi = 0.74\text{ s}^{-1}$	A, %	19.8	18.4	14.8	27.6	18.7	15.4
	UTS, MPa	142	161	168	155	157	169
$\xi = 1.49\text{ s}^{-1}$	A, %	26.7	22.9	16.4	29.0	22.1	17.7
	UTS, MPa	136	149	153	147	154	165



a



b



c

Fig. 7. Extruded and drawn products from alloy 01417 at various stages: a billet from the EMM, a rod with a diameter of 9 mm, obtained via the CRE method, rods and wire with a diameter of up to 0.3 mm (a); extruded residue, a rod with a diameter of 7 mm, obtained via the CCRE method, rods and wire with a diameter of up to 0.3 mm (b); industrial batches of wire with a diameter of 0.5 mm (c)

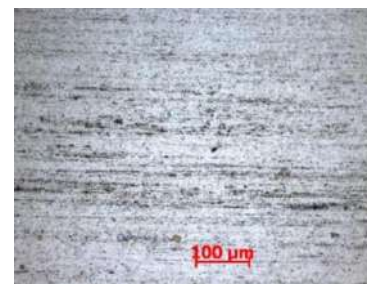
Рис. 7. Прессованные и тянутые изделия из сплава 01417 на разных стадиях: заготовка из ЭМК, пруток диаметром 9 мм, полученный методом СПП, прутки и проволока диаметром до 0,3 мм (a); пресс-остаток, пруток диаметром 7 мм, полученный методом СЛИПП, прутки и проволока диаметром до 0,3 мм (b); промышленные партии проволоки диаметром 0,5 мм (c)



a



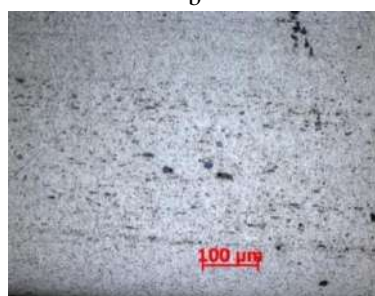
b



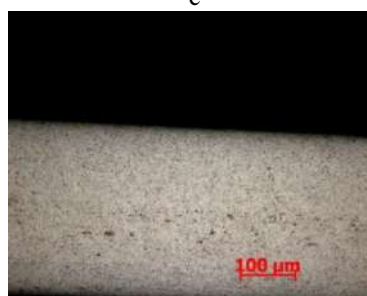
c



d



e



f

Fig. 8. Microstructure of wires from alloy 01417, obtained via the CRE method (a, b) and the CCRE method (c–f), with a diameter of: a is 2.7 mm; b is 0.8 mm; c is 2.0 mm; d is 1.0 mm; e is 0.6 mm; f is 0.3 mm

Рис. 8. Микроструктура проволок из сплава 01417, полученных методом СПП (a, b) и методом СЛИПП (c–f), диаметром: a – 2,7 мм; b – 0,8 мм; c – 2,0 мм; d – 1,0 мм; e – 0,6 мм; f – 0,3 мм

The results of changing the mechanical properties of deformed semifinished products by technological stage are presented in Table 4. Their analysis revealed that wires obtained via the CCRE method have greater

strength properties with the same plastic characteristics than those obtained via the CRE method. Thus, the 01417 alloy wire obtained by the proposed technologies via combined methods of thermal deformation processing has

a regulated structure and mechanical properties in accordance with current standards.

At the final stage of the research, the electrical resistance of the obtained semifinished products was measured via a "Vitok" measuring device. Measurements of the electrical resistance of deformed semifinished products obtained by various technologies revealed that the values of this parameter are in the range of 0.031–0.033 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. Thermal stability studies have shown that at a temperature of 250 °C, the tensile strength is 160 MPa, whereas at a temperature of 20 °C, it is 170 MPa. Thus, at a temperature of 250 °C, the strength decreases by only 6%, which means that the heat resistance of the obtained products is quite high. Electric conductors were made from experimental batches of wire from alloy 01417. The results of scientific research, which consists of the development of a technology for producing longish semifinished products from high-alloy alloys of the Al-REM system intended for the production of wire for electrical purposes, can improve its efficiency.

Conclusions

Thus, after performing the research, the following main results were obtained:

The use of a CRE with one driven roll is advisable when the task is to reduce the dimensions of the unit and its cost, as well as the energy and power costs of the process.

Modelling of the metal shaping and temperature–velocity conditions was carried out during an asymmetric CRE process with one driven roll in the DEFORM 3D soft-

ware package, which made it possible to select velocity, temperature, and deformation parameters. An analysis of the temperature conditions typical for the asymmetric CRE scheme with one driven roll made it possible to identify the optimal temperature range for heating billets and heating the extruding and roll tools.

Metallographic studies of the structure were carried out. The mechanical properties of cast and deformed semifinished products from alloy 01417 were determined at different stages of combined processing according to two technological schemes using the CRE and CCRE methods, and it was found that the semifinished products have a high level of strength and plastic characteristics.

The proposed technological regimes provide the regulated structure and properties of wires made of alloy 01417 at the given temperature–speed and deformation parameters of the process in accordance with the requirements of current standards, as well as satisfactory values of electrical resistance and thermal stability.

On the basis of the results of this research, it can be concluded that, to obtain semifinished products, which are subject to increased requirements for microstructure, applying the CRE method using a billet obtained in the EMM is more expedient. If there are no such requirements for semifinished products, applying the CCRE method is more expedient. Batches of wire from alloy 01417 obtained via two methods of combined processing have passed pilot testing and are recommended for the manufacture of electrical conductors.

Table 4. Results of the mechanical tests of the products from alloy 01417
Таблица 4. Результаты механических испытаний изделий из сплава 01417

Semifinished product	Sample diameter or size, mm	Mechanical properties	
		A, %	UTS, MPa
CRE			
Hot-extruded rod	5.0	15.5	140
	7.0	19.0	160
	9.0	28.0	170
Rod after sectional rolling	3.7×3.7	12.0	200
	3.1×3.1	11.0	210
	2.4×2.4	10.5	220
	2.2×2.2	9.4	230
	1.3×1.3	2.7	250
Wire after drawing	1.0	2.5	320
	0.7	1.5	385
	0.3	0.8	410
CCRE			
Hot-extruded rod	5.0	12.0	240
	7.0	13.0	230
	9.0	13.5	210
Rod after sectional rolling	3.7×3.7	12.0	200
	3.1×3.1	11.0	225
	2.4×2.4	10.5	250
	2.2×2.2	9.2	255
	1.3×1.3	5.6	290
Wire after drawing	1.0	4.2	390
	0.7	3.1	390
	0.3	0.7	400

References

- Gorbunov Ya.A. The Role and Prospects of Rare Earth Metals in the Development of Physical-Mechanical Characteristics and Applications of Deformable Aluminum Alloys. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2015;8(5):636-645. (In Russ.)
- Anthony W.H., Ashton F.R., Ball M.D., et al. *Aluminum: properties and physical metallurgy*. Moscow: Metallurgy, 1989, 423 p. (In Russ.)
- Belyy D.I. Aluminium alloys for leads of cable products. *Kabeli i Provoda* [Cables and wires] 2012;(1):8-15. (In Russ.)
- Sidelnikov S.B., Sokolov R.E., Voroshilov D.S., Motkov M.M. [et al]. Modeling the Process of Obtaining Bars from Aluminum Alloy 01417 by Combined Rolling-Extruding Method with Application of the Deform-3D Complex. *Key Engineering Materials*. 2020;(861):540-546. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.861.540
- Sidelnikov S.B., Voroshilov D.S., Pervukhin M.V., Motkov M.M. Development and research of technology for producing electrotechnical wire from alloys of the Al – REM system, obtained with the application of combined machining methods. *Tsvetnye metally*, 2019; (9):63-68. (In Russ.)
- Sidelnikov S.B., Voroshilov D.S., Motkov M.M. [et al]. Development of Combined Machining Modes, Investigation of Mechanical Properties and Structure of Deformed Semi-Finished Products from Alloy 01417. *Materials Science Forum*. 2020;992:498-503. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.992.498
- Yuliang Zhang, Feng Wei, Jian Mao, Guodong Niu. The difference of La and Ce as additives of electrical conductivity aluminum alloys. *Mater. Char.* 158, 109963 (2019).
- Feng W., Jian M., Chunfang L., Huohua L. Effect of trace elements La, Ti and homogenization on electrical properties of pure aluminum. *Rare Metal Mater. Eng.* 2018;47(11):3257-3263. DOI: 10.1016/S1875-5372(18)30229-7
- Du J., Ding D., Zhang W., Xu Z., Gao Y., Chen G., You X., Chen R., Huang Y. Effect of Ce addition on the microstructure and properties of Al-Cu-Mn-Mg-Fe lithium battery shell alloy. *Mater. Char.* 2018;142:252-260. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.05.049
- He Ya., Liu J., Qiu Sh., Deng Zh., Zhang J., Shen Ya. Microstructure evolution and mechanical properties of Al-La alloys with varying La contents. *Mater. Sci. Eng.* 2017;701:134-142. DOI: 10.1016/j.msea.2017.06.023
- Yang Q., Bu F.Q., Meng F.C., Qiu X., Zhang D.P., Zheng T., Liu X.J., Meng J. The improved effects by the combinative addition of lanthanum and samarium on the microstructures and the tensile properties of high-pressure die-cast Mg-4Al-based alloy. *Mater. Sci. Eng.: A*. 2015;628:319-326. DOI: 10.1016/j.msea.2015.01.050
- Jiang W., Fan Z., Dai Y., Li C. Effects of rare earth elements addition on microstructures, tensile properties and fractography of A357 alloy. *Mater. Sci. Eng.: A*. 2014;597:237-244. DOI: 10.1016/j.msea.2014.01.00
- Huang X., Yan H. Effect of trace La addition on the microstructure and mechanical property of as-cast ADC12 Al-Alloy. *J. Wuhan Univ. Technol.-Materials Sci. Ed.* 2013;28:202-205. DOI: 10.1007/S11595-013-0665-X
- Lv Ch.-L., Liao H., Liu Ye., Wang Q. Effect of Ce on castability, mechanical properties and electric conductivity of commercial purity aluminum. *China Foundry*. 2015;12:277-284.
- Cao X., Wang Sh., Wang Yi. The effect of annealing and aging on the high temperature internal friction spectra of Al-Ce alloy. *Mater. Sci. Eng.: B* 2009;163 (3):174-178. DOI: 10.1016/j.mseb.2009.05.030
- Yuan W., Liang Zh., Zhang Ch., Wei L. Effects of La addition on mechanical properties and thermal-resistant properties of Al-Mg-Si-Zr alloys based on AA6201. *Mater. Des.* 2012;34:788-792. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.07.003
- Yao D., Xia Y., Qiu F., Jiang Q. Effects of La addition on the elevated temperature properties of the casting Al-Cu alloy. *Mater. Sci. Eng.: A* 2011;528(3):1463-1466. DOI: 10.1016/j.msea.2010.10.046
- Tsai Y.C., Chou C.Y., Lee S.L., Lin C.K., Lin J.C., Lim S.W. Effect of trace La addition on the microstructures and mechanical properties of A356 (Al-7Si-0.35Mg) aluminum alloys. *J. Alloy. Comp.* 2009;487(1-2):157-162. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.07.183
- Lu T., Pan Y., Wu J., Tao S., Chen Y. Effects of La addition on the microstructure and tensile properties of Al-Si-Cu-Mg casting alloys. *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 2015;22:405-410.
- Liao H.C., Liu Y., Lu C.L., Wang Q.G. Effect of Ce addition on castability, mechanical properties and electric conductivity of Al-0.3Si-0.2 Mg alloy. *Int. J. Cast Metals Res.* 2015;28:213-220. DOI: 10.1179/1743133615Y.0000000002
- Vijeesh V., Prabhu K.N. The effect of addition of Ce and Sr on the solidification path of Al-8Si-2Cu alloy. *Trans. Indian Inst. Met.* 2015;68: 1119-1123. DOI: 10.1007/s12666-015-0656-z
- Li P., Wu Z., Wang Y., Gao X., Wang Z., Li Zh. Effect of cerium on mechanical performance and electrical conductivity of aluminum rod for electrical purpose. *J. Rare Earths* 2006;24(1):355-357. DOI: 10.1016/S1002-0721(07)60400-1
- Wan W., Han J., Li W., Wang J. Study of rare earth element effect on microstructures and mechanical properties of an Al-Cu-Mg-Si cast alloy. *Rare Met.* 2006;25:129-132. DOI: 10.1016/S1001-0521(08)60066-2
- Czerwinski F. Cerium in aluminum alloys. *Journal of Materials Science* 2020;55(1):24-72. DOI: 10.1007/s10853-019-03892-z

Список литературы

- Горбунов Ю. А. Роль и перспективы редкоземельных металлов в развитии физико-механических характеристик и областей применения деформируемых алюминиевых сплавов // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технология. 2015. № 8 (1). С. 636-645
- Алюминий: свойства и физическое металловедение / У.Х. Энтони, Ф.Р. Эштон, М.Д. Болл и др. М.: Металлургия, 1989. 423 с.
- Белый Д.И. Алюминиевые сплавы для токопроводящих жил кабельных изделий // Кабели и провода. 2012. №1. С. 8-15.

4. Modeling the Process of Obtaining Bars from Aluminum Alloy 01417 by Combined Rolling-Extruding Method with Application of the Deform-3D Complex / Sidelnikov S.B., Sokolov R.E., Voroshilov D.S., Motkov M.M. [et al] // *Key Engineering Materials*. 2020, no. 861, pp. 540-546. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.861.540
5. Development and research of technology for producing electrotechnical wire from alloys of the Al – REM system, obtained with the application of combined machining methods / Sidelnikov S.B., Voroshilov D.S., Pervukhin M.V., Motkov M.M. // *Tsvetnye metally*. 2019, vol. 9, pp. 63-68. (In Russ.)
6. Development of Combined Machining Modes, Investigation of Mechanical Properties and Structure of Deformed Semi-Finished Products from Alloy 01417 / Sidelnikov S.B., Voroshilov D.S., Motkov M.M. [et al] // *Materials Science Forum*. 2020, vol. 992, pp. 498-503. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.992.498
7. The difference of La and Ce as additives of electrical conductivity aluminum alloys / Yuliang Zhang, Feng Wei, Jian Mao, Guodong Niu // *Mater. Char.* 2019, vol. 158, 109963.
8. Effect of trace elements La, Ti and homogenization on electrical properties of pure aluminum / Feng W., Jian M., Chunfang L., Huihua L. // *Rare Metal Mater. Eng.* 2018, vol. 47, no. 11, pp. 3257-3263. DOI: 10.1016/S1875-5372(18)30229-7
9. Effect of Ce addition on the microstructure and properties of Al-Cu-Mn-Mg-Fe lithium battery shell alloy / Du J., Ding D., Zhang W., Xu Z., Gao Y., Chen G., You X., Chen R., Huang Y. *Mater. Char.* 2018, vol. 142, pp. 252-260. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.05.049
10. Microstructure evolution and mechanical properties of Al-La alloys with varying La contents / He Ya., Liu J., Qiu Sh., Deng Zh., Zhang J., Shen Ya // *Mater. Sci. Eng.* 2017, vol. 701, pp. 134-142. DOI: 10.1016/j.msea.2017.06.023
11. The improved effects by the combinative addition of lanthanum and samarium on the microstructures and the tensile properties of high-pressure die-cast Mg-4Al-based alloy / Yang Q., Bu F.Q., Meng F.C., Qiu X., Zhang D.P., Zheng T., Liu X.J., Meng J. // *Mater. Sci. Eng.: A*. 2015, vol. 628, pp. 319-326. DOI: 10.1016/j.msea.2015.01.050
12. Effects of rare earth elements addition on microstructures, tensile properties and fractography of A357 alloy / Jiang W., Fan Z., Dai Y., Li C. // *Mater. Sci. Eng.: A*. 2014, vol. 597, pp. 237-244. DOI: 10.1016/j.msea.2014.01.00
13. Huang X., Yan H. Effect of trace La addition on the microstructure and mechanical property of as-cast ADC12 Al-Alloy // *J. Wuhan Univ. Technol.-Materials Sci. Ed.* 2013, vol. 28, pp. 202-205. DOI: 10.1007/S11595-013-0665-X
14. Effect of Ce on castability, mechanical properties and electric conductivity of commercial purity aluminum / Lv Ch.-L., Liao H., Liu Ye., Wang Q. // *China Foundry*. 2015, vol. 12, pp. 277-284.
15. Cao X., Wang Sh., Wang Yi. The effect of annealing and aging on the high temperature internal friction spectra of Al-Ce alloy // *Mater. Sci. Eng.: B* 2009, vol. 163, no. 3, pp. 174-178. DOI: 10.1016/j.mseb.2009.05.030
16. Effects of La addition on mechanical properties and thermal-resistant properties of Al-Mg-Si-Zr alloys based on AA6201 / Yuan W., Liang Zh., Zhang Ch., Wei L. // *Mater. Des.* 2012, vol. 34, pp. 788-792. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.07.003
17. Effects of La addition on the elevated temperature properties of the casting Al-Cu alloy / Yao D., Xia Y., Qiu F., Jiang Q. // *Mater. Sci. Eng.: A* 2011, vol. 528, no. 3, pp. 1463-1466. DOI: 10.1016/j.msea.2010.10.046
18. Effect of trace La addition on the microstructures and mechanical properties of A356 (Al-7Si-0.35Mg) aluminum alloys / Tsai Y.C., Chou C.Y., Lee S.L., Lin C.K., Lin J.C., Lim S.W. // *J. Alloy. Comp.* 2009, vol. 487, no. 1-2, pp. 157-162. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.07.183
19. Effects of La addition on the microstructure and tensile properties of Al-Si-Cu-Mg casting alloys / Lu T., Pan Y., Wu J., Tao S., Chen Y. // *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 2015, vol. 22, pp. 405-410.
20. Effect of Ce addition on castability, mechanical properties and electric conductivity of Al-0.3Si-0.2 Mg alloy / Liao H.C., Liu Y., Lu C.L., Wang Q.G. // *Int. J. Cast Metals Res.* 2015, vol. 28, pp. 213-220. DOI: 10.1179/1743133615Y.0000000002
21. Vijeesh V., Prabhu K.N. The effect of addition of Ce and Sr on the solidification path of Al-8Si-2Cu alloy // *Trans. Indian Inst. Met.* 2015, vol. 68, pp. 1119-1123. DOI: 10.1007/s12666-015-0656-z
22. Effect of cerium on mechanical performance and electrical conductivity of aluminum rod for electrical purpose / Li P., Wu Z., Wang Y., Gao X., Wang Z., Li Zh. // *J. Rare Earths* 2006, vol. 24, no. 1, pp. 355-357. DOI: 10.1016/S1002-0721(07)60400-1
23. Study of rare earth element effect on microstructures and mechanical properties of an Al-Cu-Mg-Si cast alloy / Wan W., Han J., Li W., Wang J. // *Rare Met.* 2006, vol. 25, pp. 129-132. DOI: 10.1016/S1001-0521(08)60066-2
24. Czerwinski F. Cerium in aluminum alloys // *Journal of Materials Science*. 2020, vol. 55, no. 1, pp. 24-72. DOI: 10.1007/s10853-019-03892-z

Поступила 28.01.2025; принята к публикации 07.03.2025; опубликована 28.03.2025
Submitted 28/01/2025; revised 07/03/2025; published 28/03/2025

Denis S. Voroshilov – PhD (Eng.), Head of Department Metal Forming,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: d.s.voroshilov@gmail.com. ORCID 0000-0002-1406-3665

Ворошилов Денис Сергеевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой ОМД,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: d.s.voroshilov@gmail.com. ORCID 0000-0002-1406-3665

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 549:54.055

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-54-61



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ CoCrFeMnNi МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Шуберт А.В., Коновалов С.В., Панченко И.А.

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Высокоэнтропийные сплавы являются перспективными материалами благодаря своим уникальным физико-механическим свойствам, что делает их привлекательными для использования в авиационной, энергетической и других высокотехнологичных отраслях. Однако термические характеристики высокоэнтропийных сплавов, особенно их фазовые превращения и стабильность при высоких температурах, остаются недостаточно изученными. Сплав CoCrFeMnNi, представляющий собой один из наиболее известных высокоэнтропийных сплавов, требует детального исследования его термодинамических свойств для оптимизации применения в промышленности. **Цель работы.** Основной целью исследования является детальное изучение термических свойств сплава CoCrFeMnNi с помощью метода дифференциального термического анализа. **Используемые методы.** Для исследования использован метод дифференциального термического анализа, который позволяет измерять тепловые эффекты, сопровождающие фазовые превращения в сплавах при нагреве и охлаждении. Объектами исследования служили пять образцов сплава с варьирующимся содержанием Fe и Mn. **Новизна.** Исследование термических свойств сплава CoCrFeMnNi с использованием дифференциального термического анализа проводится впервые, что позволяет выявить фазовые изменения и поведение теплового потока для различных концентраций элементов. **Результат.** Были получены данные, описывающие фазовые переходы и структурные изменения при плавлении и кристаллизации сплавов с различными содержаниями Fe и Mn. В ходе анализа установлены характерные температурные и временные параметры этих процессов. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации состава высокоэнтропийных сплавов, применяемых в различных отраслях, требующих высокой теплоустойчивости и устойчивости к деформациям, а также для разработки новых материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, сплав CoCrFeMnNi, дифференциальный термический анализ, фазовые переходы, термические характеристики, железо, марганец, кобальт, хром, никель

Исследование выполнено за счет средств ФГБОУ ВО «СибГИУ», договор № 165/2024/НиИД от 29 мая 2024 года.

© Шуберт А.В., Коноваов С.В., Панченко И.А., 2025

Для цитирования

Шуберт А.В., Коновалов С.В., Панченко И.А. Исследование термических свойств системы высокоэнтропийных сплавов на основе CoCrFeMnNi методом дифференциального термического анализа // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 54-61. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-54-61>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

STUDY OF THE THERMAL PROPERTIES OF HIGH-ENTROPY ALLOYS SYSTEM BASED ON CoCrFeMnNi BY DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS

Shubert A.V., Konovalov S.V., Panchenko I.S.

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). High-entropy alloys are promising materials due to their unique physical and mechanical properties, making them attractive for use in aerospace, energy, and other high-tech industries. However, the thermal characteristics of high-entropy alloys, particularly their phase transformations and stability at high temperatures, remain insufficiently studied. The CoCrFeMnNi alloy, one of the most well-known high-entropy alloys, requires a detailed research of its thermodynamic properties to optimize its industrial applications. **Objectives.** The primary objective of this research is to conduct a detailed study of the thermal properties of the CoCrFeMnNi alloy using differential thermal analysis. **Methods Applied.** The differential thermal analysis method was applied to investigate the thermal effects accompanying phase transformations in the alloys during heating and cooling. The objects of the study were five alloy samples with varying Fe and Mn content. **Originality.** This is the first time that the thermal properties of the CoCrFeMnNi alloy have been studied using differential thermal analysis, allowing for the identification of phase changes and heat flow behavior for different concentrations of elements. **Result.** Data describing phase transitions and structural changes during the melting and crystallization of alloys with varying Fe and Mn content were obtained. The characteristic temperature and time parameters of these processes were established. **Practical Relevance.** The study results can be used to optimize high-entropy alloys compositions for various industries requiring high heat resistance and deformation stability, as well as for the development of new materials with improved performance characteristics.

Keywords: high-entropy alloys, CoCrFeMnNi, differential thermal analysis, phase transitions, thermal characteristics, iron, manganese, cobalt, chromium, nickel

The study was carried out at the expense of the SibSIU Federal State Budgetary Educational Institution, contract No. 165/2024/NiIDot 29 May 2024.

For citation

Shubert A.V., Konovalov S.V., Panchenko I.S. Study of the Thermal Properties of High-Entropy Alloys System Based on CoCrFeMnNi by Differential Thermal Analysis. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 54-61. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-54-61>

Введение

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС), обладающие необходимыми физико-механическими и эксплуатационными характеристиками, представляют собой материалы, состоящие из пяти и более элементов в равных или близких концентрациях [1, 2]. Оценка потенциальных химических составов ВЭС является сложной задачей, так как каждая комбинация элементов формирует уникальные свойства и структуры, что приводит к огромному числу возможных составов. Увеличение числа элементов также повышает взаимную растворимость, облегчая образование однофазных твердых растворов [3].

Одним из наиболее изученных сплавов является CoCrFeNiMn, или сплав Кантора [4, 5]. Он привлекает внимание благодаря выдающейся пластичности при высоких и криогенных температурах, что делает его перспективным для отраслей, требующих высокой стойкости к деформациям [6].

Исследование высокоэнтропийных сплавов требует применения различных аналитических методов для оценки их термических и структурных свойств. Одним

из таких методов является дифференциальный термический анализ (ДТА), который позволяет изучить изменения теплового потока в материалах при нагреве или охлаждении [7]. ДТА — метод, изучающий физические и химические процессы, связанные с тепловыми эффектами. Суть метода заключается в измерении разности температур между исследуемым и эталонным образцами при их одновременном нагреве или охлаждении. Эталонном служит инертное вещество с похожими теплофизическими свойствами, которое не претерпевает изменений в заданном диапазоне температур. Разница температур обусловлена эндо- или экзотермическими реакциями в исследуемом образце [8].

Метод дифференциального термического анализа обладает рядом достоинств, которые делают его незаменимым в изучении термических процессов и фазовых переходов в различных материалах. Он позволяет точно фиксировать тепловые эффекты, такие как эндо- и экзотермические реакции, что даёт возможность оценить теплостойкость сплавов, а также изучить их структурные изменения при нагреве. Например, ДТА успешно применён для анализа спечённых твёрдых сплавов, что позволило выявить высокую теплостойкость и прогно-

зировать хорошие эксплуатационные свойства этих материалов [9].

Кроме того, метод эффективен при исследовании органических соединений, где он помогает определить пределы термоустойчивости, фазовые переходы и деструктивные процессы. Это подтверждают результаты, полученные при анализе алкилстирилкетон и азометиновых соединений, где ДТА позволил выявить их плавление и окисление, а также рассчитать тепловые эффекты [10]. Технологические и научные применения метода включают не только металлы и органические соединения, но и процессы дегидратации в цементах, где он демонстрирует изменения в структурах при термической обработке [11].

Цель данного исследования – детальное изучение термических свойств сплава CoCrFeMnNi с помощью ДТА. Этот сплав, известный как сплав Кантора, был выбран из-за его высокой пластичности, устойчивости к деформациям и износу.

Данный сплав был выбран для исследования в силу его длительного изучения в научной базе Сибирского государственного индустриального университета, где активно исследуются его механические свойства, стабильность, микроструктура и фазовый состав [12, 13]. Однако термические свойства сплава остаются недостаточно изученными, что и обосновывает наш выбор. В других научных учреждениях, таких как Институт структурной макрокинетики РАН, проводились исследования термической стабильности сплава Кантора (CoCrFeNiMn) при длительном отжиге, выявившие изменения фазового состава [14]. В Институте физики прочности и материаловедения СО РАН исследовали структуру и механические свойства сплава FeCrMnNiCo_{0.85}Co_{0.15} после термомеханической обработки [15].

Тем не менее метод дифференциального термического анализа для данного сплава ранее не применялся, что делает наше исследование актуальным и полезным для дальнейшего понимания его термодинамических характеристик. Исследование выполнено за счет средств ФГБОУ ВО «СибГИУ», договор № 165/2024/НийД от 29 мая 2024 года.

Материалы и методы исследования

Для проведения ДТА высокоэнтропийных сплавов системы CoCrFeMnNi была использована следующая методика эксперимента.

Исследование проводилось на пяти ранее полученных образцах сплава, изготовленных методом литья. В этих образцах варьировалось процентное содержание железа (Fe) и марганца (Mn) в пределах от 5 до 30%, при этом хром (Cr), кобальт (Co) и никель (Ni) присутствовали в неизменных долях — по 20% каждого. Образцы, обрезанные до размеров приблизительно 5×2×2 мм, были подготовлены в Научно-производственном центре «Сварочные процессы и технологии» в СибГИУ и использовались для последующего анализа.

Эксперимент проводился в Центре коллективного пользования «Материаловедение» на базе СибГИУ. Для

анализа использовался прибор Setaram LabSys, предназначенный для синхронного термического анализа, который позволяет одновременно измерять температуру и тепловой поток. Нагрев осуществлялся с контролируемой скоростью 20°C в минуту, при этом максимальная температура достигала 1550°C.

Данный дифференциальный термический анализ сплава был проведен в среде аргона, поскольку данная инертная атмосфера обеспечивает защиту образца от окислительных процессов, которые могут существенно исказить результаты исследования. Аргон, как инертный газ, не вступает в химические реакции с компонентами сплава, что позволяет получить более точные данные.

Полученные данные были проанализированы на предмет фазовых переходов, включая плавление и кристаллизацию. Несмотря на нечеткость некоторых результатов, все наблюдения были документированы для дальнейшего обсуждения и анализа.

Полученные результаты и их обсуждение

На приведенных графиках (рис. 1–5) представлены результаты дифференциального термического анализа, позволяющие исследовать термическое поведение образца. Графики содержат несколько шкал: температура образца, выраженная в градусах Цельсия (°C), демонстрирует изменение температуры во время анализа; ТГ-кривая показывает потерю массы образца в миллиграммах (мг) в зависимости от температуры. Шкала теплового потока, выраженная в микровольтах (мкВ), отображает тепловые эффекты, такие как эндо- или экзотермические реакции. Наконец, шкала времени, выраженная в минутах, показывает продолжительность эксперимента, позволяя наблюдать временные интервалы возникновения тех или иных реакций.

Дифференциальный анализ сплава 20Co20Cr25Fe10Mn20Ni (см. рис. 1) показывает следующие этапы. При нагреве от 27,21 до 139,09°C график теплового потока плавно снижается, указывая на поглощение тепла. На 7,72 минуте при 139,09°C наблюдается небольшое повышение теплового потока, что может свидетельствовать о начальных фазовых изменениях. На 75 минуте при 1382°C сплав достигает самой низкой точки на графике, завершая процесс плавления. Резкий подъем до 1508°C на 83 минуте связан с дальнейшей гомогенизацией компонентов. На 91 минуте при 1350°C происходит резкий спад, вероятно вызванный структурными изменениями в расплаве. К 156 минуте при 124°C сплав начинает остывать, переходя в твердое состояние. Температурные скачки и плавные изменения связаны с фазовыми превращениями и рекристаллизацией внутри сплава.

Дифференциальный анализ сплава 20Co20Cr30Fe10Mn20Ni (см. рис. 2) показывает характерные тепловые процессы при нагреве. Начиная с комнатной температуры (24°C), график теплового потока показывает резкий подъем на 64 минуте при 1234°C, что указывает на начало частичного плавления. Сразу после этого происходит спад, указывающий на завершение этого фазового перехода. На 72 минуте при 1347°C гра-

фик достигает самой низкой точки, что свидетельствует о полном плавлении сплава. Затем на 73 минуте при 1365°C график вновь поднимается, вероятно из-за гомогенизации расплава. Колебания теплового потока до 96 минуты и резкий подъем могут быть связаны с микроизменениями структуры. Окончательное охлаждение и затвердевание происходит к 147 минуте при 150°C. Эти изменения отражают фазовые переходы и структурные перестройки в ходе нагрева и плавления сплава.

Дифференциальный анализ сплава 20Co20Cr15Fe25Mn20Ni (см. рис. 3) показывает следующие этапы: с начальной температуры 30°C график

плавно снижается, отражая обычное поглощение тепла. На 62 минуте при 1200–1207°C наблюдается резкий скачок, что может указывать на частичное плавление или перестройку структуры. Затем на 67 минуте при 1278°C сплав достигает минимальной точки, свидетельствуя о завершении плавления. Подъем на 69 минуте до 1300°C может быть связан с перераспределением элементов, а на 86 минуте график снова снижается до 1551°C, за чем следует подъем до 1306°C на 97 минуте, отражающий дальнейшие изменения в структуре. Окончание эксперимента фиксируется на 147 минуте при 148°C, указывая на охлаждение и затвердевание сплава.

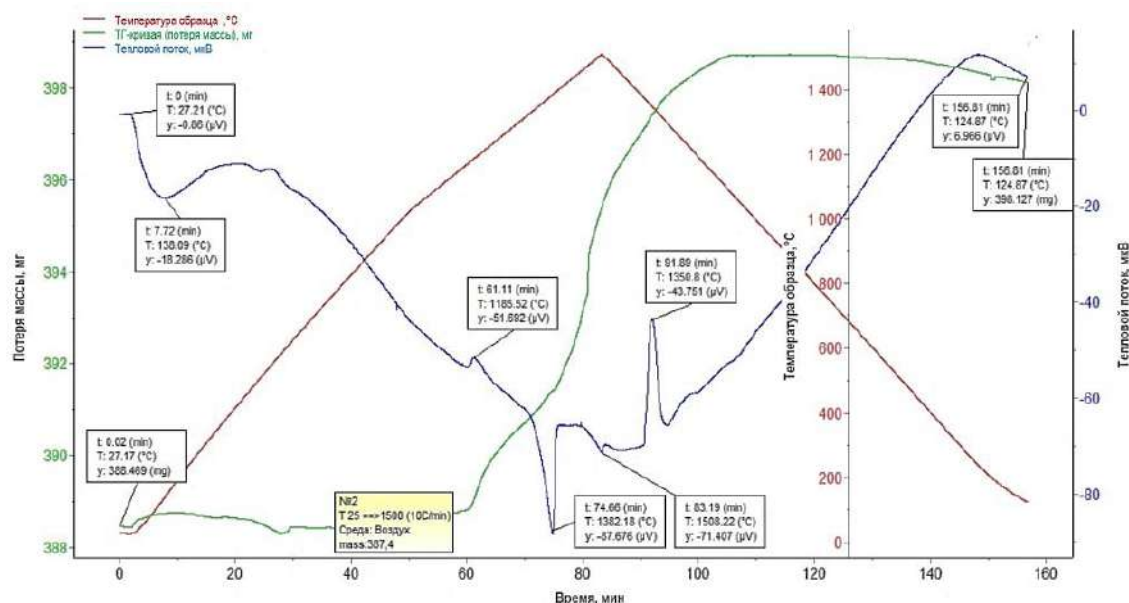


Рис. 1. Результаты дифференциального термического анализа сплава 20Co20Cr25Fe10Mn20Ni

Fig. 1. Results of differential thermal analysis of alloy 20Co20Cr25Fe10Mn20Ni

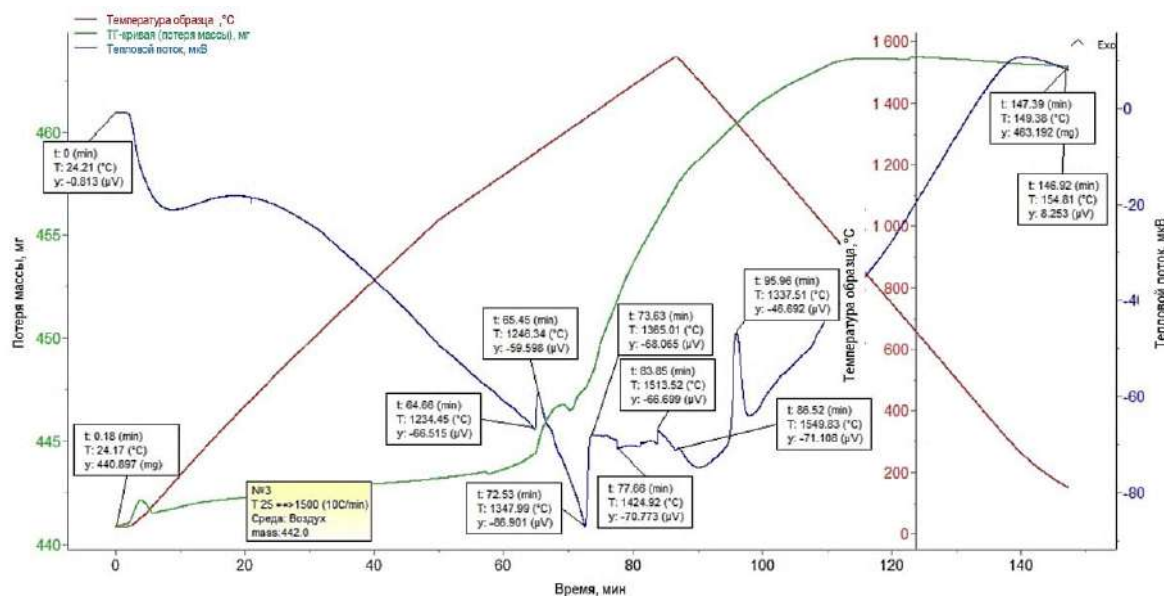


Рис. 2. Результаты дифференциального термического анализа сплава 20Co20Cr30Fe10Mn20Ni

Fig. 2. Results of differential thermal analysis of alloy 20Co20Cr30Fe10Mn20Ni

Дифференциальный анализ сплава 20Co20Cr10Fe30Mn20Ni (см. рис. 4) показал, что с начальной температуры 22°C график плавно снижается, отражая поглощение тепла. На 63 минуте наблюдается скачок, связанный с перераспределением элементов, а на 65 минуте при 1249°C начинается процесс плавления. Резкий подъем на 67 минуте при 1270°C указывает на активные фазовые превращения. На 86 минуте при 1553°C завершилось основное плавление сплава. Далее на 99 минуте при 1262°C произошло резкое падение, возможно из-за испарения компонентов, а к 147 минуте при 150°C началось охлаждение и затвердевание сплава.

Дифференциальный анализ сплава 20Co20Cr5Fe35Mn20Ni (см. рис. 5) показал, что с начальной температуры 23°C тепловой поток плавно снижался, отражая поглощение тепла. На 7 минуте наблюдался небольшой скачок, вероятно связанный с незначительными перестройками в сплаве. На 62 минуте при 1197°C начался резкий подъем теплового потока, достигший пика на 63 минуте при 1214°C, что свидетельствует о фазовом переходе и частичном плавлении. Плавное снижение до 1467°C на 80 минуте указывает на более равномерное плавление. Подъем на 98 минуте при 1283°C свидетельствует о дальнейшей гомогенизации расплава, после чего к 147 минуте (150°C) началось его охлаждение и затвердевание.

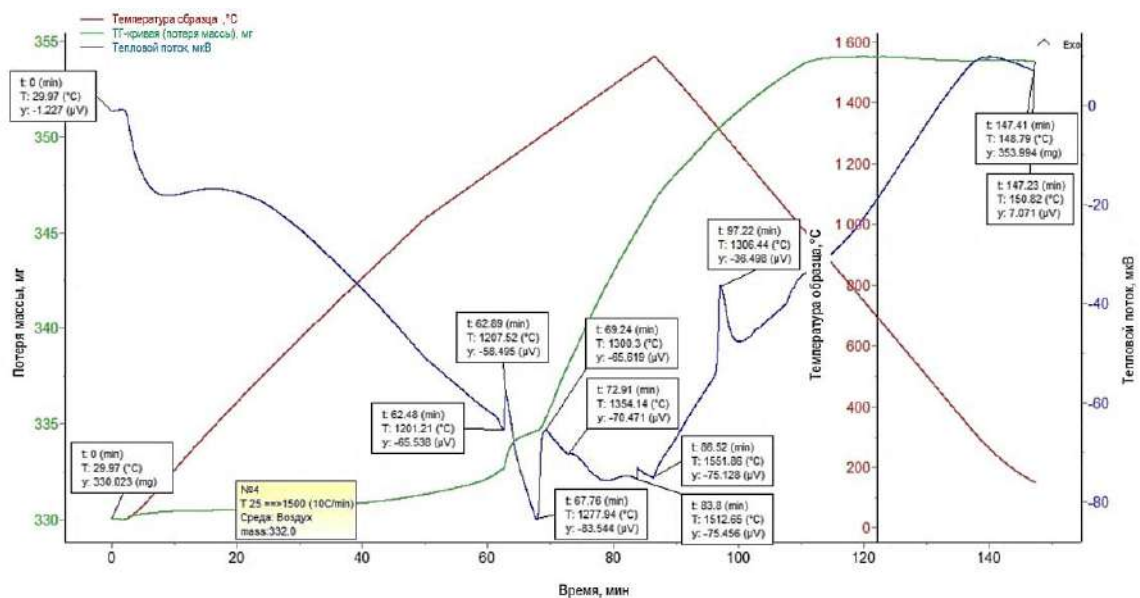


Рис. 3. Результаты дифференциального термического анализа сплава 20Co20Cr15Fe25Mn20Ni
Fig. 3. Results of differential thermal analysis of alloy 20Co20Cr15Fe25Mn20Ni

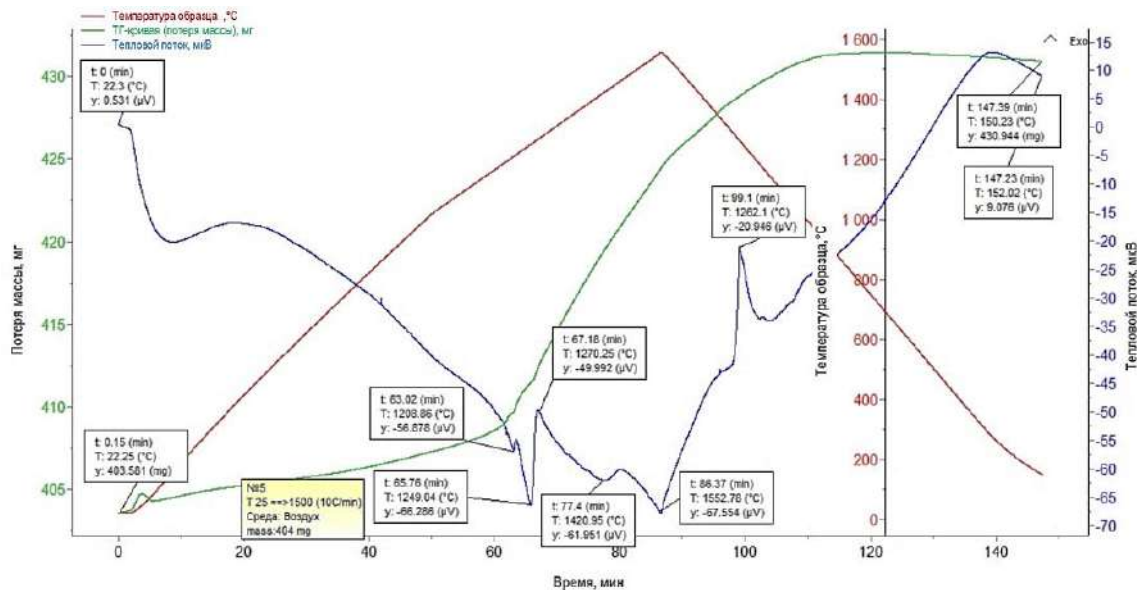


Рис. 4. Результаты дифференциального термического анализа сплава 20Co20Cr10Fe30Mn20Ni
Fig. 4. Results of differential thermal analysis of alloy 20Co20Cr10Fe30Mn20Ni

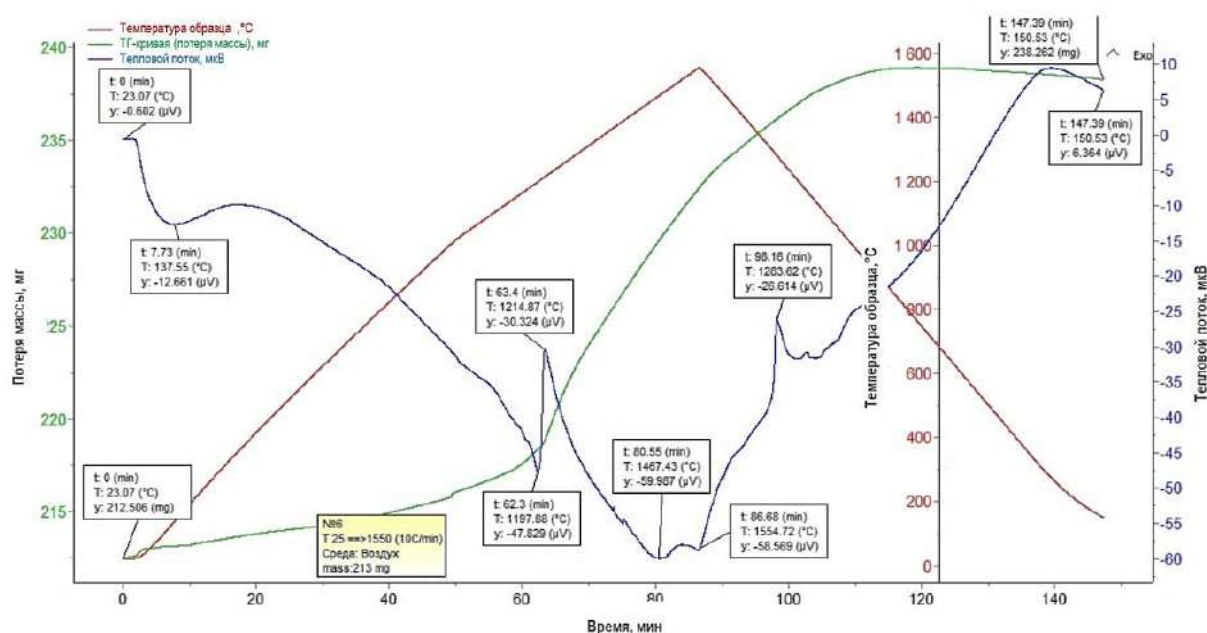


Рис. 5. Результаты дифференциального термического анализа сплава 20Co20Cr5Fe35Mn20Ni
Fig. 5. Results of differential thermal analysis of alloy 20Co20Cr5Fe35Mn20N

В ходе дифференциального анализа было установлено, что основные различия заключаются в поведении теплового потока для разных составов сплавов при изменении температуры и времени нагрева. Это указывает на вариативность процессов плавления, фазовых преобразований и перераспределения элементов в сплавах с различным содержанием Fe и Mn. Например, изменения в температуре начала плавления, скорость фазовых переходов, а также характер и продолжительность гомогенизации различались для каждого состава, что подтверждает влияние состава сплава на его термическое поведение и структуру.

Резкие скачки теплового потока могут указывать на изменения в микроструктуре или фазовом составе сплавов. Каждая система демонстрировала специфические температурные интервалы, при которых наблюдались фазовые превращения и изменение тепловых характеристик. Наглядное сравнение свойств исследуемых образцов с различным содержанием Fe и Mn представлены в **таблице**.

Закключение

Для всех исследованных сплавов наблюдаются резкие температурные скачки, свидетельствующие о сложных фазовых изменениях и перераспределении элементов. Сплавы с более высоким содержанием Fe демонстрируют более значительные температурные колебания. В образцах с высоким содержанием Fe минимальные температуры фиксируются на более ранних этапах (63–65 минутах), что может указывать на их плавление при более низких температурах. Это подтверждается данными дифференциального анализа, где температура плавления всех образцов оказалась ниже температур плавления чистого железа (1537°C) и марганца (1246°C). Например, в сплаве с 25% Fe и 10% Mn процесс плавления завершился при 1382°C, что ниже температуры плавления железа, а в сплавах с 15–35% Fe плавление начиналось при 1200–1249°C, что приближено к температуре плавления марганца.

Таблица. Сравнительный анализ термических характеристик образцов CoCrFeMnNi
Table. Comparative analysis of the mechanical characteristics of CoCrFeMnNi samples

Образец	Начальная температура, °C	Первая минимальная точка, °C	Время, мин	Первая максимальная точка, °C	Время, мин	Вторая минимальная точка, °C	Время, мин	Финальная точка, °C	Время, мин
20Co20Cr25Fe15Mn20Ni	30	1278	67	1300	69	1551	86	148	147
20Co20Cr30Fe10Mn20Ni	27,21	1382	75	1508	83	1350	91	124	156
20Co20Cr15Fe25Mn20Ni	30	1278	67	1300	69	1551	86	148	147
20Co20Cr10Fe30Mn20Ni	22	1249	65	1270	67	1467	80	150	147
20Co20Cr5Fe35Mn20Ni	23	1197	62	1214	63	1467	80	150	147

Финальные точки для всех сплавов остаются относительно близкими, что свидетельствует о сходных процессах охлаждения после завершения фазовых переходов. Зависимость температурного поведения сплавов от их химического состава показывает, что изменения в содержании элементов, таких как Fe, Mn, Cr, Co и Ni, значительно влияют на температурные характеристики сплавов, включая фазовые переходы, тепловой поток и распределение энергии при нагревании. Сплавы с высоким содержанием Fe демонстрируют более ранние минимальные температуры и стабильные фазовые изменения. Увеличение доли Mn приводит к большему числу фазовых переходов при высоких температурах и более сложному температурному поведению. Таким образом, температурное поведение сплавов находится в прямой зависимости от процентного содержания каждого элемента. Сплавы с повышенным содержанием железа и марганца демонстрируют более сложные и ранние фазовые изменения, тогда как хром, кобальт и никель обеспечивают более стабильное поведение при высоких температурах.

Список источников

1. Yeh J.-W. Alloy Design Strategies and Future Trends in High-Entropy Alloys // JOM. 65 545 (2013), pp. 1759–1771. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0761-6>.
2. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. Highentropy alloys // Nat. Rev. Mater. 2019, no. 4, pp. 515–534. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0121-4>. 551.
3. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов // Физика металлов и материаловедение. 2020. Т. 121, № 8. С. 807–841. DOI: 10.31857/S0015323020080094. EDN REFBUL.
4. Cantor B. Multicomponent high-entropy Cantor alloys // Progress in Materials Science. 2021, vol. 120, pp. 1–36. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100754.
5. Nanomechanical behavior of CoCrFeMnNi high-entropy alloy / S. Mridha, S. Das, S. Aouadi, S. Mukherjee, R.S. Mishra // JOM Journal of the Minerals Metals and Materials Society. 2015, vol. 67, iss. 10, pp. 2296–2302. DOI: 10.1007/s11837-015-1566-6.
6. Zaddach A.J., Scattergood R.O., Koch C.C. Tensile properties of low-stacking fault energy highentropy alloys // Materials Science and Engineering. 2015, vol. 636, pp. 373–378. DOI: 10.1016/j.msea.2015.03.109.
7. Мошенский Ю.В. Метод моделей в дифференциальном термическом анализе // Вестник Самарского государственного технического ун-та. Серия: Физико-математические науки. 2001. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-modeley-v-differentsialnom-termicheskom-analize>
8. Егунов В.П. Введение в термический анализ. Самара: ПО «СамВен», 1996. 270 с. EDN TOPBCX.
9. Яняк С.В., Комиссарова И.И. Исследование теплоустойчивости твердых сплавов методом дифференциального термического анализа // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. 2021. № 1(11). С. 27–31. EDN KTAEDN.
10. Куликов М.А. Исследование свойств замещенных алкилстирилкетонс и их азометинсвых производных методом дифференциального термического анализа // Вестник Технологического университета. 2019. Т. 22, № 12. С. 12–14. EDN QVPFLP.
11. Исследование гидросиликатсв цемента, модифицированных изомерными дисахаридами методом дифференциального термического анализа / Е.А. Шошин, Ю.Г. Ивашенко, А.В. Поляков, В.М. Буланов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1(39). С. 244–249. EDN YIOAZX.
12. Дробышев В.К., Панченко И.А., Коновалов С.В. Механические свойства и микроструктура сплавсв системы CoCrFeMnNi // Ползуновский вестник. 2024. № 2. С. 249–254. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.033. EDN OLJRHK.
13. Первопринципное исследование стабильности высокоэнтропийных сплавсв CoCrFe40-xMnxNi (x = 5, 10, 15, 20) / К. А. Осинцев, В. С. Панова, В. А. Кузнецова [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 4. С. 508–514. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.010. EDN JINQGC.
14. Эволюция фазового состава сплава кантора CoCrFeNiMn при длительном отжиге / Д.Ю. Ковалев, А.С. Рогачев, Н.А. Кочетов, С.Г. Вадченко // Физика металлов и материаловедение. 2022. Т. 123, № 11. С. 1232–1241. DOI: 10.31857/S0015323022600794. EDN ZTWBJS.
15. Влияние термической и термомеханической обработки на микроструктуру и механические свойства многокомпонентного сплава FeCrMnNiCo0.85C0.15 / Е.В. Мельников, С.В. Астафуров, К.А. Реунова [и др.] // Письма о материалах. 2021. Т. 11, № 4(44). С. 375–381. DOI: 10.22226/2410-3535-2021-4-375-381. EDN CQVBDH.

References

1. Yeh J.-W. Alloy Design Strategies and Future Trends in High-Entropy Alloys. JOM. 65 545 2013:1759-1771. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0761-6>.
2. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys. Nat. Rev. Mater. 2019;(4):515-534. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0121-4>.
3. Rogachev A.S. Structure, stability, and properties of high-entropy alloys. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of Metals and Metallography], 2020;121(8):807-841. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0015323020080094. EDN REFBUL.
4. Cantor B. Multicomponent high-entropy Cantor alloys. Progress in Materials Science. 2021;120:1-36. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100754.
5. Mridha S., Das S., Aouadi S., Mukherjee S., Mishra R.S. Nanomechanical behavior of CoCrFeMnNi high-entropy alloy. JOM Journal of the Minerals Metals and Materials Society. 2015;67(10):2296-2302. DOI: 10.1007/s11837-015-1566-6.
6. Zaddach A.J., Scattergood R.O., Koch C.C. Tensile properties of low-stacking fault energy high-entropy al-

- loys. Science and Engineering: A. 2015;636:373-378. DOI: 10.1016/j.msea.2015.03.109.
7. Moshchensky Y.V. Method of models in differential thermal analysis. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo un-ta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki* [Bulletin of Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Sciences], 2001;(12). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-modeley-v-differentsialnom-termicheskom-analize>. (In Russ.)
 8. Egunov V.P. *Vvedenie v termicheskiy analiz* [Introduction to thermal analysis]. Samara: SamVen, 1996, 270 p. (In Russ.) EDN TOPBCX.
 9. Yanyak S.V., Komissarova I.I. Study of heat resistance of solid alloys by the method of differential thermal analysis. *Vestnik Vologodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Vologda State University. Series: Technical Sciences], 2021;(1(11)):27-31. (In Russ.) EDN KTAEDN.
 10. Kulikov M.A. Study of properties of substituted alkylstyryl ketones and their azomethine derivatives by the method of differential thermal analysis. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Technological University], 2019;22(12):12-14. (In Russ.) EDN QVPFLP.
 11. Shoshin E.A., Ivashchenko Y.G., Polyakov A.V., Bulanov V.M. Study of cement hydrosilicates modified by isomeric disaccharides using the method of differential thermal analysis. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [News of the Kazan State University of Architecture and Engineering], 2017;(1(39)):244-249. (In Russ.) EDN YIOAZX.
 12. Drobyshev V.K., Panchenko I.A., Kononov S.V. Mechanical properties and microstructure of CoCrFeMnNi alloy system. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunov Bulletin], 2024;(2):249-254. (In Russ.) DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.033. EDN OLRJHK.
 13. Osintsev K.A., Panova V.S., Kuznetsova V.A., et al. First-line study of the stability of CoCrFe40-xMnxNi (x = 5, 10, 15, 20) high-entropy alloys. *Fundamentalnye problemy sovremennogo materialovedeniya* [Basic Problems of Material Science], 2023;20(4):508-514. (In Russ.) DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.010.
 14. Kovalev D.Y., Rogachev A.S., Kochetov N.A., Vadchenko S.G. Evolution of the phase composition of Cantor alloy CoCrFeNiMn during prolonged annealing. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of Metals and Metallography], 2022;123(11):1232-1241. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0015323022600794. EDN ZTWBJS.
 15. Melnikov E.V., Astafurov S.V., Reunova K.A., et al. Effect of thermal and thermomechanical treatment on the microstructure and mechanical properties of multicomponent FeCrMnNiCo0.85C0.15 alloy. *Pisma o materialakh* [Letters on Materials], 2021;11(4(44)):375-381. (In Russ.) DOI: 10.22226/2410-3535-2021-4-375-381. EDN CQVBDH.

Поступила 28.10.2024; принята к публикации 11.11.2024; опубликована 28.03.2025
Submitted 28/10/2024; revised 11/11/2024; published 28/03/2025

Шуберт Анна Владиславовна – аспирант кафедры обработки металлов давлением и материаловедения
ЕВРАЗ ЗСМК, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: shubert-anna@mail.ru. ORCID 0000-0001-7355-2955

Коновалов Сергей Валерьевич – доктор технических наук, профессор,
проректор по научной и инновационной деятельности,
Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: kononov@sibsiu.ru. ORCID 0000-0003-4809-8660

Панченко Ирина Алексеевна – кандидат технических наук,
заведующий научной лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений,
Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: i.r.i.ss@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1631-9644

Anna V. Shubert – Postgraduate Student at the Department of Metal Forming and Materials Science,
EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: shubert-anna@mail.ru. ORCID 0000-0001-7355-2955

Sergey V. Kononov – DrSc (Eng.), Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities,
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: kononov@sibsiu.ru. ORCID 0000-0003-4809-8660

Irina A. Panchenko – PhD (Eng.), Head of the Scientific Laboratory of Electron Microscopy
and Image Processing,
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: i.r.i.ss@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1631-9644

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.771:621.785.3

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-62-72



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СФЕРОИДИЗИРУЮЩЕГО ОТЖИГА БУНТОВОГО ПРОКАТА ИЗ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ

Савченко С.А.¹, Ковалёва И.А.¹, Астапенко И.В.², Сычков А.Б.³

¹Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания», Жлобин, Беларусь

²Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Гомель, Беларусь

³Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Для получения структуры зернистого перлита применяется сфероидизирующий отжиг стали. Сфероидизация цементитных пластин протекает в два этапа: деление карбидных составляющих на части и собственно сфероидизация. Трансформация пластинчатого перлита происходит при длительных временных выдержках (от 2–4 ч и более) при температурах сфероидизации ($A_1 \approx 727^\circ\text{C}$). Это вызвано, в первую очередь, двухэтапным протеканием процесса. Процесс сфероидизации влияет не только на форму, но и на размер карбидов. Для получения необходимого размера глобул цементита контролируется скорость нагрева и охлаждения, а для окончания процесса трансформации – время выдержек при определенных изотермических температурах. В статье представлены результаты исследования влияния длительности временных выдержек при циклическом (маятниковом) сфероидизирующем отжиге бунтового проката из подшипниковой стали ШХ15 на степень полноты трансформации пластинчатого перлита в зернистый. Исследования проводились на катанке диаметром 6,5 мм, прокатанной по усовершенствованному режиму, позволяющему получить исходную мелкодисперсную перлитную структуру с межпластинчатым расстоянием 0,126–0,235 мкм и размером пластин цементита не более 0,08 мкм. Цель работы заключалась в определении влияния времени изотермических выдержек при циклическом сфероидизирующем отжиге на полноту и качество трансформации пластинчатого в зернистый перлит. При этом использовались четыре экспериментальных режима со временем изотермических циклических выдержек на 10, 25, 50 и 75% (соответственно режимы № 1–4) меньше действующего режима. Установлено, что режимы № 1–3 позволяют получить 100%-ю сфероидизацию пластинчатого перлита катанки. В режиме № 4 эффект формирования структуры 100% зернистого перлита не достигнут, однако дробления пластин цементита не выявлено, что свидетельствует об одноэтапном процессе сфероидизации.

Ключевые слова: подшипниковая сталь, сфероидизирующий отжиг, исходная структура, пластинчатый перлит, маятниковый (циклический) отжиг, время циклических изотермических выдержек, обезуглероженный слой, цементитные пластины и глобулы

© Савченко С.А., Ковалёва И.А., Астапенко И.В., Сычков А.Б., 2025

Для цитирования

Совершенствование технологии сфероидизирующего отжига бунтового проката из подшипниковой стали / Савченко С.А., Ковалёва И.А., Астапенко И.В., Сычков А.Б. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 62–72. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-62-72>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ENHANCING SPHEROIDIZING ANNEALING TECHNOLOGY OF ROLLED PRODUCTS IN COILS FROM BEARING STEEL

Savchenko S.A.¹, Kovaliova I.A.¹, Astapenko I.V.², Sychkov A.B.³

¹Belarusian Steel Works, the management company of the Belarusian Metallurgical Company holding, Zhlobin, Belarus

²Pavel Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Belarus

³Nosov Magnitogorsk state technical university, Magnitogorsk, Russia

Abstract. To obtain the structure of granular pearlite, spheroidizing annealing of steel is used. Spheroidization of cementite plates occurs in two stages: division of carbide components into parts and spheroidization itself. Transformation of lamellar pearlite occurs during long-term exposure (from 2-4 hours and more) at spheroidization temperatures ($A_1 \approx 727^\circ\text{C}$). First of all, this is caused by the two-stage process. The spheroidization process affects not only the shape, but also the size of the carbides. To obtain the required size of cementite globules, the heating and cooling rate is controlled, and to complete the transformation process, the exposure time at certain isothermal temperatures is controlled. The article presents the study results of the influence of the holding time duration during cyclic (pendulum) spheroidizing annealing of rolled products in coils made of ShH15 bearing steel on the degree of transformation completeness of lamellar pearlite into granular one. The studies were carried out on wire rod with a diameter of 6.5 mm, rolled according to an improved mode, which makes it possible to obtain an initial fine pearlite structure with an interplate distance of 0.126-0.235 μm and a cementite plate size of no more than 0.08 μm . The purpose of the work was to determine the effect of isothermal holding time during cyclic spheroidizing annealing on the completeness and quality of carbide plates into granular pearlite transformation. In this case, four experimental modes were used with isothermal cyclic exposure times 10, 25, 50 and 75% (modes No. 1–4, respectively) less than the current mode. It has been established that modes No. 1-3 make it possible to obtain 100% spheroidization of wire rod lamellar pearlite. In mode No. 4, the effect of forming a structure of 100% granular pearlite was not achieved, however, crushing of cementite plates was not detected, which indicates a one-stage spheroidization process.

Keywords: bearing steel, spheroidizing annealing, initial structure, lamellar pearlite, pendulum (cyclic) annealing, time of cyclic isothermal exposures, decarburized layer, cementite plates and globules

For citation

Savchenko S.A., Kovaliova I.A., Astapenko I.V., Sychkov A.B. Enhancing Spheroidizing Annealing Technology of Rolled Products in Coils from Bearing Steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 62-72. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-62-72>

Введение

Подшипниковые марки стали для обработки давлением и резанием должны иметь в исходном состоянии структуру зернистого перлита определенного балла, то есть перлита с глобулярной морфологией карбидной фазы определенного размера. Обусловлено это тем, что такая структура применительно к этим сталям, по сравнению со структурой пластинчатого перлита, обладает рядом достоинств [1]. Это связано с напряженно-деформационным состоянием при производстве составляющих деталей подшипника, а именно схемой всестороннего сжатия, для которой наиболее эффективной структурой является зернистый перлит против пластинчатого перлита.

Для получения структуры с частично или полностью сфероидизированной карбидной фазой, обладающей наилучшей технологичностью и экономичностью при последующих переделах, прокат из подшипниковых сталей подвергают специальной термической обработке – сфероидизирующему отжигу по различным ре-

жимам, зависящим от вида и назначения отжигаемой металлопродукции, имеющегося для этого оборудования, предпочтений технологов-термистов.

Наиболее распространенными режимами сфероидизирующего отжига являются: одноступенчатый (рис. 1, а); с одной фазовой перекристаллизацией, двухступенчатый (рис. 1, б); с двумя фазовыми перекристаллизациями и выдержками при разных надкритических температурах, многоступенчатые циклические (рис. 1, в), то есть с несколькими фазовыми перекристаллизациями или без выдержек, или с выдержками различной продолжительности при над- и подкритических температурах, или комбинированно.

Общим недостатком первых двух режимов является большая их длительность, обычно намного больше времени других этапов прокатного производства. Недостатком третьего режима является невозможность применения его для металлопродукции больших сечений.

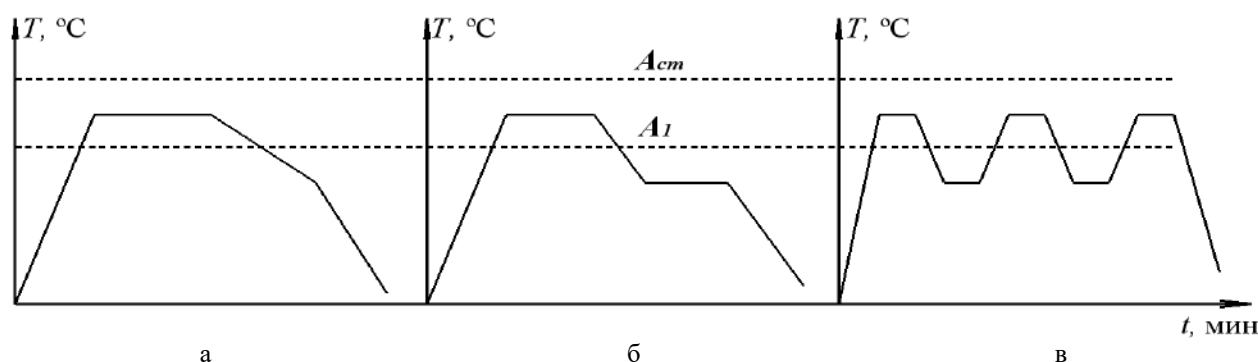


Рис. 1. Варианты режимов сфероидизирующего отжига: а – одноступенчатый отжиг с непрерывным охлаждением; б – изотермический двухступенчатый отжиг; в – циклический отжиг маятникового типа
 Fig. 1. Options of spheroidizing annealing modes: а is one-step annealing with non-stop cooling; б is isothermal two-step annealing; в is cyclic annealing of pendulum type

Механизм образования карбидной фазы глобулярной морфологии в стальной металлопродукции осуществляется путем создания условий для абнормального, неэвтектоидного распада аустенита на нормальную структуру зернистого перлита. Этот способ образования структуры зернистого перлита требует меньше времени и поэтому получил широкое распространение в промышленности, является в настоящее время доминирующим в мировой практике. Однако превращение аустенита при охлаждении непосредственно в зернистый перлит, то есть минуя нормальное эвтектоидное превращение, возможно лишь при выполнении определенных условий: наличии в 1 см^3 аустенита около $5 \cdot 10^9$ карбидных глобулярных частиц диаметром до $0,3 \text{ мкм}$; охлаждение со скоростью до $30\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C/ч}$ от надкритической до подкритической температуры [1, 2]. При выполнении этих условий превращение аустенита протекает по абнормальному механизму: благодаря малым путям диффузии и скорости охлаждения углерод из аустенита выделяется в виде цементита на имеющихся карбидных глобулах, а обедненный углеродом до точки «Р» диаграммы состояния Fe-C аустенит превращается в феррит. Образуется нормальная структура зернистого перлита с почти одноразмерными, равномерно распределенными карбидными глобулами. При этом число карбидных частиц практически не изменяется [3], увеличивается лишь их размер.

При невыполнении первого условия, то есть при меньшем «карбидном числе», даже при последующем медленном охлаждении значительная часть аустенита претерпевает эвтектоидное превращение по нормальному механизму в перлит пластинчатый, то есть перлит с пластинчатой морфологией составляющих его фаз феррита и цементита. При невыполнении второго условия, даже при наличии в аустените необходимого числа карбидов, значительная часть аустенита также превращается по нормальному механизму, благодаря кинетическому фактору, в перлит пластинчатый.

У подшипниковых сталей получение необходимого карбидного числа затруднений не вызывает, так как у них выше точки A_{C1} на диаграмме состояния имеется широкая область температур устойчивого существования карбидной фазы. Поэтому и «интервал отжигаемости» на зернистый перлит у них довольно широкий, что позволяет производить сфероидизирующий отжиг в промышленных условиях без особых затруднений в печах и непрерывного, и периодического действия. Однако и в этом случае из-за ограниченной скорости охлаждения общая длительность отжига получается большой, намного превосходит длительность взаимосвязанных с отжигом технологических процессов производства металлопродукции [4, 5].

Для проведения сфероидизирующего отжига бунтового проката из подшипниковых сталей в условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга „БМК“» применяется универсальный режим циклического отжига маятникового типа с двумя циклами нагрев/охлаждение (рис. 2).

Эффективные температуры нагрева для отжига 780°C и охлаждение в области подкритических температур $620\text{--}650^\circ\text{C}$ утвержденного режима представлены в табл. 1.

Конец превращения $\alpha \rightarrow \gamma$ при температуре 760°C для стали ШХ15 является нижним пределом, а температура относительного выравнивания концентрации аустенита $840\text{--}845^\circ\text{C}$ – соответственно верхним пределом тех температур нагрева, при которых возможно образование зернистого перлита при отжиге. В этом интервале температур эффективной нужно считать температуру 780°C . Учитывая возможные в производстве отклонения от технологического режима, температура нагрева при отжиге может быть в диапазоне $775\text{--}785^\circ\text{C}$. Более широкий интервал температур не может быть допущен вследствие предъявляемого к структуре отожженной стали обязательного требования по однородности, а при широком интервале температур нагрева нельзя добиться получения однородного зернистого перлита [6–11].

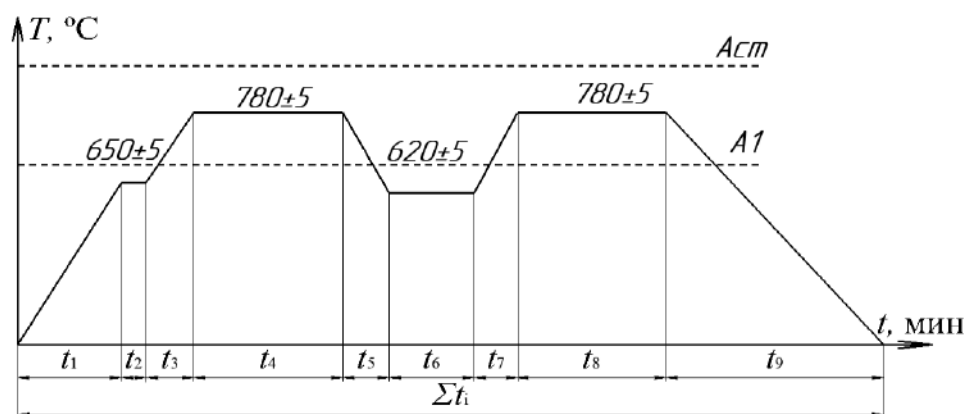


Рис. 2. Схема действующего утвержденного режима сфероидизирующего отжига маятникового типа для бунтового проката диаметром 6,5 мм из стали ШХ15 (температура стадий выдержки: $T_2 = 650^\circ\text{C}$; $T_4 = 780^\circ\text{C}$; $T_6 = 620^\circ\text{C}$; $T_8 = 780^\circ\text{C}$)

Fig. 2. Scheme of the current, approved mode of pendulum-type spheroidizing annealing for rolled steel with a diameter of 6,5 mm in coils ShH15 (temperature of exposure stages: $T_2 = 650^\circ\text{C}$; $T_4 = 780^\circ\text{C}$; $T_6 = 620^\circ\text{C}$; $T_8 = 780^\circ\text{C}$)

Таблица 1. Параметры стадий нагрев/охлаждение сфероидизирующего отжига по действующему режиму
Table 1. Parameters of the heating/cooling stages of spheroidizing annealing according to the current mode

Параметры	Интервалы времени t_i (см. рис. 2)								
	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
Температура нагрева/охлаждения, $^\circ\text{C}$	20-650	650	650-780	780	780-620	620	620-780	780	780-350
Скорость нагрева/охлаждения, $^\circ\text{C}/\text{ч}$	60	-	45	-	40	-	50	-	Охлаждение с печью
Время выдержки, мин	-	10	-	90	-	30	-	100	-

Целью работы является исследование влияния временных этапов сфероидизирующего отжига бунтового проката из подшипниковой стали диаметром 6,5 мм на процесс сфероидизации пластинчатого перлита с целью сокращения времени циклического отжига маятникового типа.

Материал и методика исследования

Металлографическое исследование образцов проводилось на катанке диаметром 6,5 мм из стали ШХ15 с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA GMS с энергодисперсионным микроанализатором AztecLive Automated Ultim Max 65. Прокатка проводилась по усовершенствованному режиму в проволочной линии и линии «Стелмор» мелкосортно-проволочного стана (МСПС) 370/150.

Исследования проводились после сфероидизирующего отжига стали по четырем экспериментальным режимам, к которой предъявлялись следующие требования согласно ГОСТ 801:

- уровень обезуглероженного слоя (далее ОБС) не более 0,25 мм для стали диаметром от 4 до 15 мм;
- размер зернистого перлита – не более 4 балла;
- твердость горячекатаной отоженной стали 179–207 НВ.

Сфероидизирующий отжиг проводился в лабораторной печи Maetherm A-125-1300. Определялось оптимальное время выдержек с целью уменьшения их длительности.

Проведение исследовательской работы было разделено на четыре экспериментальных режима с вариацией длительности интервалов выдержек (табл. 2). При этом температуры выдержек остались неизменными по отношению к базовому варианту.

Таблица 2. Параметры стадий выдержки сфероидизирующего отжига по экспериментальным режимам

Table 2. Parameters of the exposure stages of spheroidizing annealing by experimental modes

Номер экспериментального режима	Параметр	Интервалы времени t_i (см. рис. 2)			
		t_2	t_4	t_6	t_8
1	Время интервала, мин	9	81	27	90
2		7,5	67,5	22,5	75
3		5	45	15	50
4		2,5	22,5	7,5	25

Результаты исследования и их обсуждение

В более ранних работах [12, 13] на бунтовом прокате диаметром от 6,5 до 16,5 мм было изучено влия-

ние наличия участков грубопластинчатого перлита в подповерхностном слое на конечный результат после сфероидизирующего отжига. Прокатка осуществлялась согласно требованиям технологической инструкции по утвержденной таблице калибровки [14]. Для прокатки непрерывнолитых заготовок (НЛЗ) сечением 250×300 мм использовался утвержденный [15] химический состав согласно требованиям ГОСТ 801. Режим термообработки в потоке линии «Стелмор»: начальное охлаждение водой до температуры 870-910°C в зоне виткообразователя и последующее охлаждение воздухом на роликовом конвейере тремя первыми вентиляторами с мощностью подачи 20% и замедленным охлаждением под термоколпаками (термоизолирующими крышками) до конца рольганга при скорости транспортирования 1,0 м/с.

Микроструктура после отжига имела для диаметра 6,5 мм зону частично обезуглероженного слоя ОБС с характерными участками: зоной ферритно-перлитной структуры, зоной пластинчатого перлита при основной структуре зернистого перлита или зоной зернистого перлита, обедненной карбидами в подповерхностной зоне, что является несоответствием по ОБС (не более 0,25% от диаметра). Результаты исследования качественных показателей бунтового проката по ГОСТ 801 представлены в табл. 3.

Таблица 3. Качественные показатели бунтового проката по ГОСТ 801 после прокатки по усовершенствованному режиму охлаждения и проведения сфероидизирующего отжига по действующему режиму

Table 3. Quality indicators of coiled rolled steel according to GOST 801 after rolling under an improved cooling mode and spheroidizing annealing under the current mode

Параметры	Требования ГОСТ 801	Диаметр катанки, 6,5 мм
Уровень обезуглероженного слоя, мм	От 4 до 15 мм не более 0,25 мм Свыше 15 до 30 мм не более 0,40 мм	0,31-0,46
Размер зернистого перлита	Не более 4 баллов	2
Твердость, НВ	179-207	180-194

Для получения равномерной микроструктуры и стабильного ОБС при проведении сфероидизирующего отжига был разработан усовершенствованный режим поточной термообработки бунтового проката на линии «Стелмор». В основе разработки были положены результаты собственных исследований [16] и аналогичных научных работ [17-20]. Изменения касались ускоренного охлаждения витков в начале транспортера витков линии «Стелмор» с последующей выдержкой

под термоэкранами (термоизолирующими крышками). Поскольку при быстром снижении температуры ниже 727°C скорость превращения увеличивается и достигает максимума при ~ 550°C, разработанный режим должен увеличить время и полноту структурных превращений с уменьшением межпластинчатого расстояния в перлите. Начальная температура охлаждения в зоне виткообразователя была принята равной 870±20°C (несколько выше температуры A_{cm}) как наиболее эффективная для формирования мелкодисперсной структуры без образования заметной карбидной сетки при разных скоростях охлаждения.

Исходная микроструктура проката диаметром 6,5 мм при таком режиме поточной термообработки была мелкодисперсной перлитной с межпластинчатым расстоянием 0,126-0,235 мкм и размером пластин цементита (Ц) не более 0,08 мкм.

По размеру зерен отчетливо определялись две зоны (рис. 3): периферийная (толщина 1,1-1,4 мм) мелкозернистая и центральная крупнозернистая. Поэтому в дальнейших исследованиях и анализе структурных превращений было принято выполнять их для обеих зон.

После прокатки и поточного охлаждения бунтового проката диаметром 6,5 мм из подшипниковой стали ШХ15 были обеспечены все качественные характеристики по ГОСТ 801, в том числе и повышение качественных показателей ОБС (минимизация участков остаточного пластинчатого перлита) (рис. 4).

Учитывая получение мелкодисперсной перлитной структуры на линии «Стелмор» и применяемый далее циклический тип сфероидизирующего отжига бунтового проката диаметром 6,5 мм представляет интерес исследование влияния времени отжига на полноту структурных превращений при сфероидизации пластин цементита в глобули.

При исследовании образцов катанки диаметром 6,5 мм после отжига по режиму № 1 были получены следующие результаты (рис. 5, а, б):

- размер зернистой структуры в отожженном состоянии 2 балла;
- обезуглероженный слой на уровне 0,10-0,12 мм;
- твердость 183-191 НВ.

Отклонений в качественных характеристиках металла от требований ГОСТ 801 не выявлено.

При исследовании образцов катанки диаметром 6,5 мм после отжига по режиму № 2 были получены следующие результаты (рис. 5, в, г):

- размер зернистой структуры в отожженном состоянии 2 балла;
- обезуглероженный слой на уровне 0,10-0,14 мм;
- твердость 181-190 НВ.

Режим № 2 показал, что особых отличий по микроструктуре и твердости в сравнении с действующим и экспериментальным режимом № 1 не обнаружено.

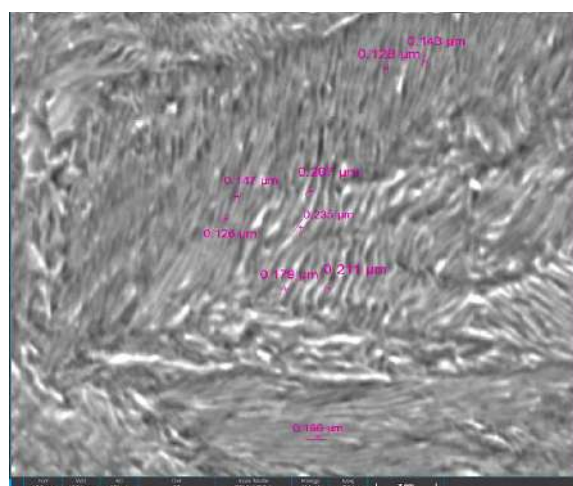
При исследовании образцов катанки диаметром 6,5 мм после проведенного отжига по режиму № 3 были получены следующие результаты (рис. 5, д, е):

- размер зернистой структуры в отожженном состоянии 2-3 балла;
- обезуглерожженный слой на уровне 0,09-0,13 мм;
- твердость 185-198 НВ.

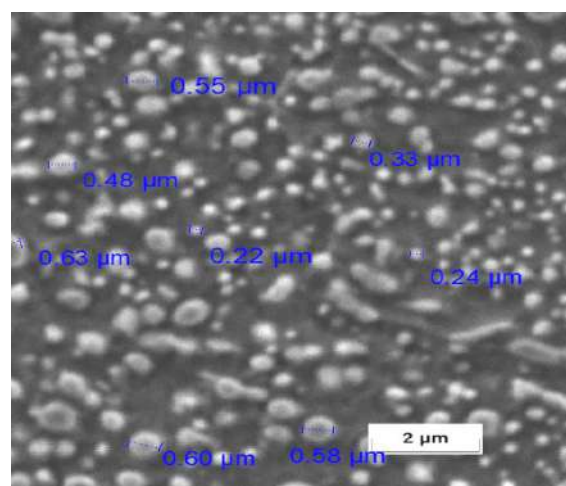
Металлографический анализ показал, что отожженная микроструктура 2-3 балла и твердость металла выше, чем в экспериментах № 1, 2.



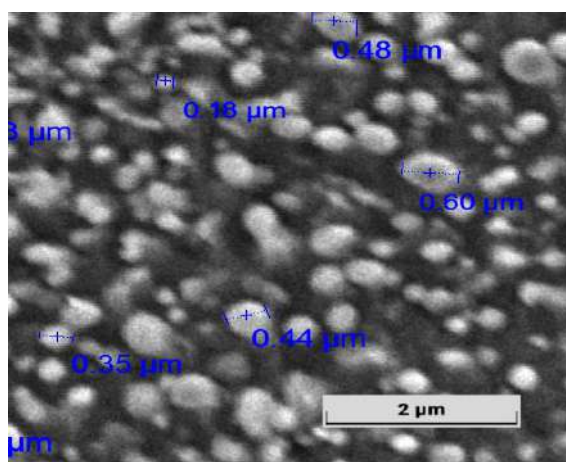
Рис. 3. Микроструктура катанки из стали ШХ15 диаметром 6,5 мм, $\times 500$
Fig. 3. Microstructure of wire rod from steel ShH15 with a diameter of 6,5 mm, $\times 500$



а



б



в

Рис. 4. Микроструктура катанки диаметром 6,5 мм: а – мелкодисперсный перлит после прокатки, $\times 20000$;
б, в – периферийная и центральная зоны после отжига, $\times 20000$

Fig. 4. Microstructure of wire rod with a diameter of 6,5 mm: а is fine pearlite after rolling, $\times 20000$; б, в are periphery and central zones after annealing, $\times 20000$

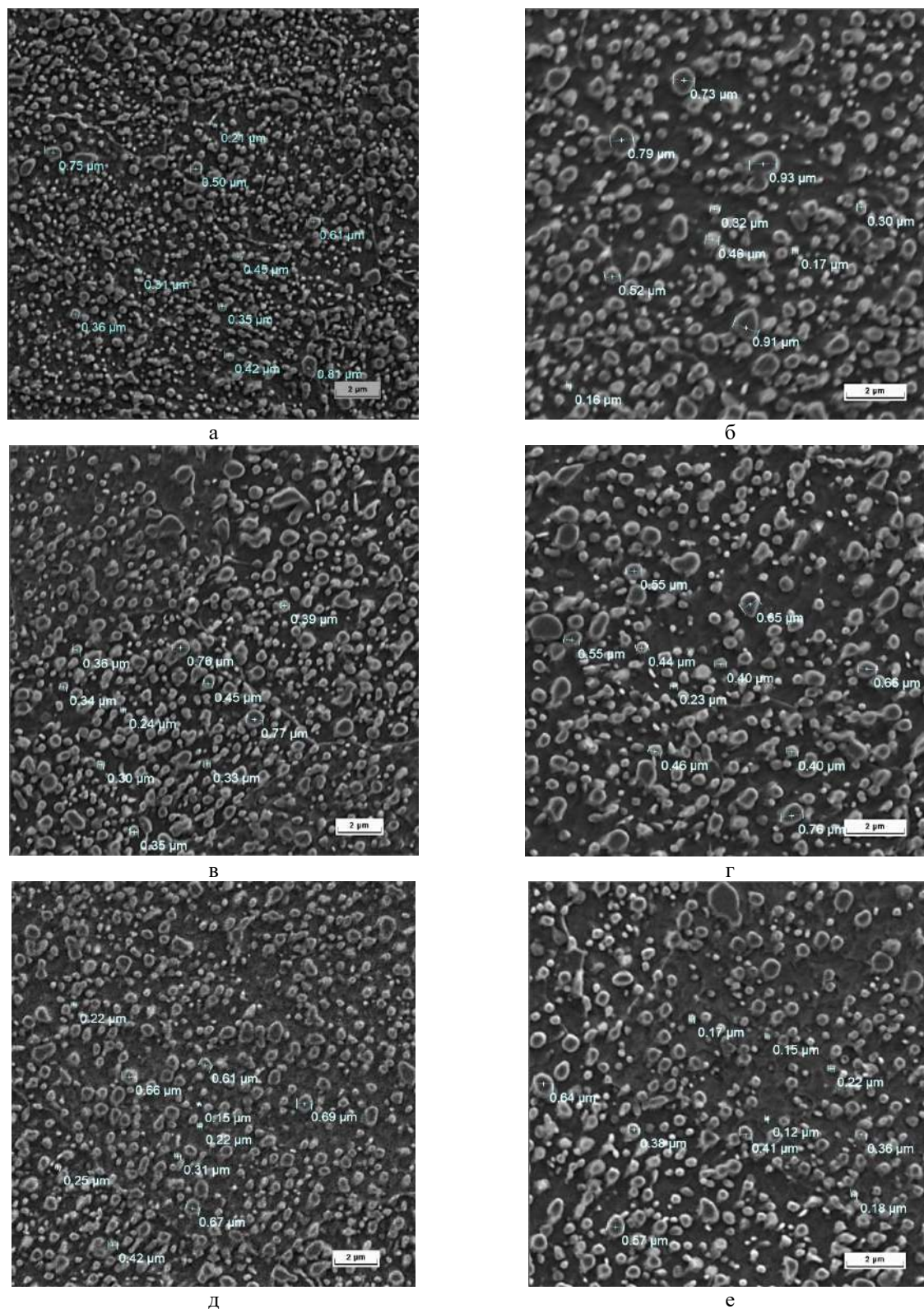


Рис. 5. Микроструктура образцов после проведения сфероидизирующего отжига: а, б – периферийная и центральная зоны после отжига по режиму № 1; в, г – периферийная и центральная зоны после отжига по режиму № 2; д, е – периферийная и центральная зоны после отжига по режиму № 3, $\times 20000$

Fig. 5. Microstructure of the samples after spheroidizing annealing: а, б are periphery and central zones after annealing by mode No. 1; в, г are periphery and central zones after annealing by mode No. 2; д, е are periphery and central zones after annealing by mode No. 3, $\times 20000$

Исследования образцов катанки диаметром 6,5 мм после проведенного 4-го режима (рис. 6) показали:

- неудовлетворительный размер зернистой структуры в отожженном состоянии 7-8 баллов ГОСТ 801;
- неудовлетворительный размер обезуглероженного слоя на уровне 0,39-0,56 мм;
- неудовлетворительная твердость 202-215 НВ.

При исследовании образцов после проведенного отжига по режиму № 4 видно, что происходит изменение характера цементитных кристаллов, возникающих при распаде аустенита.

Получена структура с заметным количеством пластинчатого цементита (микроструктура 7-8 баллов). Обезуглероженный слой и твердость не соответствуют требованиям ГОСТ 801.

Анализ влияния длительности времени выдержек при циклическом (маятниковом) отжиге на микроструктуру металла после отжига (формирование сфероидизированного перлита) показал, что режимы № 1–3 обеспечивают полную трансформацию пластин карбида железа в глобули.

После отжига по режиму № 4 эффект формирования структуры зернистого перлита не достигнут. Подтверждением этого положения служит тот факт, что в случае кратковременной выдержки с последующим медленным охлаждением в микроструктуре присутствуют фрагменты и сплошные прослойки пластинчатого цементита по границам крупных исходных аустенитных зерен. При этом дробления пластин не произошло, что свидетельствует об одностадийной схеме трансформации.

Для того чтобы сформировать структуру аустенита, необходимо четко регулировать важнейшие параметры стадии сфероидизирующего отжига. Продолжительность выдержки при температуре отжига выбирается с таким расчетом, чтобы обеспечить необходимую полноту превращения перлита в аустенит, а

также максимально выровнять температуры во всем объеме металла. Если форма выделения карбидов, зависящая от состояния аустенита, определяется температурой отжига металла, то величина выделившихся карбидов, дисперсность карбидной фазы, определяется скоростью охлаждения. В исследованиях показано, что температура и скорость охлаждения во всех режимах одинакова. Итак, установлены зависимости формирования структуры от технологических параметров в условиях мелкосоротно-проволочного стана 370/150, определена эффективная выдержка для глобулярной формы выделения карбидов при постоянных параметрах температуры и скорости охлаждения при сфероидизации.

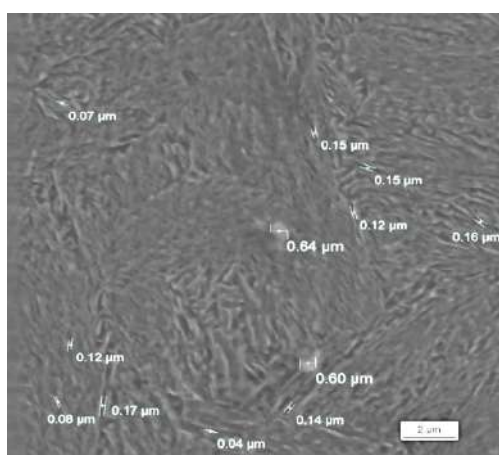
Определена роль циклического сфероидизирующего отжига с уточненным временем выдержки при эффективных подкритических температурах в области эффективных температур нагрева (620–780°C) в области подкритических температур.

Полученный в ходе лабораторных исследований опыт позволяет перейти к промышленному внедрению разработанной технологии.

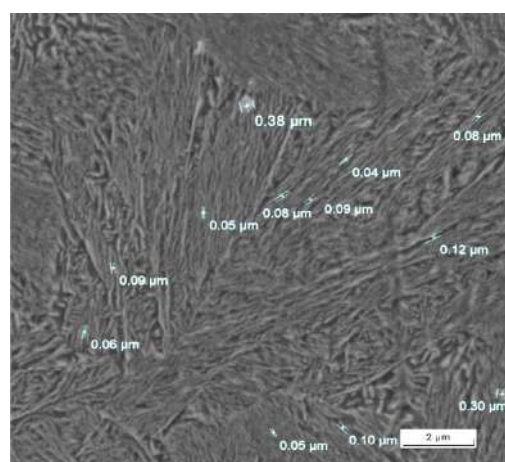
Выводы

1. Получение мелкодисперсного пластинчатого перлита в исходной микроструктуре бунтового проката из стали ШХ15 обеспечивает существенное (до 50%) снижение времени циклического сфероидизирующего отжига.

2. При недостаточном времени выдержек (режим № 4) сфероидизация пластин карбидов железа не происходит, однако их дробление также не обнаружено. Это свидетельствует о том, что сфероидизация мелкодисперсного перлита происходит в одну стадию – непосредственно при трансформации пластин в глобули.



а



б

Рис. 6. Микроструктура образцов после проведения сфероидизирующего отжига по режиму № 4: а – периферийная зона; б – центральная зона, $\times 20000$

Fig. 6. Microstructure of the samples after spheroidizing annealing by mode No. 4: a is periphery zone; б is central zone, $\times 20000$

Список источников

- Долженков И.Е., Долженков И.И. Сфероидизация карбидов в стали. М.: Metallurgy, 1984. 143 с.
- Гуляев А.П. Термическая обработка стали. 2-е изд. М.: Mashgiz, 1960. 495 с.
- Накано Т., Каватани Х. О росте сфероидизации карбидов в высокоуглеродистой и низколегированной стали // Тэцу то хаганэ. 1972. Т. 58. №. 14. С. 2012.
- Долженков И.Е. Пути существенного сокращения времени (продолжительность) и улучшения качества сфероидизации карбидов в стальной металлопродукции // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Стародубовские чтения. 2011. №. 58. С. 262-267.
- Bhadeshia H. Steels for bearings // Progress in materials Science. 2012, vol. 57, no. 2, pp. 268-435.
- Смирнов М.А., Счастливцев В.М., Журавлев Л.Г. Основы термической обработки стали: учеб. пособие. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. 495 с.
- Качество катанки подшипниковой стали после двухстадийного охлаждения / Яценко Ю.В., Емченко В.С., Реус В.А., Лихов В.К. // Сталь. 1985. №. 6. С. 62-63.
- Оптимизация технологии отжига ускоренно охлажденной ШХ15 / Ляшенко В.П. и др. // Сталь. 1989. №. 6. С. 71-74.
- Влияние параметров сфероидизирующего отжига на структуру подшипниковой стали / Салтыков Л.Н., Климушкина Л.А., Куликов М.С. и др. // Сталь. 2003. №4. С.64-65.
- Раузин Я.Р. Термическая обработка хромистой стали. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1978. 277 с.
- Зинченко С.А., Ибрагимов А.У. Термоциклический сфероидизирующий отжиг подшипниковой стали // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. науч. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф., Курск, 19–20 марта 2015 года. В 4-х т. / отв. ред. Горохов А.А. Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2015. Т. 2. С. 144-147.
- Влияние исходной структуры бунтового проката из подшипниковой марки стали на равномерность получения структуры после сфероидизирующего отжига / Савченко С.А., Ковалева И.А., Гузова И.А., Сычков А.Б. // Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. 2023. Т. 79. № 3. С. 251-260. DOI: 10.32339/0135-5910-2023-3-251-260.
- Влияние структуры бунтового проката из подшипниковой стали на его структуру и поверхностное обезуглероживание после сфероидизирующего отжига / Савченко С.А., Ковалева И.А., Гузова И.А., Сычков А.Б. // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. 2022. № 21. С. 133-144.
- Совершенствование технологического процесса производства подшипниковых марок стали на стане 370/150 / Путеев В.С., Савченко С.А., Панковец И.А., Возная В.И., Астапенко И.В. // Литье и металлургия. 2021. № 3. С. 65-73. DOI: 10.21122/1683-6065-2021-3-65-73.
- Исследование факторов, способствующих снижению карбидной неоднородности в подшипниковых марках стали / Панковец И.А., Савченко С.А., Возная В.И. и др. // Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 7. С. 804-810. DOI: 10.32339/0135-5910-2021-7-804-810.
- Особенности формирования мелкодисперсной структуры бунтового проката подшипниковой стали / Савченко С.А., Ковалева И.А., Астапенко И.В., Сычков А.Б. // Черные металлы. 2024. № 4. С. 65-73. DOI: 10.17580/chm.2024.04.05
- Study on rolling and hot delivery spheroidizing annealing of GCr15 bearing steel / Huang Z. Y., Du L. X., Li M. Z. et al. // J. of Materi Eng and Perform. 2023, vol. 32, pp. 7779-7784. DOI: 10.1007/s11665-022-07656-w.
- Design of online spheroidization process for 1.0C-1.5Cr bearing steel and microstructure analysis / Li Z. X., Li C. S., Ren J. Y. et al. // Metall. Mater. Trans. A. 2018, vol. 49, pp. 1782-1794. DOI: 10.1007/s11661-018-4511-9.
- Effects of annealing on carbides size and distribution and cold formability of 1.0C-1.5Cr bearing steel / Li Z. X., Li C. S., Zhang J. et al. // Metall. Mater. Trans. A. 2015, vol. 46, pp. 3220-3231. DOI: 10.1007/s11661-015-2904-6.
- Effect of prior microstructures on cementite dissolution behavior during subcritical annealing of high carbon steels / Zhao X.-Yu, Zhao X.-M., Dong C., Yang Y., Han H. // Metals and Materials International. 2022, vol. 28, iss. 6, pp. 1315–1327. DOI: 10.1007/s12540-021-00983-y.

References

- Dolzhenkov I.E., Dolzhenkov I.I. *Sferoidizaciya karbidov v stali* [Spheroidization of carbides in steel]. Moscow: Metallurgy, 1984, 143 p. (In Russ.)
- Guljaev A.P. *Termicheskaya obrabotka stali* [Heat treatment for steel]. Moscow: Mashgiz, 1960, 495 p. (In Russ.)
- Nakano T., Kavatani H. Growth of spheroidization of carbides in high carbon and low alloyed steel. *Tecu to hagane* [Tetsu-to-Hagané], 1972;58(14):2012. (In Russ.)
- Dolzhenkov I.E. Ways to significantly reduce the time (duration) and improve the quality of spheroidization of carbides in steel products. *Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Seriya: Starodubovskie chteniya* [Construction. Materials Science. Mechanical engineering. Series: Starodubov readings], 2011;(58):262-267. (In Russ.)
- Bhadeshia H. Steels for bearings. Progress in materials Science. 2012;57(2):268-435.
- Smirnov M.A., Schastlivtsev V.M., Zhuravliov L.G. *Osnovy termicheskoy obrabotki stali: ucheb.posobie* [Basics of heat treatment for steel: study guide]. Yekaterinburg: Ural division of the Russian Academy of Science, 1999, 495 p. (In Russ.)
- Yatsenko Y.V., Emchenko V.S., Reus V.A., Lihov V. K. Quality of wire rod from bearing steel after two-step cooling. *Stal* [Steel], 1985;(6):62-63. (In Russ.)

8. Liashenko V.P. et al. Optimization of the annealing technology for quickly cooled ShH15. *Stal* [Steel], 1989;(6):71-74. (In Russ.)
9. Saltykov L.N., Klimushkina L.A., Kulikov M.S. et al. Influence of parameters of spheroidizing annealing on the structure of bearing steel. *Stal* [Steel], 2003;(4):64-65. (In Russ.)
10. Rauzin Y.R. *Termicheskaya obrabotka hromistoy stali* [Heat treatment for chromium steel]. Moscow: Mechanical engineering, 1978, 277 p. (In Russ.)
11. Zinchenko S.A., Ibragimov A.U. Thermocyclic spheroidizing annealing for bearing steel. *Sovremennye instrumentalnye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii: sb. nauch. tr. XII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modern instrumental systems, information technologies and innovations. Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference]. Kursk: CJSC University Book, 2015, pp. 144-147. (In Russ.)
12. Savchenko S.A., Kovaliova I.A., Guzova I.A., Sychkov A.B. Influence of the initial structure of rolled steel in coils made of bearing steel on the uniformity of the structure obtained after spheroidizing annealing. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], 2023;79(3):251-260. (In Russ.) DOI: 10.32339/0135-5910-2023-3-251-260.
13. Savchenko S.A., Kovaliova I.A., Guzova I.A., Sychkov A.B. Influence of the structure of coiled steel products made of bearing steel on its structure and surface decarburization after spheroidizing annealing. *Tekhnologii metallurgii, mashinostroeniya i materialoobrabotki* [Technologies of metallurgy, mechanical engineering and materials processing], 2022;(21):133-144. (In Russ.)
14. Puteev V.S., Savchenko S.A., Pankovets I.A., Voznaya V.I., Astapenko I.V. Improving the technological process for production of bearing steel at mill 370/150. *Litie i metallurgiya* [Casting and metallurgy], 2021;(3):65-73. (In Russ.) DOI: 10.21122/1683-6065-2021-3-65-73.
15. Pankovets I.A., Savchenko S.A., Voznaya V.I. et al. Study of factors contributing to the reduction of carbide heterogeneity in bearing steel. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], 2021;77(7):804-810. (In Russ.) DOI: 10.32339/0135-5910-2021-7-804-810.
16. Savchenko S.A., Kovaliova I.A., Astapenko I.V., Sychkov A.B. Features of the formation of finely dispersed structure of rolled products from bearing steel. *Chernye metally* [Ferrous metals], 2024;(4):65-73. (In Russ.) DOI: 10.17580/chm.2024.04.05
17. Huang Z.Y., Du L.X., Li M.Z. et al. Study on rolling and hot delivery spheroidizing annealing of GCr15 bearing steel. *J. of Materi Eng and Perform.* 2023;32:7779-7784. DOI: 10.1007/s11665-022-07656-w.
18. Li Z.X., Li C.S., Ren J.Y. et al. Design of online spheroidization process for 1.0C-1.5Cr bearing steel and microstructure analysis. *Metall. Mater. Trans. A.* 2018;49:1782-1794. DOI: 10.1007/s11661-018-4511-9.
19. Li Z.X., Li C.S., Zhang J. et al. Effects of annealing on carbides size and distribution and cold formability of 1.0C-1.5Cr bearing steel. *Metall. Mater. Trans. A.* 2015;46:3220-3231. DOI: 10.1007/s11661-015-2904-6.
20. Zhao X.-Yu, Zhao X.-M., Dong C., Yang Y., Han H. Effect of prior microstructures on cementite dissolution behavior during subcritical annealing of high carbon steels. *Metals and Materials International.* 2022;28(6):1315-1327. DOI: 10.1007/s12540-021-00983-y.

Поступила 21.06.2024; принята к публикации 23.08.2024; опубликована 28.03.2025
Submitted 21/06/2024; revised 23/08/2024; published 28/03/2025

Савченко Сергей Александрович – ведущий инженер-технолог прокатного отдела технического управления, Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания», Жлобин, Беларусь.
Email: gnp.tu@bmz.gomel.by

Ковалёва Ирина Анатольевна – начальник исследовательской лаборатории исследовательского центра – отраслевой лаборатории технологий металлургического и сталепроволочного производств технического управления, Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания», Жлобин, Беларусь.
Email: nl.icm@bmz.gomel.by

Астапенко Игорь Васильевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры металлургии и технологии обработки материалов, Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Гомель, Беларусь.
Email: astapenko@tut.by. ORCID 0000-0001-5503-7693.

Сычков Александр Борисович – доктор технических наук, профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: absychkov@mail.ru. ORCID 0000-0002-0886-1601. Reseacher ID: E-4516-2016.

Sergey A. Savchenko – Senior Technical Engineer of the Rolling Unit of the Technical Department, Belarusian Steel Works, the management company of the Belarusian Metallurgical Company holding, Zhlobin, Belarus.

Email: gnp.tu@bmz.gomel.by

Irina A. Kovaliova – Head of the Research Laboratory of the Research Center, the Branch Laboratory of Metallurgical and Steel–wire Production Technologies of the Technical Department, Belarusian Steel Works, the management company of the Belarusian Metallurgical Company holding, Zhlobin, Belarus.

Email: nl.icm@bmz.gomel.by

Igor V. Astapenko – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Metallurgy and Materials Processing Technology,

Pavel Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Belarus.

Email: astapenko@tut.by. ORCID 0000-0001-5503-7693.

Alexandr B. Sychkov – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Foundry Processes and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Email: absychkov@mail.ru. ORCID 0000-0002-0886-1601. Researcher ID: E-4516-2016.



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 549:54.055

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-73-84

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ АДДИТИВНЫМ ВЫРАЩИВАНИЕМ

Мосягин И.А., Ольшанская Т.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Аннотация. Постановка задачи. Аддитивные технологии – перспективная и развивающаяся отрасль машиностроения, которая позволяет изготавливать металлические изделия конечной формы или близкой к конечной за одну технологическую операцию, что сокращает сроки производства и является экономически целесообразным. В настоящее время в высокотехнологичных отраслях машиностроения и авиакосмической промышленности широко применяются высокопрочные безуглеродистые мартенситно-стареющие стали системы легирования Fe–Ni–Co–Mo. Их применение обусловлено сочетанием свойств, которые позволяют эксплуатировать детали при экстремально высоких и низких температурах, а также при высоких ударных и силовых нагрузках. Важнейшим преимуществом мартенситно-стареющих сталей перед другими высокопрочными сталями является необычно высокое сопротивление хрупкому разрушению. При производстве тяжело нагруженных изделий сложной геометрической формы из высокопрочных материалов одной из актуальных задач является разработка новых экономически выгодных и высокопроизводительных технологий, таких как аддитивное производство. В случае выращивания изделий методом дуговой наплавки остаются нерешенными вопросы, связанные со снижением анизотропии свойств полученного материала, также требует дополнительной проработки вопрос адаптации известных режимов термической обработки для обеспечения необходимого уровня и однородности заданных свойств. **Цель работы.** Изучение закономерности (особенностей) формирования структуры на макро- и микроуровнях образцов из мартенситно-стареющей стали, полученных аддитивным выращиванием с применением последующей термической обработки. **Новизна.** Впервые исследовано влияние термической обработки, включающей в себя гомогенизацию, закалку и старение на формирование макро- и микроструктуры образцов из мартенситно-стареющей стали, полученных аддитивным выращиванием. **Результаты.** Предложенная термическая обработка позволяет добиться повышения твердости и однородности наплавленного металла, что положительно скажется на эксплуатационных свойствах наплавленных изделий.

Ключевые слова: аддитивные технологии, термическая обработка, мартенситно-стареющие стали, высокопрочные стали WAAM, CMT-наплавка

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» и выполнения государственного задания «Разработка научно-технологических основ формирования системы материалостроения со специальными свойствами на основе гибридных аддитивных технологий»-FSNM-2024-0003.

© Мосягин И.А., Ольшанская Т.В., 2025

Для цитирования

Мосягин И.А., Ольшанская Т.В. Исследование влияния термической обработки на структурообразование и свойства мартенситно-стареющей стали, полученной аддитивным выращиванием // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 73-84. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-73-84>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

STUDY OF THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE FORMATION AND PROPERTIES OF MARTENSITE-AGEING STEEL OBTAINED BY ADDITIVE GROWTH

Mosyagin I.A., Olshanskaya T.V.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract. Problem Statement. Additive technologies are a promising and developing branch of mechanical engineering, which makes it possible to produce metal products of final shape or close to final shape in one technological operation, which reduces production time and is economically feasible. Nowadays high-strength carbonless martensite-ageing steels of Fe-Ni-Co-Mo alloying system are widely used in high-tech branches of mechanical engineering and aerospace industry. Their use is due to the combination of properties that allow parts to be operated at extremely high and low temperatures, as well as under high impact and force loads. The most important advantage of martensite-ageing steels over other high-strength steels is their unusually high resistance to brittle fracture. In the production of heavily-loaded products of complex geometric shape from high-strength materials, one of the urgent tasks is the development of new cost-effective and high-performance technologies, such as additive manufacturing. In the case of growing products by arc surfacing method, the issues related to the reduction of anisotropy of the properties of the obtained material remain unsolved; the issue of adaptation of known heat treatment modes to ensure the required level and homogeneity of the specified properties also requires additional study. **The purpose** of the presented work is to study the regularity (features) of structure formation at macro- and microlevels of martensite-ageing steel samples obtained by additive growth with the use of subsequent heat treatment. **Originality.** The influence of heat treatment including homogenization, quenching and ageing on the formation of macro- and microstructure of martensite-ageing steel samples obtained by additive growth has been investigated for the first time. **Results.** The proposed heat treatment allows to achieve an increase in hardness and homogeneity of the deposited metal, which will favourably affect the operational properties of the deposited products.

Keywords: additive technologies, heat treatment, martensite-ageing steels, high-strength WAAM steels, CMT melting

The study was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under state assignment "Development of scientific and technological foundations for the formation of a material-structure system with special properties based on hybrid additive technologies" no. FSNM-2024-0003.

For citation

Mosyagin I.A., Olshanskaya T.V. Study of the Effect of Heat Treatment on the Structure Formation and Properties Of Martensite-Ageing Steel Obtained by Additive Growth. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 73-84. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-73-84>

Введение

Аддитивные технологии – перспективная и развивающаяся отрасль машиностроения, которая позволяет изготавливать металлическое изделия конечной формы или близкой к конечной за одну технологическую операцию, что сокращает сроки производства и является экономически целесообразным [1]. В отличие от традиционных методов производства, основанных на вычитании материала из заготовки, аддитивное производство выращивает изделия послойно, используя цифровую модель. Это позволяет создавать сложные геометрические формы, которые были бы невозможны или слишком дорогими для реализации с помощью традиционных технологий.

Среди существующих технологий аддитивного производства выращивание изделий методом дуговой наплавки (wire-arc additive manufacturing – WAAM) выделяется большими возможностями, такими как высокая производительность и высокие механические свой-

ства получаемых изделий. Одним из недостатков данной технологии является неровность поверхностей, что вызвано физикой процесса выращивания [2]. В наиболее полной мере осуществить контроль переноса электродного металла позволяют системы с реверсивной подачей сварочной проволоки Fronius CMT (Cold Metal Transfer). Данный метод наплавки позволяет минимизировать тепловложение в основной металл и повысить коэффициент наплавки.

В настоящее время в высокотехнологичных отраслях машиностроения и авиакосмической промышленности широко применяются высокопрочные безуглеродистые мартенситно-стареющие стали. Их применение обусловлено сочетанием свойств, которые позволяют эксплуатировать детали при экстремально высоких и низких температурах, а также при высоких ударных и силовых нагрузках. Важнейшим преимуществом мартенситно-стареющих сталей перед другими высокопрочными сталями является необычно высокое сопротивление хрупкому разрушению [3, 4]. Оптимальное

сочетание высоких прочностных и пластических свойств в данных сталях обеспечивается за счет упрочняющей термической обработки – закалки с последующим старением. Вследствие низкого содержания углерода ($\leq 0,03\%$) в сталях системы легирования Fe–Ni–Co–Mo при закалке образуется высокопластичный мартенсит. Старение мартенситно-старееющих сталей проводится при температурах $\sim 450\text{--}500^\circ\text{C}$. Повышение прочности достигается благодаря выделению из безуглеродистой мартенситной матрицы высокодисперсных интерметаллидов типа Ni_3Ti , Fe_2Mo , $\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})$ [5-10].

При производстве тяжело нагруженных изделий сложной геометрической формы из высокопрочных материалов одной из актуальных задач является разработка новых экономически выгодных и высокопроизводительных технологий, таких как аддитивное производство.

В случае выращивания изделий методом дуговой наплавки остаются нерешенными вопросы, связанные со снижением анизотропии свойств полученного материала, также требует дополнительной проработки вопрос адаптации известных режимов термической обработки для обеспечения необходимого уровня и однородности заданных свойств.

Целью представленной работы является изучение закономерности (особенностей) формирования структуры на микро- и макроуровнях образцов из мартенситно-старееющей стали, полученных аддитивным выращиванием с последующей термической обработкой.

Материалы и метод исследования

Для исследований методом проволоочной CMT (Cold Metal Transfer) наплавки была выращена заготовка в виде плоской стенки с размерами $150 \times 80 \times 15$ мм (рис. 1). Наплавка производилась на роботе FANUC ARC Mate 100iC/12, использовалась проволока Dratec-1.6356, которая по химическому составу близка к российскому аналогу – мартенситно-старееющей стали 03Н18К9М5Т (табл. 1).



Рис. 1. Внешний вид наплавленной стенки

Fig. 1. External view of the deposited wall

Таблица 1. Химический состав проволоки

Dratec-1.6356 и сплава 03Н18К9М5Т, мас. %

Table 1. Chemical composition of Dratec-1.6356 wire and 03Ni18Co9Mo5Ti alloy, wt. %

Материал	Fe	C	Ni	Co	Mo	Ti	Si	Mn
Проволока Dratec-1.6356	основа	0,005	18,0	12,0	4,0	1,6	0,2	0,05
Сплав 03Н18К9М5Т	основа	$\leq 0,03$	17,7-19	8,5-9,5	4,6-5,5	0,6-0,8	$\leq 0,01$	$\leq 0,01$

Из полученной заготовки были вырезаны образцы, которые подвергались различным видам термической обработки (табл. 2). При выборе режимов термической обработки учитывались следующие моменты [2, 8-11]:

- для наплавленного металла проволокой из стали мартенситно-старееющего класса традиционно применяют старение при температуре 480°C с целью получения требуемых эксплуатационных характеристик;
- для изделий из этих же сталей, полученных классическими методами производства, необходимое упрочнение достигается в результате закалки с последующим старением при температуре $450\text{--}500^\circ\text{C}$;
- с целью подготовки структуры перед окончательной упрочняющей термической обработкой для данных сталей применяют гомогенизирующий отжиг.

Таблица 2. Виды термической обработки наплавленного металла

Table 2. Types of heat treatment of deposited metal

Режим термообработки (ТО)	Примечание
Режим ТО1 Старение: $T = 480^\circ\text{C}$, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе	Традиционная термическая обработка для наплавленного металла из мартенситно-старееющей стали
Режим ТО2 Закалка: $T = 830^\circ\text{C}$, выдержка 40 мин, охлаждение в воде	Предварительная термообработка для подготовки структуры наплавленного металла под старение
Режим ТО3 Гомогенизация: $T = 1100^\circ\text{C}$, нагрев с печью, выдержка 1 ч, охлаждение в печи до 200°C	Предварительная термообработка для подготовки структуры наплавленного металла под закалку
Режим ТО4 Гомогенизация: $T = 1100^\circ\text{C}$, нагрев с печью, выдержка 1 ч, охлаждение в печи до 200°C Закалка: $T = 830^\circ\text{C}$, выдержка 40 мин, охлаждение в воде	Предварительная термообработка для подготовки структуры наплавленного металла под старение
Режим ТО5 Закалка: $T = 830^\circ\text{C}$, выдержка 40 мин, охлаждение в воде Старение: $T = 480^\circ\text{C}$, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе	Классическая термическая обработка для стали мартенситно-старееющего класса
Режим ТО6 Гомогенизация: $T = 1100^\circ\text{C}$, нагрев с печью, выдержка 1 ч, охлаждение в печи до 200°C Закалка: $T = 830^\circ\text{C}$, выдержка 40 мин, охлаждение в воде Старение: $T = 480^\circ\text{C}$, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе	Комплексная термическая обработка

Исследования структуры проводились на шлифах, вырезанных в поперечном и продольном направлениях наплавки образцов. Для выявления макро- и микроструктуры на шлифах применялся реактив Вассильева: соляная кислота 500 мл, серная кислота 250 мл, медный купорос 100 г, вода 500 мл. Исследования макроструктуры проводились на оптическом стереомикроскопе Altami CM0745-T, микроструктуры – на инвертированном световом микроскопе Altami MET1T при увеличении до 1000 раз с использованием программного обеспечения Altami Studio 4.0. Измерения твердости проводились по методу Виккерса на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 200 г. Измерения наплавленных образцов проводились в виде дорожки по высоте стенки с шагом 0,2 мм.

Полученные результаты и их обсуждение

Металлографические исследования наплавленного образца показали, что макроструктура в продольном и поперечном сечениях имеет одинаковый характер: хорошо видны границы между наплавленными слоями, высота слоев изменяется в пределах 2–3 мм. На макрошлифах наблюдаются длинные столбчатые зерна, проходящие через несколько слоев, что является характерным для транскристаллизации, когда центрами кристаллизации нового слоя являются первичные кристаллиты предыдущего слоя (рис. 2, а, б). Направление роста кристаллитов практически вертикальное и соответствует направлению, противополо-

жному максимальному теплоотводу. На микроуровне прослеживается и первичная дендритная структура, образующаяся в процессе кристаллизации, и вторичная структура, формирующаяся при охлаждении в результате фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. Дендриты имеют вытянутую столбчатую форму, в междендритном пространстве наблюдается выделение мелких интерметаллидных включений.

В переходной зоне между слоями (зоне сплавления) прослеживается прорастание столбчатых дендритов через слои в том же направлении (рис. 2, в). Вторичная структура представляет собой мартенсит с выделениями мелкодисперсных интерметаллидов в небольшом количестве (рис. 2, г, д). Выделение данных интерметаллидных фаз может быть связано с процессом самоотпуска, возникающего вследствие циклического температурно-временного воздействия на наплавленный металл при многослойной наплавке.

После старения наплавленного металла (ТО1) в макроструктуре менее заметны стали границы между слоями и плохо различимы макрозерна – длинные столбчатые кристаллиты (рис. 3, а). В микроструктуре стали более явно выделяться переходные зоны между слоями, в них отсутствуют элементы первичной структуры (рис. 3, б). Непосредственно в металле слоев наблюдается коагуляция интерметаллидных фаз, находившихся в междендритном пространстве, что привело к более явному проявлению дендритного характера микроструктуры (рис. 3, в, г).

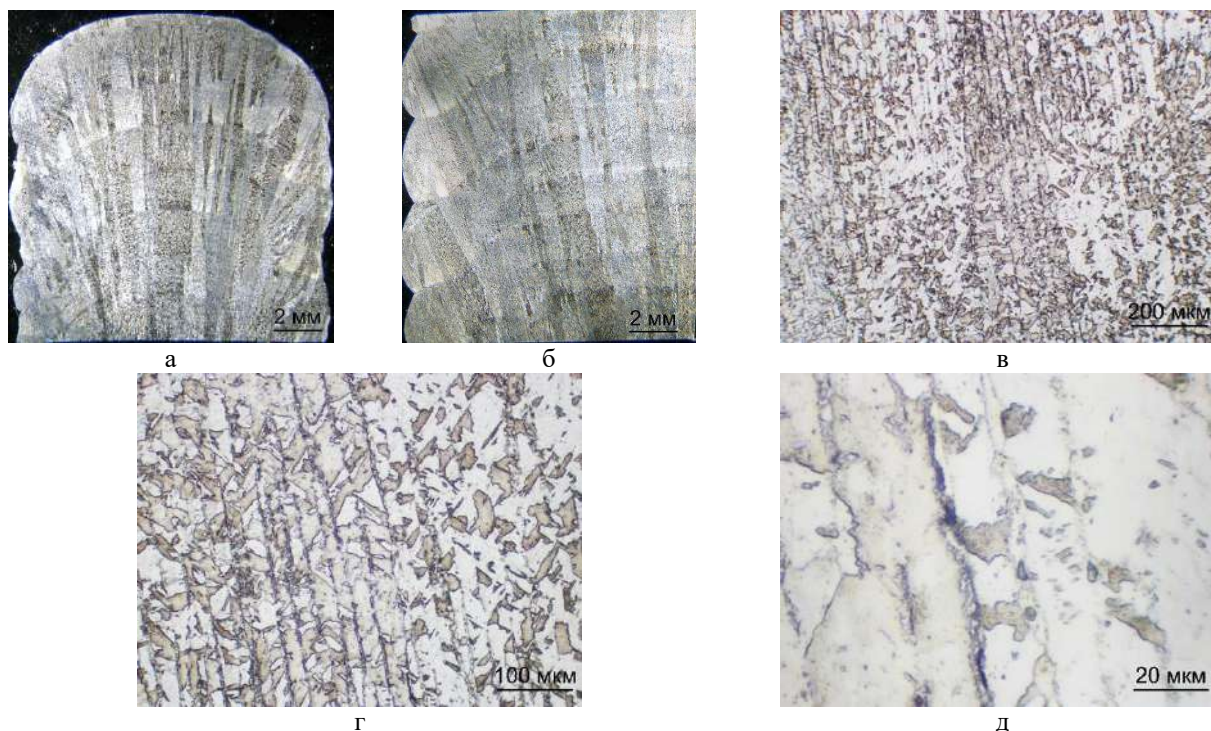


Рис. 2. Макроструктура (а, б) и микроструктура (в–д) наплавленного металла: а – поперечное сечение; б – продольное сечение; в – переходная зона между слоями, $\times 100$; г – внутри слоя, $\times 200$; д – внутри слоя, $\times 1000$

Fig. 2. Macrostructure (a, b) and microstructure (b–d) of the deposited metal: a is cross-section; б is longitudinal section; в is transition zone between layers, $\times 100$; г is inside the layer, $\times 200$; д is inside the layer, $\times 1000$

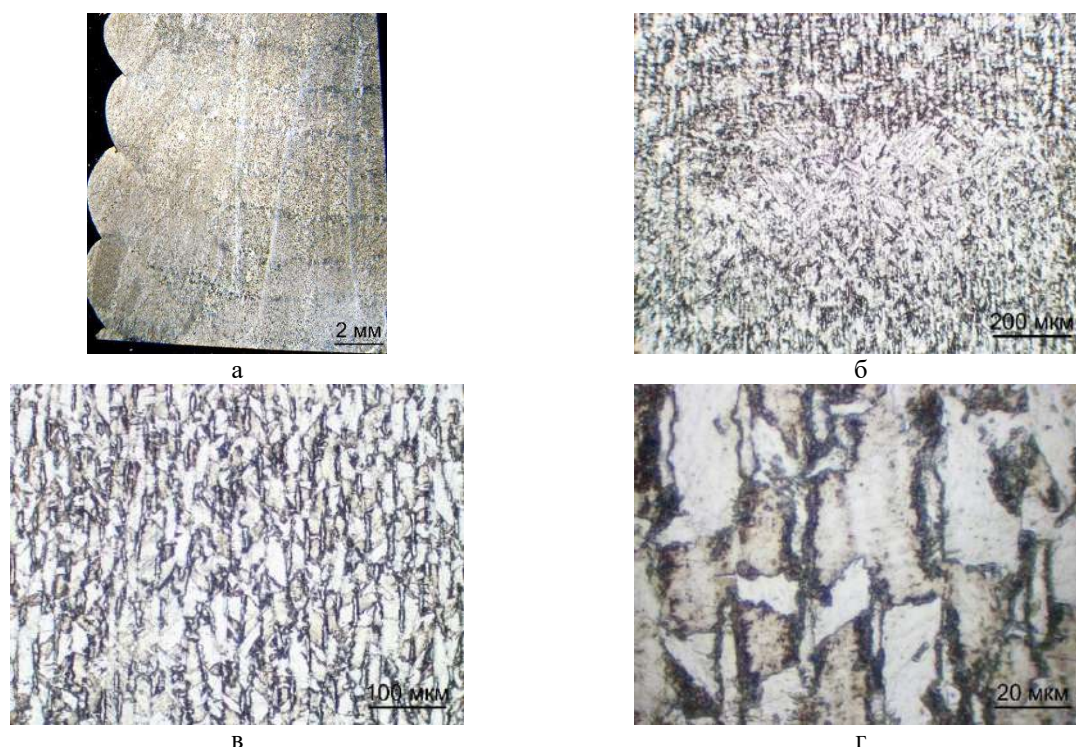


Рис. 3. Макроструктура (а) и микроструктура (б–г) металла после старения: а – поперечное сечение; б – переходная зона между слоями, $\times 100$; в – внутри слоя, $\times 200$; г – внутри слоя, $\times 1000$

Fig. 3. Macrostructure (a) and microstructure (б–г) of metal after ageing: а is cross-section; б is transition zone between layers, $\times 100$; в is inside the layer, $\times 200$; г is inside the layer, $\times 1000$

С целью определения уровня и однородности механических свойств измерения твердости по методу Виккерса проводились в виде дорожки по высоте выращенной стенки сверху вниз с шагом 0,2 мм, так чтобы захватить не менее 5 слоев. Результаты проведенных измерений и их статистической обработки представлены на **рис. 4** и в **табл. 3**. Сравнительный анализ полученных результатов показал, что в выращенном металле наблюдается незначительный разброс значений твердости относительно среднего значения (367,8 HV). После старения общий уровень твердости увеличился (среднее значение 652,4 HV), однако значительно расширился диапазон значений твердости, среднеквадратичное отклонение возросло более чем в 3 раза. Такое повышение неоднородности по твердости связано с неравномерным выделением интерметаллидов в структуре, а именно их коагуляцией, что, в свою очередь, обусловлено химической неоднородностью кристаллизующегося металла при наплавке.

Таким образом, проведение традиционной термической обработки для наплавленного металла из мартенситно-стареющей стали (старение при 480°C) в случае аддитивного выращивания изделий приведет к неоднородности механических характеристик, что негативно скажется на его эксплуатационных свойствах.

Для повышения однородности структуры наплавленного металла перед старением были проведены

закалка (ТО2) и гомогенизация с последующей закалкой (ТО4). Также дополнительно исследовалось влияние гомогенизации (ТО3) на изменение структуры наплавленного металла. Проведенные металлографические исследования показали, что после закалки в макроструктуре сохраняются очертания столбчатых зерен, при этом их размер изменяется: уменьшается длина и увеличивается ширина (**рис. 5, а**). При проведении гомогенизации и гомогенизации с последующей закалкой в макроструктуре полностью исчезают следы проявления первичной кристаллизации наплавленного металла – столбчатые макрозерна, и формируется мелкозернистая равноосная структура (**рис. 5, б, в**).

Микроструктура металла после закалки представляет собой реечный мартенсит и отдельные мелкие интерметаллидные включения (**рис. 6, а, б**). Скорее всего, это остатки нерастворившихся включений, которые располагались в наплавленном металле в междендритном пространстве. При гомогенизации, вследствие более высокой температуры и более продолжительной выдержки, размер пакетного мартенсита незначительно увеличивается, при этом интерметаллидные частицы растворяются в большей степени (**рис. 6, в, г**). Проведение закалки после гомогенизации приводит к уменьшению размеров мартенситной структуры относительно гомогенизированной (**рис. 6, д, е**).

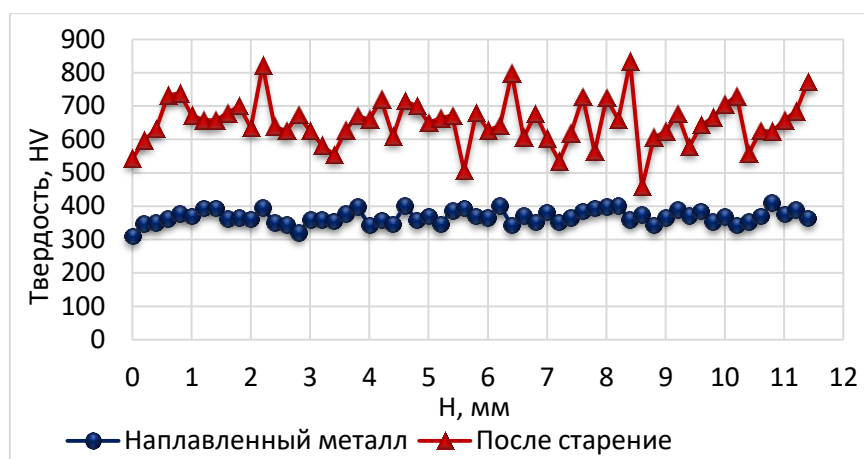


Рис. 4. Графики изменения твердости по высоте стенки H

Fig. 4. Graphs of change in hardness by wall height H

Таблица 3. Данные статистической обработки измерения твердости образцов, HV 0,2

Table 3. Statistical processing data of hardness measurements of samples, HV 0.2

Вид образца	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднеквадратичное отклонение (СКО)
Наплавленный металл	367,8	310,3	409,7	16,8
Наплавленный металл после старения (ТО1)	652,4	456,9	833,7	53,2



а



б



в

Рис. 5. Макроструктура образцов после разных видов предварительной термической обработки:

а – закалка (ТО2); б – гомогенизация (ТО3); в – гомогенизация и закалка (ТО4)

Fig. 5. Macrostructure of samples after different types of preliminary heat treatment: а is quenching (HT2);

б is homogenization (HT3); в is homogenization and quenching (HT4)

Измерения микротвердости показали, что после закалки и гомогенизации с последующей закалкой уровень твердости металла одинаковый – порядка 350 HV (табл. 4), а диапазон значений твердости после закалки больше (239,3–408,3 HV), чем после гомогенизации с последующей закалкой (249,4–386,1 HV).

Таким образом, проведение предварительной гомогенизации способствует более полному растворению интерметаллидов и выравниванию химической неоднородности наплавленного металла. Для полного протекания этих процессов необходимо увеличить время выдержки, повышение температуры нежелательно, так как приведет к увеличению размера зерна.

Металлографические исследования образцов после упрочняющей термической обработки показали

следующее. После проведения закалки со старением (ТО5) в макроструктуре сохраняются столбчатые зерна, как и после закалки, на микроуровне – элементы первичной дендритной структуры, что хорошо видно при небольших увеличениях (рис. 7, а, б). После проведения полного цикла термической обработки (гомогенизация, закалка и старение, ТО6) как в макро-, так и в микроструктуре формируется однородная структура с аустенитными зернами перед $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращением полиэдрической формы (рис. 7, в, г).

Как известно из литературных данных [8, 9], в процессе старения мартенситно-стареющих сталей происходит выделение высокодисперсных интерметаллидов типа Ni_3Ti и др. размером от 1-2 мкм и меньше в результате их выделения на дислокациях. В связи с этим на

оптическом микроскопе выделившиеся интерметаллиды трудно различить (рис. 8, а, в). Однако применение поляризованного света при оптической микроскопии позволяет выделить упрочняющие фазы от «матрицы». Это обусловлено тем, что в поляризованном свете плоскостные и изотропные структурные составляющие остаются темными и не меняют своей освещенности, а объемные и анизотропные фазы, такие как неметаллические включения, карбиды и интерметаллиды, «светятся» и приоб-

ретают определенную окраску в зависимости от химического состава и кристаллографической ориентации. На рис. 8, б, г представлена микроструктура исследуемых образцов в поляризованном свете, где хорошо прослеживается характер распределения интерметаллидов. Практически равномерное выделение интерметаллидов наблюдается в металле после проведения термической обработки по полному циклу (ТО6).

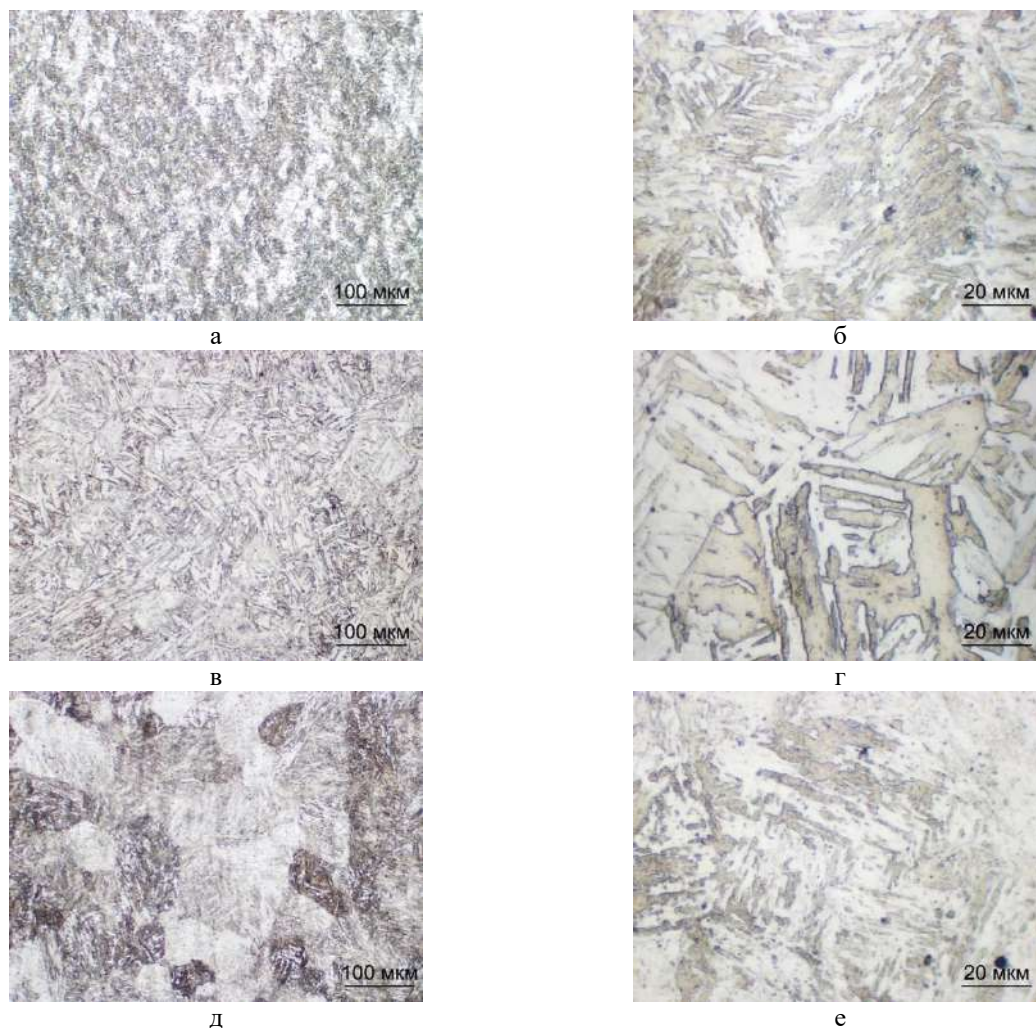


Рис. 6. Микроструктура образцов после разных видов предварительной термической обработки:

а, б – закалка (ТО2); в, г – гомогенизация (ТО3); д, е – гомогенизация и закалка (ТО4);

а, в, д – увеличение $\times 200$; б, г, е – увеличение $\times 1000$

Fig. 6. Microstructure of samples after different types of preliminary heat treatment: а, б are quenching (HT2);

в, г are homogenization (HT3); д, е are homogenization and quenching (HT4); а, в, д are magnification $\times 200$;

б, г, е are magnification $\times 1000$

Таблица 4. Твердость образцов после различных видов предварительной термической обработки, HV 0,2

Table 4. Hardness of samples after various types of preliminary heat treatment, HV 0.2

Вид термической обработки	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднеквадратичное отклонение
Закалка (ТО2)	350,0	239,3	408,3	25,1
Гомогенизация (ТО3)	335,4	226,1	391,3	28,7
Гомогенизация и закалка (ТО4)	348,7	249,4	386,1	19,8

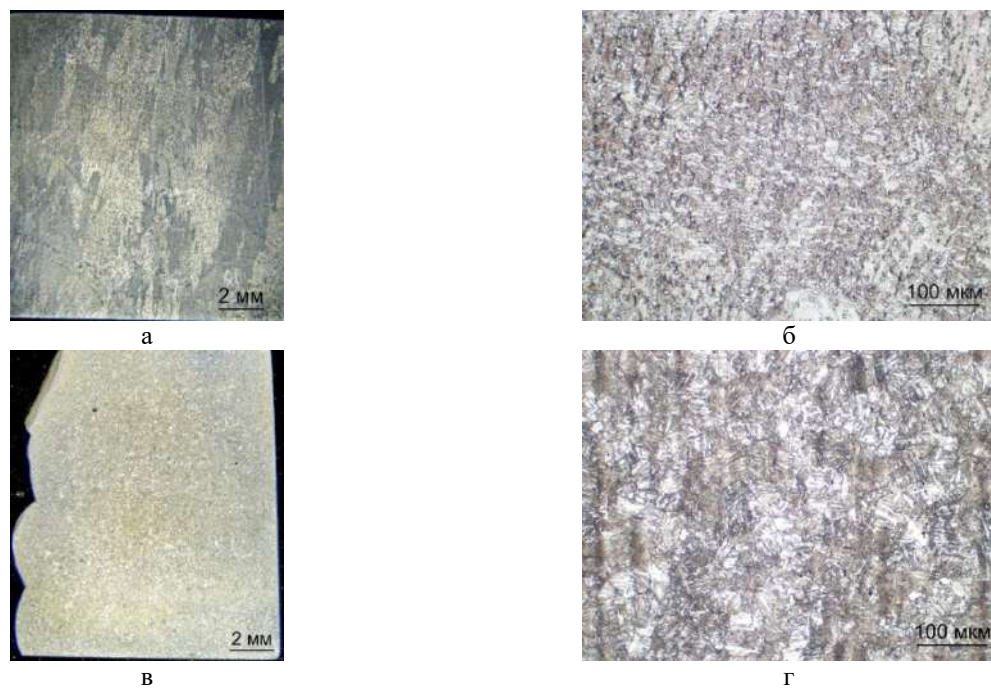


Рис. 7. Структура образцов после разных видов предварительной термической обработки:

а, б – закалка и старение (ТО5); в, г – гомогенизация, закалка и старение (ТО6);

а, в – макроструктура; б, г – микроструктура, увеличение $\times 200$

Fig. 7. Structure of samples after different types of preliminary heat treatment: а, б are quenching and ageing (HT5); в, г are homogenization, quenching and ageing (HT6); а, в are macrostructure; б, г are microstructure, magnification $\times 200$

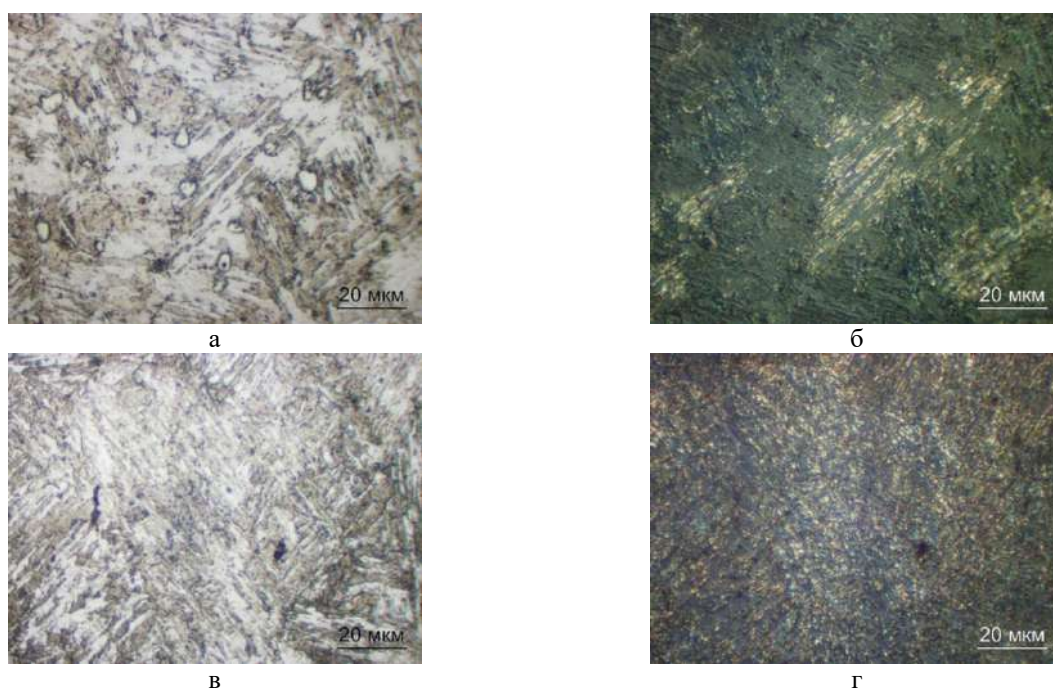


Рис. 8. Микроструктура образцов после разных видов термической обработки, увеличение $\times 1000$:

а, б – закалка и старение (ТО5); в, г – гомогенизация, закалка и старение (ТО6); а, в – светлое поле; б, г – поляризованный свет

Fig. 8. Microstructure of samples after different types of heat treatment, magnification $\times 1000$:

а, б are quenching and ageing (HT5); в, г are homogenization, quenching and ageing (HT6);

а, в are bright field; б, г are polarized light

Разный характер однородности формирующейся структуры при разной подготовке металла перед старением подтверждается результатами изменения твердости по высоте наплавленной стенки. Проведение гомогенизации перед закалкой со старением приводит к более однородному распределению твердости, чем после проведения закалки с отпуском (рис. 9). Диапазон значений твердости после термической обработки по режиму ТО5 составляет 384,6–853,0 HV (среднее значение 596,0 HV), а по режиму ТО6 – 623,3–761,8 HV со средним значением 680,6 HV (табл. 5).

Сравнительный анализ твердости всех исследуемых вариантов упрочняющей термической обработки для выращенной стенки представлен на рис. 10, здесь же для сравнения приведено значение твердости для стали мартенситно-старееющего класса.

Из сводной диаграммы видно, что термическая обработка, включающая полный цикл (ТО6), приводит к увеличению твердости наплавленной стали и уменьшению ее неоднородности, в сравнении с другими видами термической обработки. Кроме этого, в процессе измерения микротвердости было отмечено, что вокруг всех отпечатков индентора на образцах, термически обработанных по режимам ТО2 и ТО3, наблюдались следы деформации, свидетельствующие о повышенном уровне внутренних напряжений в металле (рис. 11). На образце после термической обработки с предварительной гомогенизацией (ТО6) они отсутствовали. То есть проведение предварительной гомогенизации способствует более полному снятию внутренних напряжений, которые возникают в процессе наплавки при выращивании изделия.

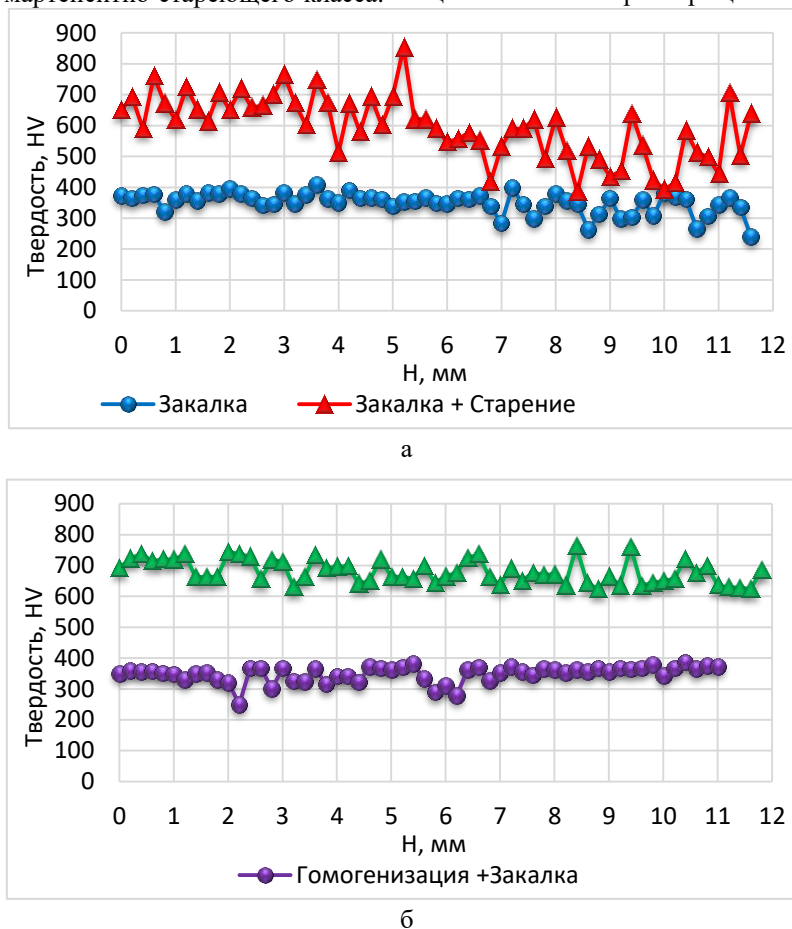


Рис. 9. Графики изменения твердости по высоте стенки H: а – закалка, закалка + старение; б – гомогенизация + закалка, гомогенизация + закалка + старение

Fig. 9. Graphs of change in hardness by wall height H: а is quenching, quenching + ageing; б is homogenization + quenching, homogenization + quenching + ageing

Таблица 5. Твердость образцов после различных видов окончательной термической обработки, HV 0,2
Table 5. Hardness of samples after various types of final heat treatment, HV 0.2

Вид термической обработки	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднеквадратичное отклонение (СКО)
Закалка и старение (ТО5)	596,0	384,6	853,0	83,0
Гомогенизация, закалка и старение (ТО6)	680,6	623,3	761,8	33,3

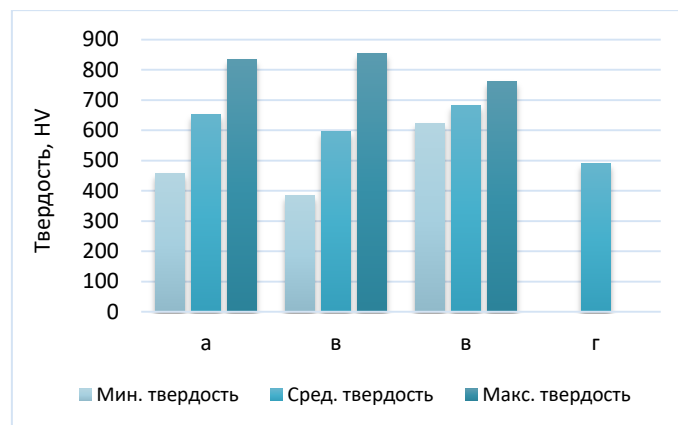


Рис. 10. Сводная диаграмма значений твердости наплавленного металла после разных видов термической обработки: а – старение (ТО1); б – закалка и старение (ТО5); в – гомогенизация, закалка и старение (ТО6); г – для стали типа 03Н18К9М5Т после закалки и старения (классический вариант)

Fig. 10. Summary diagram of hardness values of deposited metal after different types of heat treatment: а is ageing (HT1); б is quenching and ageing (HT5); в is homogenization, quenching and ageing (HT6); г is for steel of 03Ni18Co9Mo5Ti type after quenching and ageing (classic option)

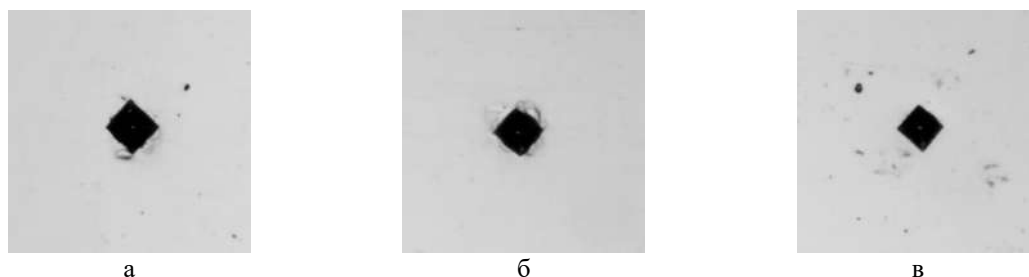


Рис. 11. Вид отпечатков при измерении микротвердости: а – старение (ТО1); б – закалка и старение (ТО5); в – гомогенизация, закалка и старение (ТО6)

Fig. 11. Type of prints during microhardness measurement: а is ageing (HT1); б is quenching and ageing (HT5); в is homogenization, quenching and ageing (HT6)

Закключение

Таким образом, для изделий, получаемых по аддитивной технологии методами проволоочной электродугой наплавки из мартенситно-стареющей стали, нежелательно применение таких видов термической обработки, как старение или закалка со старением. Данные виды термической обработки не обеспечивают получения однородной структуры с равномерным распределением упрочняющих интерметаллидных включений, что приводит к неоднородности механических характеристик, соответственно, негативно скажется на эксплуатационных свойствах. Для получения более однородных структуры и механических свойств, а также более полного снятия остаточных внутренних напряжений термическая обработка должна включать гомогенизирующий отжиг.

Наиболее рациональный режим термической обработки: гомогенизирующий отжиг при $T = 1100^{\circ}\text{C}$, нагрев с печью, выдержка более 1,5 ч, охлаждение в печи до 200°C ; закалка, $T = 830^{\circ}\text{C}$, выдержка более 40 мин, охлаждение в воде, старение, $T = 480^{\circ}\text{C}$, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе.

Список источников

1. Худойкулов Н.З. Аддитивное производство металлических конструкций // Композиционные материалы. 2019. № 3. С. 1-2.
2. Особенности материалов и технологий аддитивного производства изделий / Кубанова А.Н., Сергеев А.Н., Добровольский Н.М. и др. // Чебышевский сборник. 2019. Т. 20. № 3. С. 453-477.
3. Лаев К.А. Влияние легирования и термической обработки на структуру и свойства коррозионностойких высокохромистых сталей мартенситного и супермартенситного классов для изготовления труб нефтегазового сортамента: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2016. 22 с.
4. Агбалян С.Г., Симонян В.А. Обзор особенностей, методов производства и перспектив использования мартенситно-стареющих сталей // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 8. С. 2-3.
5. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы: справ. изд. / А.П. Шлямнев и др. М.: Интермет Инжиниринг, 2000.
6. Casati R., Lemke J., Vedani M. Microstructural and Mechanical Properties of as Built, Solution Treated and

- Aged 18 Ni (300 grade) Maraging Steel Produced by Selective Laser Melting // *Metall. Ital.* 2017, vol. 109, pp. 11-20.
7. Перкас М.Д., Кардонский В.М. Высокопрочные мартенситно-старение стали. М.: Металлургия, 1970. 224 с.
 8. Полунов И.Л. Исследование влияния различных видов термообработки на структуру и прочностные свойства высокопрочных мартенситно-старение сталей // *Труды ВИАМ.* 2018. №3 (63). С. 3-11. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-3-11
 9. Паршуков Л.И., Гильмутдинов Ф.З., Скупов А.А. Исследование сварных швов мартенситно-старение стали типа 03N18K9M5T после локальной термоциклической обработки сталей // *Труды ВИАМ.* 2017. №7 (55). С. 55-60. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-6-6
 10. Bai Y.C., Wang D., Yang Y.Q., Wang H. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of maraging steel by selective laser melting // *Mater. Sci. Eng. A* 2019, vol. 760, pp. 105-117.
 11. Технологические особенности производства мартенситно-старение стали ВКС-180 / Маркова Е.С., Якушева Н.А., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б. // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2013. №7. Ст. 01. URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=120
 12. Ильина Ю. С. Влияние термической обработки на структуру и свойства стали // *Молодой ученый.* 2020. № 51 (341). С. 40-42.
 13. Ageing behaviour of an Fe-20Ni-1.8Mn-1.6Ti-0.59Al (wt%) maraging alloy: Clustering, precipitation and hardening / Pereloma E.V., Shekhter A., Miller M.K., Ringer S.P. // *Acta Mater.* 2004, vol. 52, pp. 5589-5602
 14. Wu W.P., Wang X. Microstructure and mechanical properties of maraging 18Ni-300 steel obtained by powder bed based selective laser melting process. *Rapid Prototyp.* // *J. Mater. Sci.* 2020, vol. 26, pp. 1379-1387.
 15. Effects of aging time on the microstructure and mechanical properties of laser-cladded 18Ni300 maraging steel / Zhu H.M., Zhang J.W., Hu J.P., Ouyang M.N., Qiu C.J. *J. Mater. Sci.* 2021, vol. 56, pp.8835–8847.
 - tensitic and supermartensitic grades for the manufacture of oil and gas pipes. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Chelyabinsk, 2016. 22 p.
 4. Agbalyan, S.G., Simonyan V.A. Review of features, methods of production and prospects for the use of martensitic aging steels. *Mezhdunarodniy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2022;(8):2-3.
 5. Shlyamnev A.P. et al. *Korroziionnostoikie, zharostoikie i vysokoprochnnye stali i splavy: sprav. izd* [Corrosion-resistant, heat-resistant and high-strength steels and alloys: reference edition]. Moscow: Internet Engineering, 2000.
 6. Casati R., Lemke J., Vedani M. Microstructural and Mechanical Properties of as Built, Solution Treated and Aged 18 Ni (300 grade) Maraging Steel Produced by Selective Laser Melting. *Metall. Ital.* 2017;109:11-20.
 7. Perkas M.D., Kardonsky V.M. *Vysokoprochnnye marten-sitnostareyushchie stali* [High-strength maraging steels]. Moscow: Metallurgy, 1970, 224 p.
 8. Polunov I.L. Research of the influence of different types of heat treatment on the structure and strength properties of high-strength martensitic aging steels. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2018;(3(63)):3-11. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-3-11
 9. Parshukov L.I., Gilmudinov F.Z., Skupov A.A. Investigation of welds of martensitic-aging steel of 03N18K9M5T type after local thermocyclic treatment of steels. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2017;(7(55)):55-60. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-6-6
 10. Bai Y.C., Wang D., Yang Y.Q., Wang H. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of maraging steel by selective laser melting. *Mater. Sci. Eng.* 2019;760:105-117.
 11. Markova E.S., Yakusheva N.A., Pokrovskaya N.G., Shalkevich A.B. Technological features of production of martensitic-aging steel VKS-180. *Trudy VIAM: elektron. nauch.-tekhn. zhurn.* [Proceedings of VIAM: Electronic scientific and technical journal]. 2013;(7). Available at: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=120
 12. Ilyina Yu. S. Influence of heat treatment on the structure and properties of steel. *Molodoy ucheniy* [Young Scientist]. 2020;(51(341)):40-42.
 13. Pereloma E.V., Shekhter A., Miller M.K., Ringer S.P. Ageing behaviour of an Fe-20Ni-1.8Mn-1.6Ti-0.59Al (wt%) maraging alloy: Clustering, precipitation and hardening. *Acta Mater.* 2004;52:5589-5602
 14. Wu W.P., Wang X. Microstructure and mechanical properties of maraging 18Ni-300 steel obtained by powder bed based selective laser melting process. *Rapid Prototyp. J. Mater. Sci.* 2020;26:1379-1387.
 15. Zhu H.M., Zhang J.W., Hu J.P., Ouyang M.N., Qiu C.J. Effects of aging time on the microstructure and mechanical properties of laser-cladded 18Ni300 maraging steel. *J. Mater. Sci.* 2021;56:8835-8847.

References

1. Khudoykulov N.Z. Additive manufacturing of metal structures. *Kompozitsionnye materialy* [Composite materials], 2019;(3):1-2. (In Russ.)
2. Kubanova A.N., Sergeev A.N., Dobrovolsky N M. et al. Features of materials and technologies of additive manufacturing of products. *Chebyshevskiy sbornik* [Chebyshev Collection], 2019;20(3):453-477. (In Russ.)
3. Laev K.A. Vliyaniye legirovaniya i termicheskoy obrabotki na strukturu i svoistva korroziionnostoikih vysokohromistyh staley martensitnogo i supermartensitnogo klassov dlya izgotovleniya trub neftegazovogo sortamenta: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Effect of alloying and heat treatment on the structure and properties of corrosion-resistant high-chromium steels of mar-

Поступила 26.08.2024; принята к публикации 01.10.2024; опубликована 28.03.2025
Submitted 26/08/2024; revised 01/10/2024; published 28/03/2025

Мосягин Илья Анатольевич – аспирант,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.
Email: iluha_mos@mail.ru

Ольшанская Татьяна Васильевна – доктор технических наук, доцент,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.
Email: tvo66@mail.ru. ORCID 0000-0001-7840-8338

Иля А. Mosyagin – Postgraduate Student,
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.
Email: iluha_mos@mail.ru

Tatiana V. Olshanskaya – DrSc (Eng.), Associate Professor,
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.
Email: tvo66@mail.ru. ORCID 0000-0001-7840-8338



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 666.3

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-85-91

ПОЛУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ГАФНАТОВ И ТИТАНАТОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ

Шарипзянова Г.Х.

Московский политехнический университет, Москва, Россия

Аннотация. С открытием новых горизонтов в ядерной энергетике, особенно в контексте разработки реакторов третьего поколения и их усовершенствованных вариантов, значительно возросли требования к безопасности и экологической устойчивости ядерных технологий. Важным аспектом этих требований является эффективное функционирование материалов для поглощающих элементов, которые играют ключевую роль в контроле и регуляции ядерной реакции. Поглотители обеспечивают возможность надежного управления реакцией, снижая риски и соблюдая нормы защиты окружающей среды. Гафнаты представляют собой один из наиболее перспективных классов материалов для использования в новых реакторах. Эти соединения характеризуются высокой нейтронной поглощающей способностью и стабильными физико-химическими свойствами при высоких температурах. Одним из главных преимуществ титанатов является их способность создавать эффективные структуры, способные быстро реагировать на изменения условий работы реактора. Это позволяет им сохранять свои характеристики даже в условиях высоких температур и радиационного воздействия. Рассмотрены преимущества использования гадолиния в качестве выгорающего поглотителя, способного увеличить исходную загрузку топлива и расширить активную зону реактора, а также поле энерговыделения. Приведены результаты экспериментального исследования коррозионной стойкости титаната гадолиния, полученного механохимическим методом. Испытания проводятся в автоклаве при высоких температурах и давлении, с измерением изменений образцов в процессе термообработки. Полученные данные повышают эффективность применения дополнительного материала. В заключении сделан вывод о необходимости разработки технологий массового производства поглощающих элементов, а также улучшения управления качеством и снижения затрат на их изготовление. Отмечено, что разработка новых материалов на основе сложнооксидной керамики редкоземельных элементов требует решения проблем, связанных с их введением в массовое производство, улучшением качества и сокращением производственных издержек.

Ключевые слова: гафнаты, титанаты, оксиды, редкоземельные металлы, механохимия, синтез, свойства

© Шарипзянова Г.Х., 2025

Для цитирования

Шарипзянова Г.Х. Получение и применение гафнатов и титанатов редкоземельных металлов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 85-91. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-85-91>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

PRODUCTION AND APPLICATION OF HAFNATES AND TITANATES OF RARE EARTH METALS

Sharipzyanova G.Kh.

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Abstract. With the opening of new horizons in nuclear energy, especially in the context of the development of third-generation reactors and their improved versions, the requirements for safety and environmental sustainability of nuclear technologies have increased significantly. An important aspect of these requirements is the efficient functioning of materials for absorber elements, which play a key role in monitoring and regulating the nuclear reaction. Absorbers ensure the possibility of reliable reaction control, reducing risks and complying with environmental protection standards. Hafnates are one of the most promising grades of materials for use in new reactors. These compounds are characterized by high neutron absorption capacity and stable physicochemical properties at high temperatures. One of the main advantages of titanates is their ability to create effective structures that can quickly respond to changes in reactor operating conditions. This allows them to retain their characteristics even at high temperatures and radiation exposure. The advantages of using gadolinium as a burnable absorber, which can increase the initial fuel load and expand the reactor core, as well as the energy release field, are considered. The article presents the results of an experimental study of the corrosion resistance of gadolinium titanate obtained by a mechanochemical method. The tests are carried out in an autoclave at high temperatures and pressure, with measurements of changes in samples during heat treatment. The data obtained increase the efficiency of using additional material. The conclusion is made on the need to develop technologies for mass production of absorbing elements, as well as improving the quality control and reducing the costs of manufacture. It is noted that the development of new materials based on complex oxide ceramics of rare earth elements requires solving problems associated with the introduction into mass production, quality improvement and production costs reduction.

Keywords: hafnates, titanates, oxides, rare earth metals, mechanochemistry, synthesis, properties

For citation

Sharipzyanova G.Kh. Production and Application of Hafnates and Titanates of Rare Earth Metals. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 85-91. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-85-91>

Введение

Использование гафнатов и титанатов, содержащих редкоземельные элементы, в качестве материалов для поглощающих элементов (ПЭЛ) активно исследуется в последние годы в разработке ядерных реакторов нового поколения. Это обусловлено как стремлением к обеспечению безопасности эксплуатации реакторов, так и требованиями к государственной защите. Основное предназначение ПЭЛ заключается в обеспечении контролируемого протекания ядерной реакции. Применение сложных оксидов лантаноидов, таких как оксид диспрозия и оксид европия, в составе поглощающих элементов нового поколения позволяет улучшить их технологические свойства. В дополнение к гафнатам, титанатам и цирконатам, содержащим лантаноиды, создается экономический интерес для различных промышленных применений [1-3]. Эти соединения находят применение в качестве каталитических материалов, термических барьеров, а также в микроэлектронике и оптике. Особенности сложных оксидов заключается в их способности образовывать твердые растворы в различных составах, что позволяет целенаправленно регулировать их физико-химические характеристики [4, 5].

Механохимический синтез, основанный на интенсивном механическом воздействии, является эф-

фективным и экономичным методом получения сложных оксидов. Этот процесс позволяет получать порошкообразные материалы с высокой степенью открытости и контролируемыми размерами частиц. Использование высокоэнергетических турбин обеспечивает эффективное разрушение исходных компонентов и последующее образование новых сетевых связей, формируя требуемый продукт с заданными свойствами.

Гадолиний и его соединения являются обязательными компонентами, применяемыми в ядерной энергетике, где они используются в качестве выгорающих поглотителей. Гадолиний обладает уникальной технологией, позволяющей эффективно использовать нейтроны, включая тепловые и промежуточные. Это обусловлено наличием изотопов ^{155}Gd и ^{157}Gd , характеризующих различные сечения захвата нейтронов. Гадолиний относится к быстро выгорающим поглотителям, что означает, что он быстро движется и позволяет предотвратить потерю нейтронов по мере выгорания изотопов. По этой причине гадолиний обычно не применяется в регулирующих элементах реакторов, предназначенных для длительного использования. Однако его применение в выгорающих поглотителях позволяет увеличить начальную загрузку топлива в активную зону реактора, тем самым продлевая топливный цикл и оп-

тимизируя работу реактора. Кроме того, использование оксидов гадолиния позволяет увеличить дальность энерговыделения в активном направлении и снизить общее количество регулирующих элементов [6, 7].

В современной химии материалов синтез сложных оксидов – это область инноваций и попытки сыграть ключевую роль в формировании различных подходов, которые предлагают уникальные способы получения материалов с заданными свойствами, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. Выбор конкретного метода зависит от требуемых свойств конкретного продукта и желаемого размера частиц.

Материалы и методы исследования

Цель исследования – повышение коррозионной стойкости титаната гадолиния, не снижая высокой сопротивляемости радиационному воздействию.

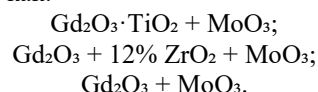
В работе исследован механохимический синтез как наиболее экономичный и целесообразный метод получения гафнатов и титанатов лантаноидов. Этот метод позволяет получать порошковые соединения с помощью механохимических составов и различных физико-механических методов.

Для исследования коррозионной стойкости образцов их поместили в автоклав. Образцы представляют собой негерметичные материалы, содержащие внутри порошкообразные вещества. Термическая обработка проводилась при температуре 300°C и давлении 17 МПа. Образцы извлекали из автоклава через печь на некоторое время, после чего проводилось измерение их массы.

Исследование посвящено актуальной проблеме разработки перспективных поглощающих элементов для ядерных реакторов нового поколения с акцентом на использование гафнатов и титанатов редкоземельных металлов, в частности гадолиния. Эти материалы играют ключевую роль в обеспечении контролируемого протекания ядерного режима и повышении без-

опасности эксплуатации реактора. Рассмотрена необходимость применения сложных оксидов лантаноидов, таких как оксид диспрозия и оксид европия, для усовершенствования технологических свойств ПЭЛ. Особое внимание уделено гадолинию, который эффективно обеспечивает поглощающие свойства нейтронов в широком энергетическом контексте.

Основным объектом исследования являлся титанат гадолиния ($Gd_2O_3 \cdot TiO_2$), полученный механохимическим методом. Также изучались составы с добавлением оксидов молибдена (MoO_3) и циркония (ZrO_2), такие как:



Коррозионные испытания в автоклаве проводились в течение 3000 ч (около 125 суток) при температуре 300°C и давлении 17–18 МПа. При проведении исследований применялись методы коррозионных испытаний [8].

Полученные результаты и их обсуждение

Титанат гадолиния обеспечивает стабильность в экстремальных условиях. Для оценки коррозионной стойкости материалов в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации ядерных реакторов, использовали автоклавные испытания, в ходе которых материалы испытываются при очень высоких температурах и в течение длительного времени (см. **рисунк**) [9].

В частности, титанат гадолиния изменял свое поведение в автоклаве при температуре 300°C и давлении 18 МПа в течение 3000 ч. Результаты показали, что соединение гадолиния с оксидом титана значительно повышает его устойчивость к воздействию окружающей среды по сравнению с другими соединениями (см. **таблицу**).

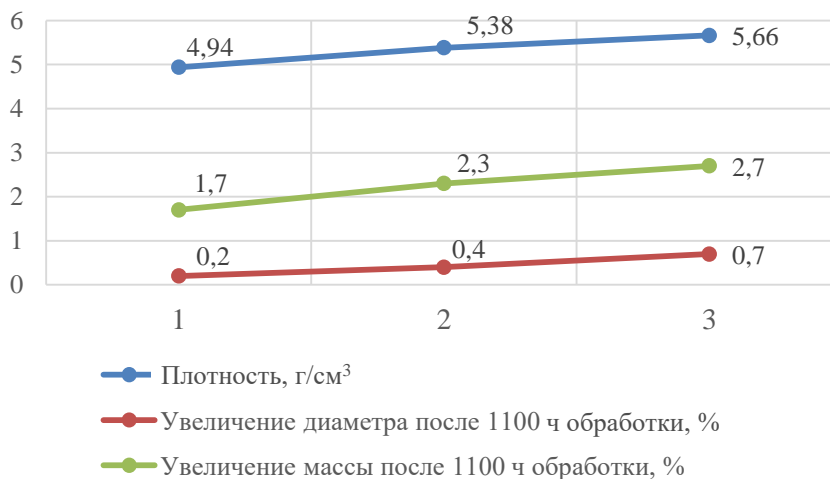


Рис. Результаты испытаний титаната гадолиния: 1 – состав порошков $Gd_2O_3 \cdot TiO_2 + MoO_3$; 2 – состав порошков $Gd_2O_3 + 12\% ZrO_2 + MoO_3$; 3 – состав порошков $Gd_2O_3 + MoO_3$;

Fig. Gadolinium titanate test results: 1 is composition of powders $Gd_2O_3 \cdot TiO_2 + MoO_3$; 2 is composition of powders $Gd_2O_3 + 12\% ZrO_2 + MoO_3$; 3 is composition of powders $Gd_2O_3 + MoO_3$

Таблица. Результаты автоклавных испытаний
Table. Autoclave test results

Химический состав	Температура, °C	Изменение массы, %	Изменение диаметра, %	Фазовый состав
80%Gd ₂ O ₃ + 18% TiO ₂ + 2% MoO ₃	1500	3,9	0	Gd ₂ MoO ₁₂
84,5%Gd ₂ O ₃ + 14,5% MoO ₃ + 1% MgO	1500	0,3	0	Gd ₂ TiO ₅

Данный материал обладает превосходной коррозионной стойкостью. За указанный период времени не было зафиксировано значительных изменений ни массы, ни диаметра образцов, что свидетельствует об отсутствии выраженных технологических процессов.

Для сравнения аналогичные эксперименты были проведены с молибдатом и цирконатом гадолиния. Результаты этих испытаний показали, что титанат гадолиния сохраняет более высокую коррозионную устойчивость по сравнению с материалами других соединений.

Среди методов жидкофазного синтеза используется гидротермальный метод. В этом процессе режим поддерживают в герметичных сосудах (автоклавах) при повышенных температурах и давлениях, что позволяет формировать кристаллические структуры с высокой степенью воздействия. Конкретный пример – синтез титаната лантана, где соосажденные гидроксиды титана и лантана взаимодействуют в рамках катализатора (например, гидроксида калия). Пособработка с использованием уксусной кислоты и промывки водой удаляет нежелательные вредные продукты, обеспечивая чистоту конечного материала.

Другой подход – соосаждение, которое позволяет получить более однородные по составу порошки, чем при твердофазном синтезе. В этом случае необходимые ионы одновременно осаждаются из растворов в виде нерастворимых соединений, которые в дальнейшем подвергаются отжигу. Так, гафнат лантана можно получить, добавляя гидроксид натрия к раствору, содержащему хлорид лантана и нитрат гафния. Образовавшиеся осадки помещают в автоклав, а затем отмывают от примеси.

Золь-гель-технология – это метод, в котором исходные соединения, часто алкоксиды металлов, растворяются в воде или спирте. В результате гидролиза и поликонденсации образуется золь, который затем превращается в гель, а после сушки и отжига – в оксидный порошок. Этот метод позволяет получать материалы с контролируемым размером пор.

Сжигание металлоорганических прекурсоров – еще один метод, позволяющий получать порошкообразные оксиды, но уже путем сжигания специально приготовленных соединений, содержащих требуемые металлы. В результате быстрого нагревания используется мелкодисперсный порошкообразный оксид, часто находящийся на большой площади поверхности.

Альтернативным и эффективным способом получения гафнатов лантаноидов является сжигание металлоорганических прекурсоров или смесей нитратов металлов в составе органического топлива, такого как

глицин. Контролируемое сжигание обеспечивает образование мелкодисперсных порошков с заданными свойствами. Однако данные методы требуют дальнейшего изучения параметров синтеза, таких как температура, тип горения и т. д., так как они определяют состав и свойства конечного продукта.

Для получения высокодисперсных гафнатов редкоземельных металлов с пироклорной структурой применяют диспергационные и конденсационные методы, соблюдение требуемых фаз внутри системы [10].

Выбор метода синтеза зависит от области применения соединений. Если материал планируется использовать в качестве покрытий, предпочтение отдается крупнодисперсным порошкам [11].

Твердофазный синтез с измельчением и прессованием исходных смесей оксидов используется для получения чистых соединений сложного оксида, включающих перемешивание, прессование, термообработку при разных температурах и последующее измельчение для дальнейшей обработки.

Сложные оксиды лантаноидов получают путем интенсивного помола в шаровой мельнице. Исследуют структурные изменения, возникающие при спекании, а также электропроводность получаемых соединений. Термодинамические характеристики оксидов также изучаются, однако фазовый состав и структура продуктов часто не учитываются [12].

Для получения растворов переменного состава используется метод соосаждения, позволяющий наносить их на металлические подложки.

Пленки на основе La₂O₃·HfO₂ получают методом MOCVD с использованием гафния и лантана. Структура менялась в зависимости от состава лантана.

Для резистивного напыления использовали расплавы, для электронно-лучевого – таблетки. Соединения с низкотемпературным плавлением напыляют резистивным методом, а тугоплавкие – электронно-лучевым.

Гафнат гадолиния может быть получен с применением термической обработки, включающей сушку и прокаливание. Для изучения свойств привлечены такие методы анализа, как рентгенофазовый и элементный. Для определения оптических и механических характеристик, влагостойкости и радиационной стойкости материалов дополнительно применяют электронно-лучевое и магнетронное напыление и соответствующие измерения [13-15].

Исследования показывают, что соотношение атомов гафния и гадолиния в полученном соединении составляет 2:1. Соединение такой структуры, как флюорит, и экспериментальный метод синтеза не да-

ли хороших результатов в рентгенофазовом анализе. Мишени для электронно-лучевого напыления получают холодным прессованием с последующим прокаливанием. Для увеличения плотности и уменьшения пористости таблетки отжигают в вакууме. Мишени для магнетронного напыления получают методом горячего прессования [16]. Горячее прессование позволяет получать материалы с низкой пористостью, что выгодно отличает его от метода холодного прессования с последующим отжигом, при котором пористость может достигать 16–35%.

Гафнат гадолия представляет собой перспективное соединение для создания покрытий, работающих в видимой и ближней инфракрасной зоне. Важно отметить, что способ получения покрытия не оказывает отрицательного влияния на его оптические свойства. По своим характеристикам гафнат гадолия имеет общие с оксидом циркония, гафния и цирконата гадолия свойства и отличается при этом высокой механической прочностью, влажностойкостью и повышенной радиационной стойкостью, особенно при горячем прессовании в вакуумной среде [17, 18].

Особенностью гафната гадолия является снижение его показателя преломления в ближней и видимой зоне инфракрасного излучения [21, 22]. При этом материал имеет низкое отражение света, что делает его привлекательным для использования в оптических покрытиях. Важное замечание: метод получения покрытий не обеспечивает хороших надежных оптических свойств [23].

Исследования в области ядерной энергетики ведут активный поиск альтернатив традиционным используемым материалам для поглощающих элементов, таких как бористая сталь и карбид бора. Эти материалы, несмотря на свою эффективность для ряда групп нейтронов, имеют недостатки, ограничивающие их применение в современных реакторах.

Постоянное радиационное повреждение материалов под действием интенсивного нейтронного облучения, неизбежно возникающего в процессе функционирования реактора, приводит к разрушению материала, что снижает его механическую прочность и надежность работы в целом. Накопление газообразного гелия в материале также является существенным фактором, влияющим на его свойства.

Кроме того, эффективность регулирующих элементов на основе бора ограничена выгоранием изотопов бора до уровня 45–50%. В частности, в реакторах типа ВВЭР-1000, где активно используются регулирование и автоматическая защита, выключение этого предела происходит за короткие сроки, а именно за три года в режиме автоматического регулирования и за пять лет в режиме автоматической защиты.

Для повышения ресурса регулирующих элементов необходима замена карбида бора на более радиационно-стойкий материал. Оксид европия, хотя и обеспечивает более длительный срок службы регулирующих элементов, также имеет ряд недостатков. Главным из них является образование долгоживущих

высокоактивных радионуклидов ^{152}Eu и ^{154}Eu в процессе работы реактора, что усложняет хранение и транспортировку отработанных материалов. Возникновение аварийных ситуаций на АЭС в результате неконтролируемого распространения данных радионуклидов может повлечь за собой серьезные экологические последствия.

В поисках более совершенных материалов для регулирующих элементов внимание было обращено на титанат и гафнат диспрозия, а также на металлический гафний. Исследования показали, что эти материалы обладают значительно более высокой радиационной стойкостью по сравнению с бористой сталью и карбидом бора.

В области ядерной энергетики при выборе материалов для элементов управления особенно важна их радиационная стойкость. Традиционные материалы, такие как бористая сталь и карбид бора, имеют ограниченный срок службы из-за радиационных повреждений. Альтернатива в виде титаната диспрозия даёт лучшие результаты. Этот материал протестировал 4 года работы в режиме регулирования на Нововоронежской АЭС и 18 лет в исследовательском реакторе МИР. Тем не менее при длительной эксплуатации возникает проблема истирания оболочек, особенно в кластерных органах управления реакторами типа PWR.

В реакторах типа РБМК-1000 (1500) применение титаната диспрозия вместо карбида бора в регулирующих элементах является целесообразным и перспективным направлением.

Технологический процесс получения покрытия не влияет на базовые свойства гафната гадолия [24, 25]. Для повышения эксплуатационных характеристик регулирующих элементов необходимо заменить карбид бора на более радиационно-стойкий материал [26, 27].

Заключение

1. Несмотря на значительные достижения в разработке новых материалов для ПЭЛ, сохраняется необходимость в создании эффективных технологий для их массового производства, улучшения управления качеством и сокращения затрат.

2. Экспериментальные исследования коррозионной стойкости титаната гадолия, полученные механикохимическим методом, показали, что базовым составом материала является соединение гадолия с оксидом титана ($\text{Gd}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$). Этот состав продемонстрировал повышенную устойчивость к высоким температурам (300°C) и давлению (18 МПа) в течение 3000 ч в автоклаве по сравнению с соединениями гадолия с оксидом молибдена и оксидом циркония. Полученные данные подтверждают перспективность использования титаната гадолия в качестве материала для поглощающих элементов в ядерных реакторах нового поколения.

Список источников

- Третьяков Ю.Д., Лепис Х. Химия и технология твердофазных материалов: учеб. пособие. Москва: Изд-во МГУ, 1985. 253 с.
- Technology for nonwaste recovery of tailings of the mizur mining and processing plant / Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. // Metallurgist. 2023, vol. 66, no. 11-12, pp. 1476-1480. DOI: 10.1007/s11015-023-01462-y.
- Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining / Brigida V.S., Golik V.I., Klyuev R.V., Sabirova L.B., Mambetalieva A.R., Karlina Yu.I. // Metallurgist. 2023, vol. 67, no. 3-4. DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.
- Толкачева А.С., Павлова И.А. Общие вопросы технологии тонкой керамики: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 184 с.
- Синтез и исследование термической стабильности высокодисперсных тугоплавких цирконатов и гафнатов лантана и неодима для термобарьерных покрытий / В.Г. Севастьянов, Е.П. Симоненко, Н.А. Игнатов, Р.Г. Павелко, Н.Т. Кузнецов // Композиты и наноструктуры. 2009. №1. С. 50-58.
- Andrievskaya E.R. Phase equilibria in the refractory oxide systems of zirconia, hafnia and yttria with rare-earth oxides // Journal of the European Ceramic Society. 2008, vol. 28, iss. 12, pp. 2363-2388.
- Термические и теплофизические свойства теплозащитных покрытий на основе цирконата лантана / И. В. Мазилин, Л. Х. Балдаев, Д. В. Дробот, А. М. Ахметгареева, А. О. Жуков, А. Г. Хисматуллин // Перспективные материалы. 2013. №7. С. 21-30.
- ГОСТ Р 9.905 - 2007 (ИСО 7384:2001, ИСО 11845:1995). Единая система защиты от коррозии и старения. Методы коррозионных испытаний. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2020.
- McCormick P.G., Froes F.H. The fundamentals of Mechanochemical processing // JOM. November. 1998, pp. 61-65.
- Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 416 с.
- Жуков А.В., Чижевская С.В., Пьяе Пью. Гетерофазный синтез гидроксидов циркония как альтернатива осадительным методам // Химическая промышленность сегодня. 2020. № 3. С. 42-47.
- Sol-gel synthesis and crystallization kinetics of dysprosium titanate $Dy_2Ti_2O_7$ for photonic applications / Potel M. et al. // Mater. Chem. Phys. 2015, vol. 168, pp. 159-167.
- Mahato N., Gupta A., Balani K. Doped zirconia and ceria-based electrolytes for solid oxide fuel cells: a review // Nanomaterials and Energy. 2012, vol. 1, no. 1, pp. 27-45.
- Fabrication of Lu_2O_3 : Eu transparent ceramics using powder consisting of mono-dispersed spheres / C. Ma, X. Li, S. Liu, Q. Zhu, D. Huo, J.-G. Li, X. Sun // Ceramics International. 2015, vol. 41, no. 8, pp. 9577-9584.
- Патент RU 2430884 C1. Способ получения сложных оксидных соединений редкоземельных металлов / Кузнецов М.В., Морозов Ю.Г. Оpubл. 10.10.2011. Бюл. № 28.
- Патент RU 2142654 C1. Нейтроннопоглощающий материал / Захаров Ю.К., Красовский В.Д., Маковский А.В. и др. Оpubл. 10.12.1999.
- Резниченко В.А., Аверин В.В., Олюнина Т.В. Титанаты: научные основы, технология, производство. М.: Наука, 2010. 267 с.
- Ермилов А.Г., Богатырева Е.В. Предварительная механоактивация. М.: Изд. Дом МИСиС, 2012. 135 с.
- Механизм образования флюоритоподобных фаз в системах $Ti_2 Y_2 O_3 (Er_2 O_3, Sc_2 O_3)$ / Ляшенко Л.П., Никонов Ю.П., Раевский А.В., Щербакова Л.Г. // Материаловедение. 1999. № 1. С. 29-33.
- Нанокристаллические сложные оксиды, получаемые механохимическим синтезом / Григорьева Т.Ф., Барина А.П. и др. // Химия в интересах устойчивого развития. 1998. Т. 6. №2-3. С. 115-119.
- Патент РФ RU 2 124 240 C1. Полотитель нейтронов для ядерных реакторов / Рисованный В.Д., Захаров А.В., Ключков Е.П. и др. Оpubл. 27.12.1998.
- Разработка и освоение производства гафната диспрозия как поглощающего материала для органов регулирования перспективных реакторов на тепловых нейтронах / Рисованный В.Д., Захаров А.В., Муралева Е.М., Соколов В.Ф. // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР». Димитровград, 2011. № 2. С. 8-13.
- Соединения редкоземельных элементов. Карбонаты, оксалаты, нитраты, титанаты / Комиссарова Л.Н., Шацкий В.М., Пушкина Г.Я., Щербакова Л.Г., Мамсурова Л.Г., Суханова Г.Е. М.: Наука, 1984. 235 с.
- Шляхтина А.В. Морфотропия, изоморфизм и полиморфизм сложных оксидов на основе $Ln_2 M_2 O_7$ ($Ln = La-Lu, Y, Sc; M = Ti, Zr, Hf, Sn$) // Кристаллография. 2013. Т. 58. № 4. С. 545-560.
- Solid-state reaction, microstructure and phase relations in the ZrO_2 -rich region of the ZrO_2 - $Yb_2 O_3$ system / M. Gonzalez, C. Moure, J.R. Jurado and P. Duran // Journal of materials science. 1993, vol. 28, no. 13, pp. 3451- 3456.
- The effect of nanosize $Y_2 O_3$ - ZrO_2 , $Ce_2 O_3$ - ZrO_2 , and $Ce_2 O_3$ - $Y_2 O_3$ - ZrO_2 precursor dispersity on the conductivity and sensor properties of final ceramics / V.G. Konakov, A.V. Shorokhov, N.V. Borisova, S.N. Golubev, E.N. Solovieva and V.M. Ushakov // Reviews on Advanced Materials Science. 2012, vol. 32, no. 1, pp. 34-43.
- Исследование содержания и возможности извлечения матричных и редких элементов из золошлаковых отходов предприятия теплоэнергетики / Черкасова Т.Г., Черкасова Е.В., Тихомирова А.В., Гилязидинова Н.В., Ключев Р.В., Мартюшев Н.В., Карлина А.И., Скиба В.Ю. // Металлург. 2021. № 11. С. 96-100. DOI: 10.52351/00260827_2021_11_96.

References

- Tretyakov Yu.D., Lepis H. *Khimiya i tekhnologiya tverdogaznykh materialov: ucheb. posobie* [Chemistry and technology of solid-phase materials: a textbook]. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1985, 253 p. (In Russ.)
- Golik V. I., Klyuev R. V., Martyushev N. V., Zyukin D. A., Karlina A. I. Technology for nonwaste recovery of tailings of the mizur mining and processing plant. Metallurgist. 2023;66(11-12):1476-1480. DOI: 10.1007/s11015-023-01462-y.
- Brigida V. S., Golik V. I., Klyuev R. V., Sabirova L. B., Mambetalieva A. R., Karlina Yu. I. Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining. Metallurgist. 2023;67(3-4). DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.

4. Tolkacheva A.S., Pavlova I.A. *Obshchie voprosy tekhnologii tonkoj keramiki: ucheb. posobie* [General issues of fine ceramics technology: a textbook]. Yekaterinburg: Ural Publishing House, 2018, 184 p. (In Russ.)
5. Sevastyanov V.G., Simonenko E.P., Ignatov N.A., Pavelko R.G., Kuznetsov N.T. Synthesis and investigation of thermal stability of highly dispersed refractory zircons and lanthanum and neodymium hafnates for thermal barrier coatings. *Kompozity i nanostrukturny* [Composites and nanostructures], 2009;(1):50-58. (In Russ.)
6. Andrievskaya E.R. Phase equilibria in refractory oxide systems of zirconium dioxide, hafnium and yttrium with oxides of rare earth elements. *Journal of the European Ceramic Society*. 2008;28(12):2363-2388.
7. Mazilin I.V., Baldaev L.H., Drobot D.V., Akhmetgareeva A.M., Zhukov A.O., Hismatullin A.G. Thermal and thermophysical properties of thermal protective coatings based on lanthanum zirconate. *Perspektivnye materialy* Promising materials. 2013;(7):21-30. (In Russ.)
8. State standard GOST R 9.905 - 2007 (ISO 7384:2001, ISO 11845:1995). Unified system of protection against corrosion and ageing. Methods of corrosion tests. General requirements. Moscow: Standards Publishing House, 2020. (In Russ.)
9. McCormick P.G., Fros F.H. Fundamentals of mechanochemical processing. *JOM*. 1998;61-65.
10. Gusev A.I. *Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology]. Moscow: FIZMLIT, 2005, 416 p. (In Russ.)
11. Zhukov A.V., Chizhevskaya S.V., Pyae Pio. Heterophase synthesis of zirconium hydroxides as an alternative to precipitation methods. *Khimicheskaya promyshlennost segodnya* [Chemical Industry today], 2020;(3):42-47. (In Russ.)
12. Potel M. et al. Sol-gel synthesis and kinetics of crystallization of dysprosium titanate $Dy_2Ti_2O_7$ for photonic applications. *Mater. Chem. Physics*. 2015;168:159-167.
13. Mahato N., Gupta A., Balani K. Electrolytes based on zirconium and cerium dioxide for solid oxide fuel cells: review. *Nanomaterials and energy*. 2012;1(1):27-45.
14. Ma S., Li H., Liu S., Zhu K., Ho D., Lee J.-J., Song H. Production of transparent ceramics Lu_2O_3 : Ec using powder consisting of monodisperse spheres. *International ceramics*. 2015;41(8):9577-9584.
15. Kuznetsov M.V., Iorozov Yu.G. *Sposob polucheniya slozhnykh oksidnykh soedinenij redkozemelnykh metallov* [Method for obtaining complex oxide compounds of rare earth metals]. Patent RF, no. 2430884 C1, 2011.
16. Zakharov Yu.D., Krasovsky V.D. Makovsky A.V. et al. *Neitronnopolgloshchayushchiy material* [Neutron-absorbing material]. Patent RF, no. 2142654 C1, 1999.
17. Reznichenko V.A., Averin V.V., Olyunina T.V. *Titanaty: nauchnye osnovy, tekhnologiya, proizvodstvo* [Titanates: scientific foundations, technology, production]. Moscow: Nauka, 2010, 267 p. (In Russ.)
18. Ermilov A.G., Bogatyreva E.V. *Predvaritel'naya mekhanooaktivatsiya* [Preliminary mechanical activation]. Moscow: MISIS Publishing house, 2012, 135 p. (In Russ.)
19. Lyashenko L.P., Nikonov Yu.P., Rayevsky A.V., Shcherbakova L.G. The mechanism of formation of fluorite-like phases in systems up to $Ti_2Y_2O_3$ (Er_2O_3 , in sc_2O_3 samples). *Materialovedenie* [Materials Science], 1999;(1):29-33. (In Russ.)
20. Grigorieva T.F., Barinova A.P. et al. Nanocrystalline complex oxides obtained by mechanochemical synthesis. *Khimiya v interesah ustojchivogo razvitiya* [Chemistry in the interests of sustainable development], 1998;6(2-3):115-119. (In Russ.)
21. Risovanny V.D., Zakharov A.V., Klochkov E.P. et al. *Poglotitel neutronov dlya yadernykh reaktorov* [Neutron absorber for nuclear reactors]. Patent RF, no. 2124240 C1, 1998.
22. Risovany V.D., Zakharov A.V., Muraleva E.M., Sokolov V.F. Development of production of dysprosium hafnate as an absorbing material for regulatory bodies of selective thermal neutron reactors. *Sbornik trudov AO GNC NIIAR* [Proceedings of JSC SSC NIIAR]. Dimitrovgrad, 2011;(2):8-13. (In Russ.)
23. Komissarova L.N., Shatsky V.M., Pushkin G.Ya., Shcherbakova L.G., Mamsurova L.G., Sukhanova G.E. *Soedineniya redkozemelnykh elementov. Karbonaty, oksalaty, nitraty, titanaty* [Compounds of rare earth elements. Carbonates, oxalates, nitrates, titanates]. Moscow: Nauka, 1984, 235 p. (In Russ.)
24. Shlyakhtina A.V. Morphotropy, polymorphism and isomorphism of complex oxides based on $Ln_2M_2O_7$ ($b = La-Lu$, m, SK ; $M = Ti, Zr, Hf$ and Zr). *Kristallografiya* [Crystallography], 2013;58(4):545-560. (In Russ.)
25. Gonzalez M., Moore K., Jurado J.R. and Durand P. Solid-phase reactions, microstructure and phase relations in the ZrO_2 -rich region of the ZrO_2 - Yb_2O_3 system. *Journal of Materials Science*. 1993;28(13):3451-3456.
26. Konakov V.G., Shorokhov A.V., Borisova N.V., Golubev S.N., Solovyova E.N., Ushakov V.M. Influence of dispersion of nanoscale precursors Y_2O_3 - ZrO_2 , Ce_2O_3 - ZrO_2 and Ce_2O_3 - Y_2O_3 - ZrO_2 on electrical conductivity and sensory properties of finished ceramics. *Reviews on advanced materials science*. 2012;32(1):34-43.
27. Cherkasova T.G., Cherkasova E.V., Tikhomirova A.V., Gilyazidinova N.V., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Karlina A.I., Skiba V.Y. Investigation of content and possibility of extracting matrix and rare elements from ash and slag wastes of heat power plant. *Metallurg* [Metallurgist], 2022;65(11-12):1324-1330. DOI: 10.1007/s11015-022-01278-2.

Поступила 28.12.2024; принята к публикации 20.02.2025; опубликована 28.03.2025
Submitted 28/12/2024; revised 20/02/2025; published 28/03/2025

Шарипзянова Гюзель Харрясовна – кандидат технических наук, проректор по учебной работе, Московский политехнический университет, Москва, Россия.

Email: guzel@mtw.ru. ORCID 0000-0002-0863-7490

Guzel Kh. Sharipzyanova – PhD (Eng.), Vice-Rector for Academic Affairs, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia.

Email: guzel@mtw.ru. ORCID 0000-0002-0863-7490

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 620.3; 620.18

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-92-102



ВЛИЯНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЙ СОСТАВ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т, ПОДВЕРГНУТОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОМУ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМУ ПОВЕРХНОСТНОМУ МОДИФИЦИРОВАНИЮ

Полонянкин Д.А.¹, Федоров А.А.¹, Гомонюк Т.М.²¹ Омский государственный технический университет, Омск, Россия² ЗАО «Электон», Радужный, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Разработка научно-практических основ повышения физико-механических свойств и расширения функциональных характеристик аустенитных нержавеющей сталей является востребованным направлением совершенствования технологий традиционного и аддитивного производства. Одним из наиболее перспективных методов направленного формирования требуемых механических свойств термически неупрочняемых метастабильных хромоникелевых аустенитных нержавеющей сталей типа 18-10 является ультразвуковое нанокристаллическое поверхностное модифицирование, соответствующее принципу нанотехнологического производства «сверху вниз». **Цель работы.** К настоящему моменту проблема формирования регламентированного наноструктурированного состояния аустенитных нержавеющей сталей посредством оптимизации технологических режимов интенсивного поверхностного пластического деформирования решена не в полной мере, что обуславливает актуальность исследования влияния статической нагрузки на структуру и фазовый состав стали 12Х18Н10Т, подвергнутой ультразвуковому нанокристаллическому поверхностному модифицированию. **Используемые методы.** Для достижения цели работы использовались апробированные и валидные методы исследования структурно-фазового состава аустенитных нержавеющей сталей после интенсивного поверхностного пластического деформирования – рентгенофазовый анализ и просвечивающая электронная микроскопия. **Новизна.** Установлен характер изменения объемной доли мартенсита деформации при ультразвуковом нанокристаллическом поверхностном модифицировании стали 12Х18Н10Т, которое аппроксимируется полиномиальной функцией второго порядка $f(V\alpha') = 0,0007 \cdot x^2 - 0,0204 \cdot x + 0,7305$ в зависимости от равномерно варьируемой в диапазоне от 10 до 30 Н статической нагрузки с достоверностью $R^2=0,94$. **Результат.** Ультразвуковое нанокристаллическое поверхностное модифицирование с варьируемой в диапазоне от 10 до 30 Н с шагом 5 Н статической нагрузкой обеспечивает формирование в приповерхностном слое стали 12Х18Н10Т двухфазной ($\alpha'+\gamma$) наноструктуры с высокой (от ~60% до ~75%) объемной долей мартенсита деформации с ламельной структурой (ширина полос от 50 до 100 нм), а также значительной плотностью дислокаций $\sim 10^{11} \text{ см}^{-2}$. **Практическая значимость.** Полученные экспериментальные данные могут быть полезными для верификации результатов моделирования и прогнозирования эволюции структурно-фазовых состояний метастабильных аустенитных нержавеющей сталей, подвергнутых интенсивному поверхностному пластическому деформированию и в особенности ультразвуковому нанокристаллическому поверхностному модифицированию.

Ключевые слова: ультразвуковое нанокристаллическое поверхностное модифицирование, статическая нагрузка, метастабильная нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, фазовый состав, аустенит, мартенсит деформации, объемная доля мартенсита, ламельная наноструктура

© Полонянкин Д.А., Федоров А.А., Гомонюк Т.М., 2025

Для цитирования

Влияние статической нагрузки на структурно-фазовый состав нержавеющей стали 12Х18Н10Т, подвергнутой ультразвуковому нанокристаллическому поверхностному модифицированию / Полонянкин Д.А., Федоров А.А., Гомонюк Т.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 92-102. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-92-102>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

EFFECT OF STATIC LOAD ON THE STRUCTURAL PHASE COMPOSITION OF AISI 321 STAINLESS STEEL SUBJECTED TO ULTRASONIC NANOCRYSTAL SURFACE MODIFICATION

Polonyankin D.A.¹, Fedorov A.A.¹, Gomonyuk T.M.²

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia

²CJSC Elekton, Raduzhny, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Elaboration of scientific and practical frameworks for enhancement the physical and mechanical properties and enlargement the functional characteristics of austenitic stainless steels (ASS) is a sought-after area for improving technologies of traditional and additive manufacturing. One of the most promising methods for the directed formation of required mechanical properties of metastable chromium-nickel ASS of type 18-10 which are not hardened by heat treatment is ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) corresponding to the top-down nanotechnological manufacturing approach. **Objectives.** To date, the problem of a specified nanostructured state formation of ASS by optimizing the technological conditions of surface severe plastic deformation (SSPD) has not been completely resolved, what defines the relevance of studying the effect of static load on the structure and phase composition of 12Cr18Ni10Ti (the analogue of AISI 321 stainless steel) steel subjected to UNSM. **Methods Applied.** To achieve the goal of work X-ray diffraction analysis (XRD) and transmission electron microscopy (TEM) were utilized ensuring the reliability and validity of examination the structural and phase composition of ASS after SSPD. **Originality.** The nature of variation in the volume fraction of deformation martensite during UNSM of AISI 321 steel has been established, which is approximated by a second-order polynomial function $f(V\alpha') = 0,0007 \cdot x^2 - 0,0204 \cdot x + 0,7305$ depending on a static load uniformly varying in the range from 10 to 30 N with a reliability of $R^2 = 0.94$. **Result.** UNSM with a static load varying in the range from 10 to 30 N in 5 N increments ensures the formation of a two-phase ($\alpha' + \gamma$) nanostructure in the near-surface layer of AISI 321 steel with a high (from ~60% to ~75%) volume fraction of the deformation martensite with a lamellar structure (band width from 50 up to 100 nm), as well as a significant dislocation density of $\sim 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. **Practical Relevance.** The experimental data obtained can be useful for verifying the results of modeling and predicting the structural-phase states' evolution of metastable ASS subjected to SSPD, and particularly to UNSM.

Keywords: ultrasonic nanocrystal surface modification, static load, AISI 321 metastable stainless steel, phase composition, austenite, deformation martensite, volume fraction of martensite, lamellae nanostructure

For citation

Polonyankin D.A., Fedorov A.A., Gomonyuk T.M. Effect of Static Load on the Structural Phase Composition of AISI 321 Stainless Steel Subjected to Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 92-102. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-92-102>

Введение

Повсеместное использование хромоникелевых сталей аустенитного класса в различных отраслях промышленности обусловлено высокими функциональными характеристиками изготовленных из них изделий и конструкций. Благодаря сочетанию коррозионной стойкости, хорошей обрабатываемости и относительно невысокой стоимости аустенитные нержавеющие стали (АНС) относятся к одним из наиболее востребованных инженерных сплавов [1] в авиакосмической отрасли [2], атомной [3], нефтеперерабатывающей [4] и химической [5] промышленности, а также в биомедицине [6]. В современном производстве широко применяются нержавеющие коррозионностойкие стали, легированные 18% хрома и от 8 до 12% никеля (хромоникелевые стали типа 18-10 [7]), обладающие технологической пластичностью и жаростойкостью в условиях повышенных темпера-

турных воздействий непрерывного или переменного характера. Легирование стали марки 12X18H10T (зарубежные аналоги 321 SS, X6CrNiTi18-10 (1.4541) и 1Cr18Ni9Ti по стандартам AISI, UNE EN 10088-1 и GB соответственно) титаном способствует повышению ее термостойкости, а также стойкости к охрупчиванию и межкристаллитной коррозии.

Как известно, к недостаткам аустенитных сталей типа 18-10 относятся посредственные прочностные характеристики [8]. По сравнению со сталями мартенситного класса с ОЦК-решеткой АНС с ГЦК-решеткой обладают меньшим пределом текучести, составляющим ~ 200 МПа. Вместе с тем циклические нагрузки являются причиной усталостного разрушения почти 90% металлических материалов [9], а коррозия и усталостный износ обуславливают более 80% критических повреждений рабочих поверхностей металлоизделий, что приводит к полному или частичному нарушению их работоспособности [10]. Для

снижения скорости и степени деградации рабочих поверхностей металлопродукции ответственного назначения (предотвращение коррозии, эрозии, трещинообразования и т.д.) применяются различные технологии постобработки, обеспечивающие достижение более высоких физико-механических и функциональных характеристик конструкционных сталей посредством их наноструктурирования [11]. При этом ввиду отсутствия необходимости модифицирования всего объема материала, а также ограниченных возможностей повышения прочностных свойств АНС термообработкой одним из наиболее перспективных подходов к направленному формированию физико-механических свойств термически неупрочняемых метастабильных хромоникелевых сталей типа 18-10 (в том числе стали марки 12X18H10T) в настоящее время является поверхностное пластическое деформирование [12].

Состояние вопроса и постановка проблемы

Ультразвуковое нанокристаллическое поверхностное модифицирование (УНПМ) относится к обширной группе методов интенсивного поверхностного пластического деформирования (ИППД) металлов и сплавов, соответствующих принципу нанотехнологического производства «сверху вниз» [13]. УНПМ, также именуемое в научно-технической литературе ультразвуковой упрочняющей обработкой (УУО) [14], ультразвуковым упрочнением или ультразвуковой финишной обработкой [15], обеспечивает возможность направленного формирования градиентного наноструктурированного слоя в приповерхностной области обрабатываемого материала [9, 10], а также может сопровождаться структурным окрашиванием поверхности посредством ее микро- и нанотекстурирования [16]. Помимо прочего, к преимуществам УНПМ относятся достаточно высокая эффективность, а также возможность адаптивного управления технологическими параметрами и автоматизированного контроля качества обработки [17]. В ходе УНПМ сталей типа 18-10 возникает синергетический эффект: снижается шероховатость поверхности, а благодаря деформационному измельчению зерен аустенита и образованию наноразмерного мартенсита деформации [18] формируются остаточные напряжения сжатия, происходит упрочнение приповерхностного слоя АНС, полученных технологиями традиционного производства (вакуумно-индукционная и дуговая плавка, электрошлаковый переплав) [7].

В аддитивном производстве АНС (дуговая, лазерная и электронно-лучевая проволоочная и порошковая 3D-печать) [10, 19] ультразвуковое нанокристаллическое поверхностное модифицирование активно используется в качестве метода постобработки, обеспечивающего снижение пористости и шероховатости, релаксации остаточных напряжений, а также формирования равноосной мелкозеренной структуры нержавеющей стали, полученной, например, дуговой

аддитивной печатью проволоки марки ER321 [20] (зарубежный аналог стали марки 12X18H10T).

Важно отметить, что образующийся в ходе УНПМ градиентный наноструктурированный приповерхностный слой обеспечивает возможность сочетания прочности и пластичности АНС [21]. Вместе с тем, как свидетельствуют экспериментальные исследования, взаимосвязь между пределом текучести поликристаллического материала и средним размером его зерна выполняется не для всех марок АНС, применимость соотношения Холла-Петча зависит от различных особенностей структурно-фазового состава стали, в частности от наличия субзерен с малоугловыми границами и присутствия остаточного мартенсита [11]. Как известно, размер зерна и фазовый состав являются ключевыми структурными характеристиками, определяющими практически все аспекты физического и механического поведения поликристаллических металлов. При этом механизм деформационного упрочнения приповерхностного слоя АНС в ходе ИППД, заключающийся в фрагментации зерен аустенита на разориентированные области меньшего размера (формирование ультрамелкозернистой структуры), а также в образовании наноразмерного мартенсита деформации, изучен не полностью [22], а обработка металлов и сплавов (в том числе АНС) методом УНПМ требует всестороннего исследования для различных промышленных применений [10].

Оптимизация технологических режимов поверхностной деформационной обработки метастабильных аустенитных сталей (в том числе стали марки 12X18H10T) должна выполняться не только в соответствии с критерием эффективного деформационно-индуцированного упрочнения, но также с учетом формирования требуемого структурно-фазового состояния поверхностного слоя [12]. Так, авторами работы [23] установлена нелинейная корреляция между остаточными напряжениями сжатия и объемной долей мартенсита деформации в приповерхностном слое подвергнутой УНПМ стали марки 08X18H10 (зарубежный аналог 304 SS по AISI), при этом максимальная величина сжимающих остаточных напряжений достигается в случае приблизительно равного соотношения аустенитной γ -фазы и α' -фазы мартенсита деформации.

Помимо рабочей частоты (от 10 до 55 кГц) ультразвукового генератора, к основным варьируемым параметрам УНПМ относятся материал (карбид вольфрама или нитрид кремния), диаметр (от 1,2 до 6 мм) и амплитуда (от 10 до 100 мкм) колебаний наконечника полусферической формы, а также сила его прижатия (величина статической нагрузки от 10 до 200 Н) к обрабатываемой поверхности [19, 21, 24]. Как сообщается в работе [18], варьирование силы прижатия инструмента в ходе УНПМ оказывает непосредственное и значительное влияние на микротвердость поверхностного слоя и, как следствие, на прочность стали марки 08X18H10 (AISI 304): экспериментально установлена оптимальная статическая нагрузка ($P_{ст} = 90$ Н), обеспе-

чивающая более чем двукратное увеличение твердости, а также рост усталостной прочности с 280 до 510 МПа. Вместе с тем несбалансированные параметры режима УНПМ могут привести к негативным результатам обработки: увеличение статической нагрузки выше определенного критического значения способствует заметному снижению усталостной прочности стали 08X18H10 [18]. В этой же работе подчеркивается необходимость систематического исследования влияния статической нагрузки на фазовый состав и механические свойства подвергнутых УНПМ различных металлических материалов.

Как свидетельствует литературный обзор, проблема получения предпочтительной регламентированной градиентной наноструктуры и управления структурно-фазовым составом приповерхностного слоя АНС методами ИППД для достижения требуемого комплекса физико-механических и функциональных свойств, а также технологических и эксплуатационных характеристик обладает высокой актуальностью. Вместе с тем результаты исследований структурно-фазового состава сталей типа 18-10, подвергнутых УНПМ с варьируемой статической нагрузкой, и в особенности стали марки 12X18H10Т весьма ограничены. Таким образом, основной целью данной работы является изучение влияния силы статического прижатия ультразвукового инструмента к обрабатываемой поверхности на структуру и фазовый состав приповерхностного слоя стали 12X18H10Т, подвергнутой ультразвуковому нанокристаллическому поверхностному модифицированию.

Материалы и методы исследования

Исходным материалом в работе являлась аустенитная нержавеющая сталь марки 12X18H10Т в виде прутка диаметром 25,5 мм в состоянии поставки. Перед ультразвуковым нанокристаллическим поверхностным модифицированием прутки подвергались предварительной механической обработке точением ($R_a \sim 2,2$ мкм), затем от него отрезался валик длиной 150 мм и обрабатывался шлифованием ($R_a \sim 0,32$ мкм).

УНПМ наружной цилиндрической поверхности валика выполнялось с использованием динамического технологического модуля ДТМ-07, оснащенного магнитострикционным преобразователем ПМС15А-18 и ультразвуковым волноводом конической формы с напайным сферическим индентором радиусом 3 мм, изготовленным из твердого сплава марки ВК8. УНПМ проводилось при следующих постоянных параметрах режима обработки: частота колебаний УЗ-генератора ($f = 18$ кГц), продольная подача инструмента ($s = 0,09$ мм/об), относительная скорость перемещения ультразвукового инструмента и образца ($v = 1,28$ м/мин), амплитуда колебаний наконечника ($\xi m = 50$ мкм). Обработка валика осуществлялась при различной статической нагрузке, варьируемой в диапазоне от 10 до 30 Н с шагом 5 Н. Для наглядности здесь и далее будут использоваться следующие обо-

значения образцов, подвергнутых УНПМ с различной статической нагрузкой: 1) $P_{ст} = 10$ Н – образец №1; 2) $P_{ст} = 15$ Н – образец №2; 3) $P_{ст} = 20$ Н – образец №3; 4) $P_{ст} = 25$ Н – образец №4; 5) $P_{ст} = 30$ Н – образец №5. Величина статической нагрузки контролировалась предварительно отарированными с использованием динамометра ДОСМ-3-02 прижимными пружинами. Фрагментация валика после УНПМ для исследования образцов методом рентгенофазового анализа (РФА) осуществлялась на проволоочно-вырезном электроэрозионном станке SODICK VZ300L.

РФА является одним из апробированных и наиболее широко используемых методов косвенного измерения объемной доли мартенсита деформации и остаточного аустенита в АНС [25]. РФА образцов до и после УНПМ выполнялся на предварительно отъюстированном по методике внутреннего стандарта дифрактометре Shimadzu XRD-7000 в $CuK\alpha$ -излучении ($\lambda = 0,15406$ нм) со схемой фокусировки по Брэггу-Брентано. Дифрактограммы образцов регистрировались в стандартном режиме в диапазоне углов от 30 до 100° по 2θ в следующих условиях: 1) величины напряжения и тока на рентгеновской трубке принимали значения 50,0 кВ и 40,0 мА соответственно; 2) устанавливались выходная и приемная щели шириной 1,0° и 0,3 мм соответственно; 3) скорость съемки и длительность накопления импульса в точке составляли 0,50 град/мин и 2,4 с соответственно. Обработка всех полученных дифрактограмм проводилась с использованием стандартного программного обеспечения дифрактометра («XRD-6100/7000 Ver.7.00: main») в автоматическом режиме (меню «Basic Process») в следующей последовательности: 1) сглаживание профиля; 2) вычитание фона; 3) разделение $K\alpha_1$ - и $K\alpha_2$ -линий; 4) коррекция систематических ошибок; 5) идентификация интегральной интенсивности, положения (угол дифракции) и ширины (полная ширина на полувысоте) рефлексов, определение межплоскостного расстояния.

Для уточнения соотношения между объемными долями аустенитной и мартенситной фаз в приповерхностной области всех подвергнутых УНПМ образцов дополнительно выполнялась съемка наиболее интенсивных рефлексов – $(111)\gamma$ и $(110)\alpha'$ – в диапазоне углов $2\theta = (40-50^\circ)$ в трехкратной повторяемости с последующей статистической обработкой измеренных значений интегральной интенсивности и расчетом объемной доли фаз по аналогии с работой [20]. Вычисление погрешности проводилось по методике косвенных воспроизводимых измерений. Графическая визуализация полученных результатов была реализована в прикладном ПО SigmaPlot™ 15.0 (ver. 15_1_1_26).

Электронно-микроскопические исследования структурного состояния приповерхностного слоя стали 12X18H10Т после УНПМ проводились посредством просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на приборе Philips CM-12 в режиме с ускоря-

ющим напряжением 120 кВ. Подготовка профиля поперечного сечения (фольги) для ПЭМ-анализа выполнялась с использованием комплекса Quanta 200-3D по стандартной методике:

1) осаждение тонкого слоя платины на выбранный участок и выделение по его границам областей для вырезки ступенчатого профиля;

2) вырезка поперечного профиля из объема образца по периферии и его последующая чистка ионами Ga (сила тока ионного пучка ~5 нА и ~1 нА соответственно);

3) приваривание профиля к игле слоем вольфрама с последующей вырезкой, а затем извлечением из объема образца;

4) приваривание фольги к медной сетке, отделение ионным пучком иглы от профиля и его утонение пучком ионов Ga (токи от 300 до 100 пА) до толщины ~(100÷150) нм;

В данной работе методом ПЭМ выполнено исследование обработанного с максимальной статической нагрузкой $P_{ст} = 30$ Н образца №5.

Полученные результаты и их обсуждение

В соответствии с **рис. 1** дифрактограмма приповерхностного слоя необработанного образца содержит максимумы интенсивности рентгеновского излучения в области углов дифракции 43,6, 50,7, 74,5, 90,6 и 95,9°, которым соответствуют кристаллографические плоскости (111), (200), (220) (311) и (222) кубической ГЦК-решетки железа (аустенитная γ -фаза [8, 21]). На дифрактограммах всех подвергнутых УНПМ образцов помимо вышеуказанных пиков аустенита наблюдаются рефлексы в области углов дифракции 44,5, 64,5, 81,8 и 98,4°, соответствующие кристаллографическим плоскостям (110), (200), (211) и (220) кубической ОЦК-решетки α -фазы железа (мартенсит деформации). Присутствие высокоинтенсивных рефлексов мартенситной α -фазы на дифрактограммах всех образцов после УНПМ свидетельствует о значительной степени деформации приповерхностного слоя стали 12X18H10T, обусловленной ультразвуковым нанокристаллическим поверхностным модифицированием [8]. Результаты идентификации фазового состава, полученные в данной работе, находятся в высокой степени соответствия с литературными данными [8, 16, 20].

На **рис. 2** представлена графическая зависимость объемной доли аустенитной и мартенситной фаз от величины статической нагрузки при УНПМ. Как свидетельствует **рис. 2**, увеличение нагрузки $P_{ст}$ в диапазоне от 10 до 25 Н с шагом 5 Н сопровождается медленным монотонным возрастанием объемной доли α -фазы с 58,7% ($V_{\alpha}/V_{\gamma} \approx 1,4$ в образце №1) до 62,4% ($V_{\alpha}/V_{\gamma} \approx 1,7$ в образце №4), данная зависимость аппроксимируется линейной функцией с достоверностью $R^2 = 0,95$. Другими словами, повышение статической нагрузки в 2,5 раза не приводит к заметному изменению относительного количества мартенситной и аустенитной фаз в приповерхностном слое подвергнутых обработке образцов. Тогда как УНПМ в режиме с $P_{ст} = 30$ Н обуславливает

значительное увеличение объемной доли мартенсита $V_{\alpha}/V_{\gamma} = (74,6\%)/(25,4\%) \approx 2,9$ в образце №5 по сравнению с образцами, обработанными со статической нагрузкой 10, 15, 20 и 25 Н.

В соответствии с **рис. 2** УНПМ стали 12X18H10T с варьируемой в диапазоне от 10 до 30 Н с шагом 5 Н статической нагрузкой приводит к образованию в приповерхностном слое образцов мартенсита деформации, объемная доля которого нелинейно возрастает с увеличением силы статического прижатия инструмента к обрабатываемой поверхности. На **рис. 2** также демонстрируется характер данной зависимости: объемные доли аустенитной и мартенситной фаз аппроксимируются полиномиальной функцией второго порядка с достоверностью $R^2 = 0,94$.

Как известно, для описания кинетики деформационно-индуцированного мартенситного превращения в АНС в общем случае используется сигмоидальная функция с порогом насыщения объемной доли мартенсита вблизи 100% [26, 27]. Вместе с тем эволюция структурно-фазового состояния метастабильных аустенитных сталей в условиях ИППД представляет собой сложный многостадийный процесс, характер протекания которого зависит от различных факторов – давления, температуры, степени деформации, элементного состава, энергии дефекта упаковки (ЭДУ) и т.д., при этом данные эксперимента не всегда в полной мере соответствуют результатам моделирования. Важно отметить, что в зависимости от величины ЭДУ деформационное упрочнение АНС может происходить посредством дислокационного скольжения, двойникования, а также мартенситного превращения. При этом для стали 12X18H10T (ЭДУ ~25 мДж/м² [28]) в условиях ИППД характерна склонность к механическому двойникованию, не исключая вместе с тем ($\gamma \rightarrow \alpha$)-превращение.

О нелинейном, близком к сигмоидальному характере зависимости экспериментальных значений объемной доли мартенсита и эквивалентной накопленной пластической деформации от количества ударов наконечника в ходе УНПМ стали 08X18H10 сообщается в статье [26]. Нелинейная корреляция между объемной долей мартенсита в стали 08X18H10 и продолжительностью ультразвуковой упрочняющей обработки демонстрируется в работе [8] без аппроксимации функциональной зависимостью. Авторами данной статьи зафиксирован практически двукратный рост объемной доли мартенсита (с ~15,5 до ~28%) при увеличении длительности обработки с 60 до 120 с, сопровождающийся насыщением количества V_{α} : дальнейшее повышение продолжительности обработки со 180 до 240 с, а затем и до 300 с не приводит к статистически значимым изменениям объемной доли α -фазы, принимающей значения ~34, ~35,5 и 36% соответственно. Достижение установившегося количества (предела насыщения) объемной доли мартенсита при этом аргументируется высокой скоростью вызванной УУО деформации (более 10^5 с⁻¹), ограничивающей мартенситное превращение вследствие более интенсивно протекающего двойникования.

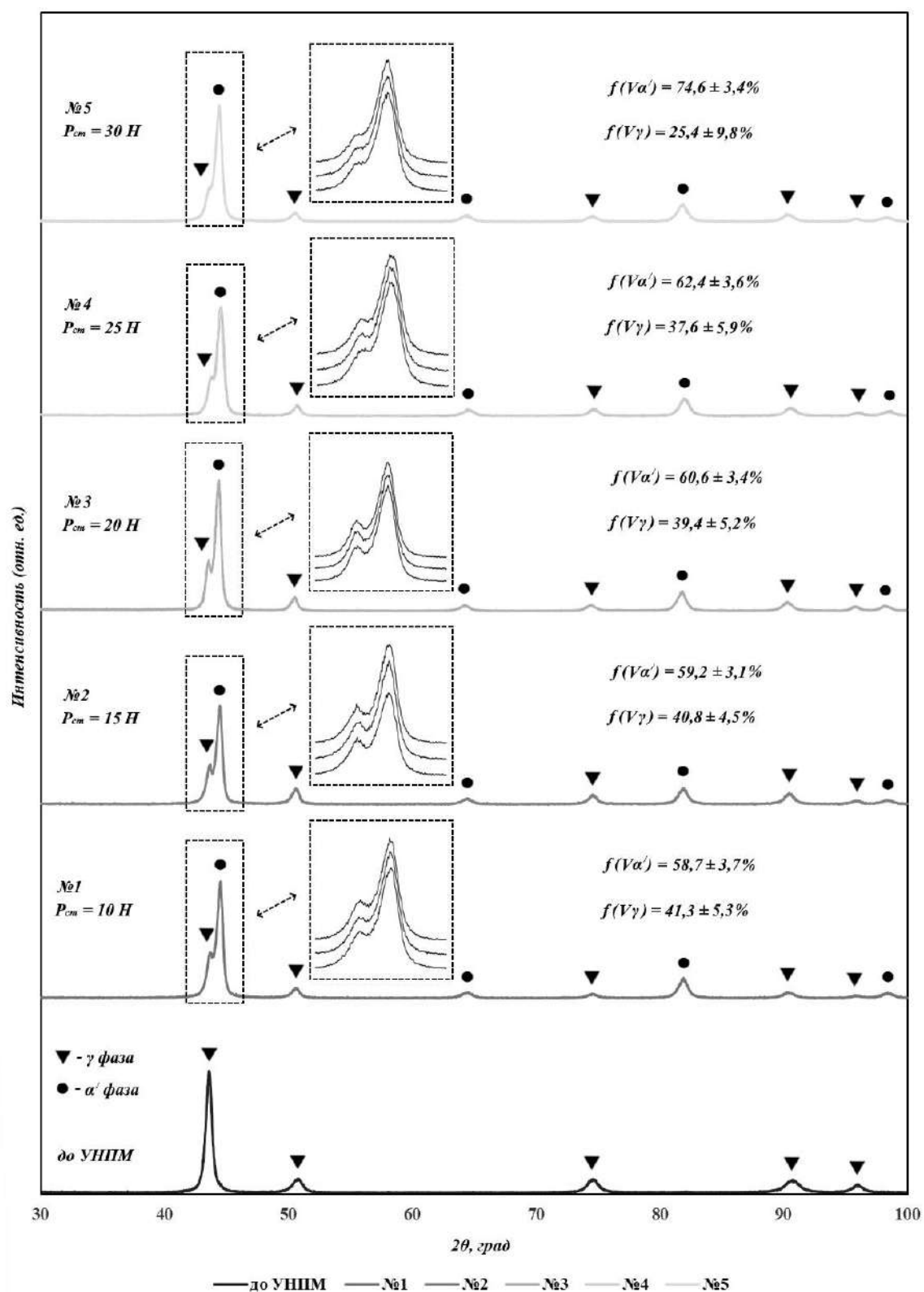


Рис. 1. Дифрактограммы образцов нержавеющей стали 12X18H10T до и после ультразвукового нанокристаллического поверхностного модифицирования с различной статической нагрузкой (Для наглядности дифрактограммы представлены совместно и сдвинуты по вертикали)

Fig. 1. XRD patterns of AISI 321 stainless steel before and after ultrasonic nanocrystal surface modification with different static load (For clarity XRD patterns are presented jointly and are shifted vertically)

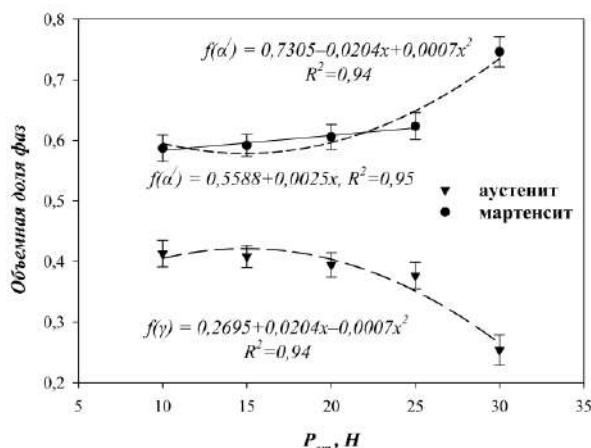


Рис. 2. Зависимость объемных долей аустенита и мартенсита деформации в приповерхностном слое после УНПМ стали 12Х18Н10Т от величины статической нагрузки

Fig. 2. Dependence of austenite and deformation martensite volume fractions in the near-surface layer after UNSM of AISI 321 steel from the static load magnitude

Определенная методом РФА в работе [29] величина объемной доли мартенсита деформации в приповерхностном слое стали 12Х18Н10Т составляет ~20% после УУО в среде аргона при комнатной температуре длительностью 50 с и остается практически неизменной с ростом продолжительности обработки до 150 с и даже до 250 с. Экспериментально установленное отсутствие влияния длительности обработки на объемную долю мартенситной фазы объясняется авторами вероятным протеканием обратного ($\alpha' \rightarrow \gamma$)-превращения, обусловленного деформационно-индуцированным адиабатным повышением температуры ($\Delta T \sim 80\text{--}180\text{ K}$) в ходе УУО.

Полученные нами экспериментальные зависимости объемной доли мартенситной фазы в приповерхностном слое подвергнутой УНПМ стали 12Х18Н10Т

от величины статической нагрузки, варьируемой в диапазонах $P_{ст} = 10\text{--}25\text{ Н}$ и $P_{ст} = 10\text{--}30\text{ Н}$ с шагом 5 Н, могут быть интерпретированы на основе результатов вышеуказанных работ следующим образом:

1. Зависимость объемной доли мартенситной фазы от статической нагрузки в диапазоне от 10 до 30 Н аппроксимируется квадратичной функцией $f(V\alpha') = 0,0007 \cdot x^2 - 0,0204 \cdot x + 0,7305$, что отвечает комплексному характеру деформационно-индуцированного мартенситного превращения в АНС.

2. Равномерное увеличение статической нагрузки в диапазоне от 10 до 25 Н обуславливает медленный монотонный рост объемной доли мартенсита деформации в соответствии с уравнением линейной регрессии $f(V\alpha') = 0,0025 \cdot x + 0,5588$. К факторам, ограничивающим скорость мартенситного превращения в метастабильной нержавеющей стали 12Х18Н10Т в данном диапазоне статических нагрузок, относятся: а) склонность стали к интенсивному механическому двойникованию при определенных уровнях деформации, подавляющему образование α' -фазы [28, 8]; б) деформационно-индуцированный локальный адиабатный нагрев, стимулирующий обратное ($\alpha' \rightarrow \gamma$)-превращение [29].

Идентифицированное методом РФА высокое содержание мартенситной α' -фазы в приповерхностном слое подвергнутой УНПМ стали 12Х18Н10Т подтверждается электронно-микроскопическим анализом. В соответствии с рис. 3, а нанокристаллическая структура приповерхностного слоя стали 12Х18Н10Т после УНПМ в режиме с $P_{ст} = 30\text{ Н}$ представлена мартенситными ламелями с характерными размерами (шириной) от 50 до 100 нм и преимущественно ориентированными параллельно поверхности образца. На рис. 3, а также наблюдается незначительное количество отдельных практически равноосных нанокристаллов и развитая дислокационная структура мартенсита, характеризующаяся высокой плотностью дислокаций, оценочная величина которой составляет $\sim (10^{10}\text{--}10^{11})\text{ см}^{-2}$.

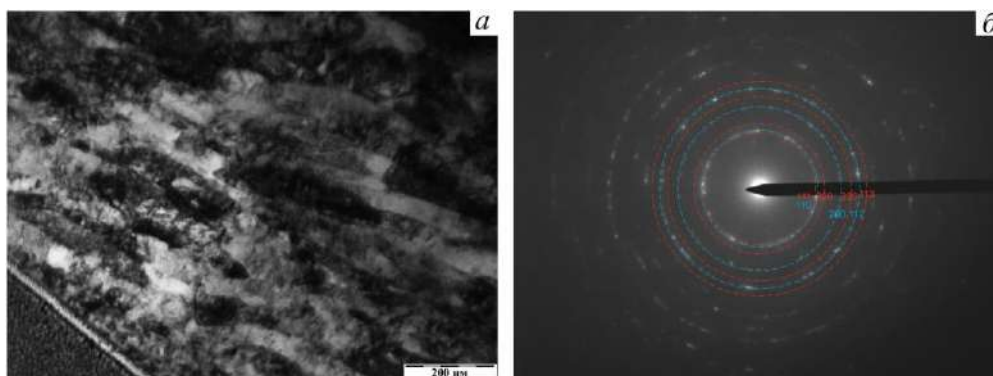


Рис. 3. Субмикрокристаллическая структура приповерхностного слоя стали 12Х18Н10Т после УНПМ со статической нагрузкой 30 Н: а – светлопольное ПЭМ-изображение сечения, параллельного направлению обработки; б – соответствующая микродифракционная картина с рефлексами α' - и γ -фазы

Fig. 3. Submicrocrystalline structure of AISI 321 near-surface layer after UNSM with a static load of 30 N: а is TEM bright-field image of a cross-section parallel to the processing direction; б is the corresponding microdiffraction pattern with the reflections of α' - and γ -phases

Как свидетельствует соответствующая ПЭМ-изображению картина микродифракции (рис. 3, б), структурное состояние исследуемой области (см. рис. 3, а) является двухфазным (α/γ) с преимущественным содержанием мартенситной α' -фазы (яркие рефлексы мартенсита и слабые единичные аустенитные рефлексы $g = [200]$).

Таким образом, ультразвуковое нанокристаллическое поверхностное модифицирование с варьируемой в диапазоне от 10 до 30 Н с шагом 5 Н статической нагрузкой обеспечивает формирование в приповерхностном слое стали 12Х18Н10Т двухфазной (α/γ) наноструктуры с высокой (от ~60 до ~75% в зависимости от величины $P_{ст}$) объемной долей мартенсита деформации с ламельной структурой, а также значительной плотностью дислокаций.

Заключение

В ходе экспериментального исследования структурно-фазового состава приповерхностного слоя подвергнутой УНПМ метастабильной аустенитной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т установлен характер изменения объемной доли мартенсита деформации, которое аппроксимируется квадратичной функцией $f(V\alpha') = 0,0007 \cdot x^2 - 0,0204 \cdot x + 0,7305$ в диапазоне равномерно варьируемой от 10 до 30 Н статической нагрузки. Применение методов РФА и ПЭМ свидетельствует о значительных степенях деформации и двухфазном (α/γ)-составе приповерхностного слоя стали 12Х18Н10Т после УНПМ, при этом в зависимости от величины приложенной статической нагрузки объемное содержание мартенситной фазы в нем составляет от ~60 до ~75%. Ультразвуковое нанокристаллическое поверхностное модифицирование с наибольшей из применяемых в данной работе нагрузок ($P_{ст} = 30$ Н) обеспечивает формирование в приповерхностном слое стали 12Х18Н10Т субмикронанокристаллической структуры, характеризующейся высокой плотностью дислокаций $\sim 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и представленной преимущественно мартенситными ламелями шириной от 50 до 100 нм, ориентированными параллельно обработанной поверхности.

В контексте достигнутых результатов научно-практический интерес представляет анализ структурно-фазового состава стали 12Х18Н10Т, подвергнутой УНПМ в более широком диапазоне статических нагрузок, а также после УНПМ с варьируемой скоростью относительного перемещения УЗ-инструмента и образца, с последующим исследованием комплекса соответствующих физико-механических свойств. Полученные экспериментальные данные могут оказаться востребованными в ходе верификации результатов моделирования эволюции структурно-фазовых состояний метастабильных нержавеющей сталей аустенитного класса, подвергнутых интенсивной поверхностной пластической деформации и в особенности ультразвуковому нанокристаллическому поверхностному модифицированию.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективу ЦКП «Нанотех» ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФПМ СО РАН, г. Томск) и лично доктору физико-математических наук, профессору Литовченко И.Ю. за проведение исследований и содействие в интерпретации результатов, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии.

Список источников

1. Direct drive friction welding effect on mechanical and electrochemical characteristics of titanium stabilized austenitic stainless steel (AISI 321) research reactor thick tube / Titouche N.E., Boukharouba T., Amzert S.A. et al. // Journal of Manufacturing Processes. 2019, vol. 41, pp. 273-283. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.03.016.
2. Microstructure, mechanical properties and fracture toughness of SS 321 stainless steel manufactured using wire arc-additive manufacturing / Prakash K.S., Kannan A.R., Pramod R. et al. // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2023, vol. 76, pp. 537-544. DOI: 10.1007/s12666-022-02713-3.
3. Investigation of high temperature annealing effectiveness for recovery of radiation-induced structural changes and properties of 18Cr–10Ni–Ti austenitic stainless steels / Gurovich B.A., Kuleshova E.A., Frolov A.S. et al. // Journal of Nuclear Materials. 2015, vol. 465, pp. 565-581. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2015.06.045.
4. Ганеев А.А., Рамазанов А.К. Оптимизация химического состава коррозионно-стойкой стали 12Х18Н9ТЛ для отливок трубопроводной арматуры // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 32-39. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-32-39.
5. Research progress of cryogenic materials for storage and transportation of liquid hydrogen / Qiu Y., Yang H., Tong L., Wang L. // Metals. 2021, vol. 11, no. 7, pp. 1101-1114. DOI: 10.3390/met11071101.
6. Acharya S., Suwas S., Chatterjee K. Review of recent developments in surface nanocrystallization of metallic biomaterials // Nanoscale. 2021, vol. 13, no. 4, pp. 2286-2301. DOI: 10.1039/d0nr07566c.
7. Разуваев Е.И., Капитаненко Д.В. Влияние термомеханической обработки на структуру и свойства аустенитных сталей // Труды ВИАМ. 2013. № 5. С. 1.
8. Enhanced mechanical behaviors of gradient nano-grained austenite stainless steel by means of ultrasonic impact treatment / Yang X., Wang D., Wang X., Ling X. // Results in Physics. 2017, vol. 7, pp. 1412-1421. DOI: 10.1016/j.rinp.2017.04.002.
9. Recent progress in gradient-structured metals and alloys / Ji W., Zhou R., Vivekananthan P. et al. // Progress in Materials Science. 2023, vol. 140, 101194. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2023.101194.
10. Ultrasonic nanocrystal surface modification: processes, characterization, properties, and applications / Kishore A., John M., Ralls A.M. et al. // Nanomaterials. 2022, vol. 12, no. 9, p. 1415. DOI: 10.3390/nano12091415.

11. Lo K.H., Shek C.H., Lai J.K.L. Recent developments in stainless steels // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2009, vol. 65, no. 4-6, pp. 39-104. DOI: 10.1016/j.mser.2009.03.001.
12. Влияние технологических условий наноструктурирующей фрикционной обработки на структурно-фазовое состояние и упрочнение метастабильной аустенитной стали / Макаров А.В., Скорынина П.А., Юровских А.С., Осинцева А.Л. // *Физика металлов и металловедение*. 2017. Т. 118. № 12. С. 1300-1311. DOI: 10.7868/S0015323017120087.
13. Shi X., Xiao Z., Wu J. The use of nanotechnology to improve the bulk and surface properties of steel for structural applications // *Nanotechnology in eco-efficient construction*. 2013, pp. 75-107. DOI: 10.1533/9780857098832.1.75.
14. Amanov A., Pyun Y.S. Lowering friction of ball screws made of different steel grades through ultrasonic impact treatment // *Tribology International*. 2018, vol. 123, pp. 105-119. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.03.008.
15. Bachurin D.V., Murzaev R.T., Nazarov A.A. Discrete dislocation simulation of the ultrasonic relaxation of non-equilibrium grain boundaries in a deformed polycrystal // *Ultrasonics*. 2021, vol. 117, 106555. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106555.
16. Polonyankin D.A., Fedorov A.A., Blesman A.I., Nesov S.N. Structural coloration of AISI 321 steel surfaces textured by ultrasonic impact treatment // *Optics & Laser Technology*. 2022, vol. 150, 107948. DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.107948.
17. Statnikov E.Sh., Korolkov O.V., Vityazev V.N. Physics and mechanism of ultrasonic impact // *Ultrasonics*. 2006, vol. 44, pp. e533-e538. DOI: 10.1016/j.ultras.2006.05.119.
18. Improvement of the fatigue strength of SUS304 austenite stainless steel using ultrasonic nanocrystal surface modification / Yasuoka M., Wang P., Zhang K. et al. // *Surface and Coatings Technology*. 2013, vol. 218, pp. 93-98. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.12.033.
19. Progress on the effect and mechanism of ultrasonic impact treatment on additive manufactured metal fabrications / Sun L., Huang L., Wu P. et al. // *Crystals*. 2023, vol. 13, no. 7, p. 995. DOI: 10.3390/cryst13070995.
20. Improving mechanical properties of austenitic stainless steel by the grain refinement in wire and arc additive manufacturing assisted with ultrasonic impact treatment / Diao M., Guo C., Sun Q. et al. // *Materials Science and Engineering: A*. 2022, vol. 857, 144044. DOI: 10.1016/j.msea.2022.144044.
21. Gradient nanostructure and residual stresses induced by ultrasonic nano-crystal surface modification in 304 austenitic stainless steel for high strength and high ductility / Ye C., Telang A., Gill A. S., Suslov S. et al. // *Materials Science and Engineering: A*. 2014, vol. 613, pp. 274-288. DOI: 10.1016/j.msea.2014.06.114.
22. Estrin Y., Vinogradov A. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science // *Acta Materialia*. 2013, vol. 61, no. 3, pp. 782-817. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.10.038.
23. The Role of α' -Martensite on the variation of compressive residual stress in a gradient nanostructured austenitic stainless steel / He Y., Zhou H., Liu W. et al. // *Materials & Design*. 2024, vol. 238, 112723. DOI: 10.1016/j.matdes.2024.112723.
24. Amanov A., Pyun Y.-S. A comprehensive review of nanostructured materials by ultrasonic nanocrystal surface modification technique // *The Journal of Engineering*. 2015, vol. 2015, no. 13, pp. 144-149. DOI: 10.1049/joe.2015.0067.
25. Janeiro I., Hubert O., Schmitt J.-H. In-situ strain induced martensitic transformation measurement and consequences for the modeling of medium Mn stainless steels mechanical behavior // *International Journal of Plasticity*. 2022, vol. 154, 103248. DOI: 10.1016/j.ijplas.2022.103248.
26. Ghasemi A., Vanini, S.A.S. Experimental and numerical investigation of martensite phase transformation in austenitic stainless steel subjected to ultrasonic nanocrystal surface modification at room and cryogenic temperatures // *Surface and Coatings Technology*. 2023, vol. 474, 130109. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.130109.
27. Ahmedabadi P.M., Kain V., Agrawal A. Modelling kinetics of strain-induced martensite transformation during plastic deformation of austenitic stainless steel // *Materials & Design*. 2016, vol. 109, pp. 466-475. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.07.106.
28. Tiarniyu A.A., Szpunar J.A., Odeshi A.G. Strain rate sensitivity and activation volume of AISI 321 stainless steel under dynamic impact loading: Grain size effect // *Materials Characterization*. 2019, vol. 154, pp. 7-19. DOI: 10.1016/j.matchar.2019.05.027.
29. Influence of microstructural features and deformation-induced martensite on hardening of stainless steel by cryogenic ultrasonic impact treatment / Vasylyev M.A., Mordyuk B.N., Sidorenko S.I. et al. // *Surface and Coatings Technology*. 2018, vol. 343, pp. 57-68. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.11.019.

References

1. Titouche N.E., Boukharouba T., Amzert S.A. et al. Direct drive friction welding effect on mechanical and electrochemical characteristics of titanium stabilized austenitic stainless steel (AISI 321) research reactor thick tube. *J. Manuf. Process*. 2019;41:273-283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.03.016>.
2. Prakash K.S., Kannan A.R., Pramod R. et al. Microstructure, mechanical properties and fracture toughness of SS 321 stainless steel manufactured using wire arc additive manufacturing. *Trans. Indian Inst. Met.* 2023;76:537-544. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02713-3>.
3. Gurovich B.A., Kuleshova E.A., Frolov A.S. et al. Investigation of high temperature annealing effectiveness for recovery of radiation-induced structural changes and properties of 18Cr-10Ni-Ti austenitic stainless steels. *J. Nucl. Mater.* 2015;465:565-581. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.06.045>.
4. Ganeev A.A., Ramazanov A.K. Optimization of a chemical composition of corrosion-resistant AISI 321 steel for pipeline valve castings. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University].

- ty]. 2021;19(2):32-39. DOI: <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-32-39> (In Russ.)
5. Qiu Y., Yang H., Tong L., Wang L. Research progress of cryogenic materials for storage and transportation of liquid hydrogen. *Metals*. 2021;11(7):1101-1114. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11071101>.
6. Acharya S., Suwas S., Chatterjee K. Review of recent developments in surface nanocrystallization of metallic biomaterials. *Nanoscale*. 2021;13(4):2286-2301. DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/d0nr07566c>.
7. Razyvaev E.I., Kapitanenko D.V. Effect of thermomechanical treatment on structure and properties of austenitic steels. *Trudy VIAM [Proceedings of VIAM]*, 2013;5:1 (In Russ.)
8. Yang X., Wang D., Wang X., Ling X. Enhanced mechanical behaviors of gradient nano-grained austenite stainless steel by means of ultrasonic impact treatment. *Results in Physics*. 2017;7:1412-1421. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.04.002>.
9. Ji W., Zhou R., Vivegananthan P. et al. Recent progress in gradient-structured metals and alloys. *Prog. Mater. Sci.* 2023;140:101194. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101194>.
10. Kishore A., John M., Ralls A.M. et al. Ultrasonic nanocrystal surface modification: processes, characterization, properties, and applications. *Nanomaterials*. 2022;12(9):1415. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/nano12091415>.
11. Lo K.H., Shek C.H., Lai J.K.L. Recent developments in stainless steels. *Mater. Sci. Eng., R*. 2009;65(4-6):39-104. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mser.2009.03.001>.
12. Makarov A.V., Skorynina P.A., Yurovskikh A.S., Osintseva A.L. Effect of the conditions of the nanostructuring frictional treatment process on the structural and phase states and the strengthening of metastable austenitic steel. *Fizika metallov i metallovedenie [Physics of Metals and Metallography]*, 2017;118(12):1300-1311. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0015323017120087> (In Russ.)
13. Shi X., Xiao Z., Wu J. The use of nanotechnology to improve the bulk and surface properties of steel for structural applications. *Nanotechnology in eco-efficient construction*. 2013;75-107. DOI: <http://dx.doi.org/10.1533/9780857098832.1.75>.
14. Amanov A., Pyun Y.S. Lowering friction of ball screws made of different steel grades through ultrasonic impact treatment. *Tribol. Int.* 2018;123:105-119. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2018.03.008>.
15. Bachurin D.V., Murzaev R.T., Nazarov A.A. Discrete dislocation simulation of the ultrasonic relaxation of non-equilibrium grain boundaries in a deformed polycrystal. *Ultrasonics*. 2021;117:106555. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2021.106555>.
16. Polonyankin D.A., Fedorov A.A., Blesman A.I., Nesov S.N. Structural coloration of AISI 321 steel surfaces textured by ultrasonic impact treatment. *Optics & Laser Technology*. 2022;150:107948. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.107948>.
17. Statnikov E.Sh., Korolkov O.V., Vityazev V.N. Physics and mechanism of ultrasonic impact. *Ultrasonics*. 2006;44:e533-e538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.05.119>.
18. Yasuoka M., Wang P., Zhang K. et al. Improvement of the fatigue strength of SUS304 austenite stainless steel using ultrasonic nanocrystal surface modification. *Surf. Coat. Technol.* 2013;218:93-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.12.033>.
19. Sun L., Huang L., Wu P. et al. Progress on the effect and mechanism of ultrasonic impact treatment on additive manufactured metal fabrications. *Crystals*. 2023;13(7):995. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst13070995>.
20. Diao M., Guo C., Sun Q. et al. Improving mechanical properties of austenitic stainless steel by the grain refinement in wire and arc additive manufacturing assisted with ultrasonic impact treatment. *Mater. Sci. Eng., A*. 2022;857:144044. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144044>.
21. Ye C., Telang A., Gill A. S., Suslov S. et al. Gradient nanostructure and residual stresses induced by ultrasonic nano-crystal surface modification in 304 austenitic stainless steel for high strength and high ductility. *Mater. Sci. Eng., A*. 2014;613:274-288. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2014.06.114>.
22. Estrin Y., Vinogradov A. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science. *Acta Mater.* 2013;61:782-817. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.10.038>.
23. He Y., Zhou H., Liu W. et al. The role of α' -martensite on the variation of compressive residual stress in a gradient nanostructured austenitic stainless steel. *Mater. Des.* 2024;238:112723. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112723>.
24. Amanov A., Pyun Y.-S. A comprehensive review of nanostructured materials by ultrasonic nanocrystal surface modification technique. *J. Eng.* 2015;2015(13):144-149. DOI: <https://doi.org/10.1049/joe.2015.0067>.
25. Janeiro I., Hubert O., Schmitt J.-H. In-situ strain induced martensitic transformation measurement and consequences for the modeling of medium Mn stainless steels mechanical behavior. *Int. J. Plast.* 2022;154:103248. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijplas.2022.103248>.
26. Ghasemi A., Vanini S.A.S. Experimental and numerical investigation of martensite phase transformation in austenitic stainless steel subjected to ultrasonic nanocrystal surface modification at room and cryogenic temperatures. *Surf. Coat. Technol.* 2023;474:130109. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130109>.
27. Ahmedabadi P.M., Kain V., Agrawal A. Modelling kinetics of strain-induced martensite transformation during plastic deformation of austenitic stainless steel. *Mater. Des.* 2016;109:466-475. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.106>.
28. Tiamiyu A.A., Szpunar J.A., Odeshi A.G. Strain rate sensitivity and activation volume of AISI 321 stainless steel under dynamic impact loading: Grain size effect. *Mater. Charact.* 2019;154:7-19. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2019.05.027>.
29. Vasylyev M.A., Mordyuk B.N., Sidorenko S.I. et al. Influence of microstructural features and deformation-induced martensite on hardening of stainless steel by cryogenic ultrasonic impact treatment. *Surf. Coat. Technol.* 2018;343:57-68. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.11.019>.

Поступила 15.07.2024; принята к публикации 19.09.2024; опубликована 28.03.2025
Submitted 15/07/2024; revised 19/09/2024; published 28/03/2025

Полонянкин Денис Андреевич – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Физика», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: dapolonyankin@omgtu.tech. ORCID 0000-0001-6799-3105

Федоров Алексей Аркадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: fedot83@gmail.com. ORCID 0000-0002-6681-087X

Гомонюк Татьяна Михайловна – инженер-конструктор, ЗАО «Электон», Радужный, Россия.
Email: gomonyuk1998@mail.ru. ORCID 0000-0002-6703-0242

Denis A. Polonyankin – PhD (Pedagogy), Associate Professor of the Physics Department, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: dapolonyankin@omgtu.tech. ORCID 0000-0001-6799-3105

Alexey A. Fedorov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: fedot83@gmail.com. ORCID 0000-0002-6681-087X

Tatyana M. Gomonyuk – Design Engineer, CJSC Elekton, Raduzhny, Russia.
Email: gomonyuk1998@mail.ru. ORCID 0000-0002-6703-0242

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. INDUSTRIAL MANAGEMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 658.56

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-103-109



ОБОСНОВАНИЕ ОБЪЕМА КОНТРОЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ

Васин С.А., Маликов А.А., Никольский С.М.

Тульский государственный университет, Тула, Россия

Аннотация. Среди широкой гаммы выпускаемой сложнoproфильной продукции особое место в производственном процессе занимают зубчатые колеса. Требования уровня качества, предъявляемые к зубчатым колесам и определяющие их работоспособность, являются сложными для установления и требуют для их оценки специального высокоточного и дорогостоящего оборудования на базе вычислительных комплексов. В то же время на многих предприятиях в качестве приборов для контроля линейных размеров используются универсальные координатно-измерительные машины, которые обладают высокой точностью, но не предназначены для контроля показателей качества зубчатых колес. Расширение возможностей данных координатно-измерительных машин на основе оценки показателей зубчатых колес является целью работы. Проведенный анализ показывает, что одной из причин отказа от использования универсальных координатно-измерительных машин является реализуемый на них метод координатного контроля, не рекомендуемый в настоящее время для определения показателей качества зубчатых колес, изложенных в нормативных документах. Приведенная в статье попытка обоснования возможности использования универсальных координатно-измерительных машин базируется на оценке допустимого риска принятия решения при оценке качества изготовления зубчатых колес. Методика базируется на принципах выборочного контроля по альтернативному признаку. Согласно данной методике сделана попытка дискретного представления параметров непрерывной боковой поверхности зубьев с учетом технологии их изготовления. Ориентируясь на допустимые риски принятия решений, определено количество необходимых точек координатного зондирования поверхности. При этом расположение контрольных точек зависит от размеров данной поверхности. Дополнительно разработаны рекомендации по переводу результатов измерений в нормативные показатели. Полученные результаты позволяют рекомендовать применение универсальных координатно-измерительных машин для оценки показателей качества в рассмотренном диапазоне основных параметров.

Ключевые слова: зубчатые колеса, универсальные координатно-измерительные машины, координатный контроль, выборочный контроль по альтернативному признаку, риск решений

© Васин С.А., Маликов А.А., Никольский С.М., 2025

Для цитирования

Васин С.А., Маликов А.А., Никольский С.М. Обоснование объема контрольных операций на основе статистических методов управления качеством продукции // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 103-109. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-103-109>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

JUSTIFICATION OF THE VOLUME OF CONTROL OPERATIONS BASED ON STATISTICAL METHODS OF PRODUCT QUALITY MANAGEMENT

Vasin S.A., Malikov A.A., Nikolsky S.M.

Tula State University, Tula, Russia

Abstract. Among the wide range of manufactured complex-profile products, gear wheels occupy a special place in the production process. The quality level requirements imposed on gears and determining their performance are difficult to establish and require special high-precision and expensive equipment based on computer systems. At the same time, many enterprises use universal coordinate measuring machines as instruments for monitoring linear dimensions, which have high accuracy, but are not intended for monitoring the quality indicators of gears. The purpose of the work is to expand the capabilities of these coordinate measuring machines based on the evaluation of gear indicators. The analysis shows that one of the reasons for refusing to use universal coordinate measuring machines is the coordinate control method implemented on them, which is not currently recommended for determining the quality indicators of gears set out in regulatory documents. The attempt presented in the article to substantiate the possibility of using universal coordinate measuring machines is based on assessing the acceptable risk of decision-making when assessing the quality of gears manufacturing. The technique is based on the principles of selective control on an alternative feature. According to this technique, an attempt was made to discretely represent the parameters of the continuous flank surface of the teeth, taking into account their manufacturing technology. Based on the acceptable risks of decision-making, the number of necessary coordinate sensing points of the surface was determined. In this case, the location of control points depends on the size of the given surface. Additionally, recommendations have been developed for transforming measurement results into normative indicators. The results obtained make it possible to recommend the use of universal coordinate measuring machines to assess quality indicators in the considered range of basic parameters.

Keywords: gear wheels, universal coordinate measuring machines, coordinate control, selective control based on an alternative feature, risks of decision-making

For citation

Vasin S.A., Malikov A.A., Nikolsky S.M. Justification of the Volume of Control Operations Based on Statistical Methods of Product Quality Management. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 103-109. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-103-109>

Введение

Процесс контроля качества изготовления зубчатых колес предусматривает оценку комплексных показателей [1], соответствующих эксплуатационным характеристикам, для которых применяется специальная, значительно сложная и дорогостоящая контрольная аппаратура. В то же время на машиностроительных предприятиях используется значительное количество универсальных координатно-измерительных машин (КИМ), точность которых соответствует требованиям по определению качества зубчатых колес [2]. Препятствием применения КИМ является реализуемый на них координатный метод измерения.

Согласно [1], в зависимости от требуемой точности измерений контроль боковой поверхности зубьев на КИМ рекомендуется производить в двух или шести сечениях (рис. 1), при этом рекомендуемое количество измеряемых точек должно составлять порядка 150 на длину траектории обката. Такая стратегия не охватывает с достаточной достоверностью всю поверхность зуба и требует значительного вычислительного ресурса.

Предложенные в [3, 4] параметры точечного контроля поверхности (рис. 2) в виде сеток равномерно расположенных точек контроля не имеют достаточного обоснования по размерности, формирующей рациональные затраты времени на проведение процесса контроля.

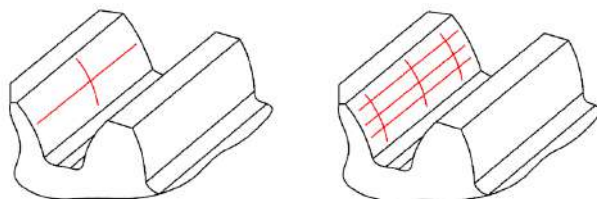


Рис. 1. Рекомендуемые стратегии контроля боковой поверхности зубьев на КИМ [1]

Fig. 1. Recommended strategies for inspection of tooth flank surface on a CMM [1]

Однако возможность использования универсальных КИМ для определения качества изготовления зубчатых колес с обоснованием минимальных объемов работ имеет актуальные перспективы [5, 6].



Рис. 2. Формирование сеток контрольных точек при координатном контроле [4]

Fig. 2. Formation of control point grids during coordinate control [4]

Материалы и методы исследования

Обоснование минимального количества измерений, обладающих достаточной достоверностью, можно было бы провести на основе теории вероятности, однако ее рекомендации характерны для дискретных случайных величин. Перевод непрерывной функции, представляющей собой боковую поверхность зуба зубчатого колеса, в дискретную форму требует определенных изменений. Так, если разбить рассматриваемую поверхность на отдельные ячейки (сетку) и проводить контроль по центрам ячеек [7], то требуется учитывать как их необходимую размерность, так и концентрацию в различных областях поверхности. При этом следует обосновать стабильность размера поверхности в пределах одной ячейки.

Данное обоснование может базироваться на основных технологических приемах изготовления зубчатых колес. В промышленности наиболее широко распространены методы червячного фрезерования или долбления зубьев, для реализации которых рекомендуются следующие режимы обработки:

- для чистовой обработки зубьев число резов по поперечному профилю составляет более 20;
- осевая подача инструмента вдоль зуба находится в пределах 0,8–1 мм/об.

Это приводит к формированию на боковой поверхности зубьев также «сетки» с выступами по углам ячеек (рис. 3).

Ориентируясь на основные параметры зубчатых колес, используемых в машиностроении (модуль $m_n = 1,5\text{--}6$ мм, число зубьев $Z_k = 18\text{--}100$, длина зуба вдоль оси $h_z = 5\text{--}60$ мм), размеры $a \times b$ максимальных ячеек данной сетки составят от $0,4 \times 0,4$ до 1×1 мм. Следует помнить, что формируемые режимами обработки выступы h не должны превышать допуски на формируемые комплексные параметры [8] зубчатых колес, то есть находиться в пределах микрометров. Опираясь на предположение, что «любая регулярная технология накладывает более или менее жесткие связи на взаимное расположение близких точек», можно предположить, что в пределах половины размера ячейки при чистовой обработке изменение высоты участка не превысит 0,003 мм. Данная величина соответствует

погрешности измерения на универсальных координатно-измерительных машинах. В виду малых размеров ячеек это позволяет представить боковую поверхность зуба колеса как равномерную сетку положения контрольных точек на рабочей поверхности зуба колеса с числом точек вдоль высоты n_h и длины n_l зуба. Учитывая, что высота зуба в радиальном направлении для большинства колес не превышает $2m_n$, количество ячеек $N_{я}$ данной сетки определится как

$$N_{я} = \frac{2m_n}{a} \cdot \frac{h_z}{b}. \quad (1)$$

Для колес с $m_n = 1,5$ мм и $h_z = 5$ мм $N_{я} = 94$ ($n_h = 8$ и $n_l = 13$), а для колес с $m_n = 6$ мм и $h_z = 60$ мм $N_{я} = 2880$ ($n_h = 24$ и $n_l = 120$).

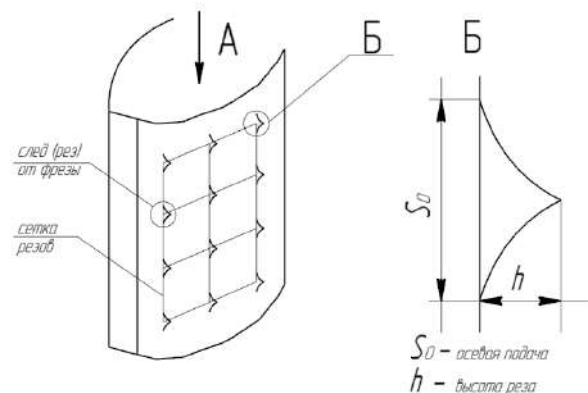


Рис. 3. Сетка выступов, формируемая инструментом на боковой поверхности зуба

Fig. 3. The grid of protrusions formed by the instrument on the tooth flank surface

Данный объем измерений составит генеральную совокупность, которая является значительной и вряд ли приемлема для проведения измерений. Однако использование метода статистического контроля качества продукции, который широко применяется в промышленности, позволяет с достаточной достоверностью снизить объемы контроля.

Основные погрешности зубьев зубчатого колеса определяются относительно номинального их профи-

ля и положения. Следует помнить, что все погрешности изготовления колес, связанные с ошибками настройки оборудования, а также погрешности формы инструмента являются систематическими, имеют значительные размеры и регулярность в повторении. Поэтому для их определения не требуется такого большого количества измерений. Погрешности, связанные со средними величинами отжимов и жесткости оборудования, могут быть частично компенсированы настройкой. Погрешности, связанные с колебаниями в зазорах и самой технологической системы, колебанием твердости материала заготовки и т.п., являются случайными, но единичные отклонения от заданного профиля из всей генеральной совокупности не снижают качества их работоспособности. Поэтому для определения объемов измерений возможно применение рекомендаций метода одноступенчатого выборочного контроля.

Основой использования данного метода является задание приемлемого уровня качества, выраженного в проценте несоответствующих единиц продукции – AQL. В рассматриваемом случае в зависимости от степени точности изготовления колес возможно принятие риска пропуска несоответствующих значений параметров в точках контроля AQL в пределах 1–2,5%.

Согласно оперативному плану одноступенчатого контроля [9] при отсутствии доминирующих факторов, влияющих на качество изготовления зубчатых колес, ориентируясь на общий уровень контроля, для $N_a = 94$ следует принять код выборок F или D , а для $N_a = 2880$ – K или H (табл. 1). Данным кодам соответствуют объемы выборок (количество измерений): $F = 20$; $D = 8$; $K = 125$; $H = 50$.

Таблица 1. Коды объемов выборок [9]

Table 1. Sample size codes [9]

Объем партии	Специальный уровень контроля				Общий уровень контроля		
	S-1	S-2	S-3	S-4	I	II	III
От 91 до 150 включительно	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>D</i>	<i>F</i>	<i>G</i>
От 1201 до 3200 включительно	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>G</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>

Для малых по размерам колес наиболее рекомендуемые коды выборок $F = 20$ и $G = 32$, что позволяет при контроле принимать изделия с выходящими за пределы результатами измерений в 1 или 2 точках контроля ($A_s = 1-2$). В этом случае общее возможное количество ячеек, имеющих значение параметра (размера), вышедшего за пределы допустимого, не превысит AQL = 2,5%.

Для крупных колес объем выборки кода K (125 измерений) предусматривает для AQL = 2,5%, число приемочных несоответствий $A_s = 7$. Однако объем измерений слишком велик. Поэтому наиболее рационально использовать код выборок H (50 измерений). В этом случае для AQL = 2,5% допускается $A_s = 3$ (табл. 2).

Таблица 2. Одноступенчатые планы при нормальном контроле [9]

Table 2. Single-stage plans under normal control [9]

Код объема выборки	Объем выборки	Приемочный уровень качества AQL (% несоответствующих единиц продукции и число несоответствий A_s на 100 единиц продукции) нормальный контроль				
		0,4	0,65	1	1,5	2,5
		A_s	A_s	A_s	A_s	A_s
<i>F</i>	20	-	0	0	1	1
<i>G</i>	32	0	0	1	1	2
<i>H</i>	50	0	1	1	2	3
<i>J</i>	80	1	1	2	3	5
<i>K</i>	125	1	2	3	5	7

Учитывая неравномерность при изготовлении шага резцов, возможно при контроле принять равномерную сетку расположения точек выборочного контроля, снизив значение A_s . Количество рядов точек вдоль высоты n_h и длины n_L боковой поверхности зуба следует назначать пропорционально их соотношению:

$$\frac{n_h}{n_L} = \frac{2m_n}{h_3} \quad (2)$$

Представленный подход позволяет сформировать рекомендации по количеству ячеек контроля на боковой поверхности зубьев (табл. 3).

Таблица 3. Рекомендуемые параметры сеток контроля качества боковых поверхностей зубьев колес

Table 3. Recommended parameters of quality control grids for the flank surfaces of wheel teeth

m_n , мм	n	h_3 , мм										
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
1,5	n_h	4	5	5	5	5	5					
	n_L	5	6	10	10	10	10					
2	n_h		4	5	5	5	5	5				
	n_L		5	6	6	10	10	10				
2,5	n_h			4	5	5	5	5	5			
	n_L			5	6	6	10	10	10			
3	n_h				5	5	5	5	5	7		
	n_L				6	6	10	10	10	10		
4	n_h					5	5	5	5	7	7	
	n_L					6	10	10	10	10	10	
5	n_h						5	5	5	5	7	7
	n_L						10	10	10	10	10	10
6	n_h							5	5	5	7	7
	n_L							10	10	10	10	10

Приведенные в табл. 3 параметры сеток несколько ужесточены по отношению к количеству единиц несоответствия A_s и количеству контрольных точек может быть увеличено. Однако это приведет к увеличению времени контроля.

Переход к нормативным показателям качества рекомендуется производить в следующей последовательности:

1) для каждой группы контрольных точек n_h , расположенных на одном уровне n_h , методом наимень-

ших квадратов на основной окружности R_b (рис. 4) определяется угол μ_k – начало аппроксимирующей эвольвенты [10];

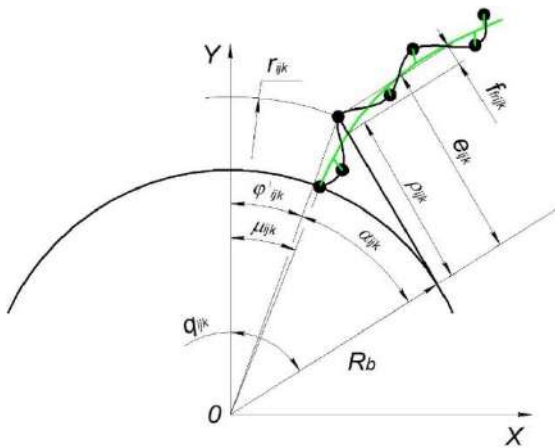


Рис. 4. Определение начала аппроксимирующей эвольвенты: φ_{ijk} – угловая координата положения контрольной точки – i , зуба – k , уровня расположения вдоль длины зуба – j ; r_{ijk} – радиус контрольной точки; α_{ijk} – угол зацепления точки i , q_{ijk} – угол положения центра радиуса кривизны; ρ_{ijk} – радиус кривизны точки аппроксимирующей эвольвенты; e_{ijk} – расстояние до контрольной точки; f_{ijk} – погрешность профиля

Fig. 4. Determining the origin of the approximating involute: φ_{ijk} is angular coordinate of the position of the control point – i , tooth – k , level of location along the length of the tooth – j ; r_{ijk} is radius of the control point; α_{ijk} is the engagement angle of point i , q_{ijk} is the position angle of the center of the curvature radius; ρ_{ijk} is the radius of curvature of the point of the approximating involute; e_{ijk} is distance to the control point; f_{ijk} is profile error

2) из множества эвольвент, определяющих одну боковую сторону зуба колеса, также методом

наименьших квадратов для прямоугольных колес определяется начало всей поверхности μ_Σ . По аппроксимирующей эвольвенте с началом μ_Σ как по направляющей с образующей, параллельной оси колеса, строится номинальная боковая поверхность зуба (рис. 5);

3) в случае, если наблюдается смещение начал аппроксимирующих эвольвент относительно оси колеса, то данное смещение может быть определено также методом наименьших квадратов по определению линии направления профиля a_φ . Погрешность направления зуба определится как

$$F_{\beta r} = h_3 \operatorname{tg} a_\varphi; \quad (3)$$

4) погрешность угла профиля a_n определится как в п.1 при дополнительном изменении радиуса основной окружности R_b . При заданных m_n и Z_k и определенном R_b

$$\Delta a_n = a_n - \frac{2R_b}{m_n Z_k}; \quad (4)$$

5) для определения радиального биения зубчатого венца относительно оси базового отверстия необходимо проконтролировать левые и правые боковые поверхности на 4–6 зубьях, равномерно расположенных по окружности. Для них строятся номинальные боковые поверхности относительно оси базового отверстия. Смещая центр делительной окружности относительно оси базового отверстия, находят такое его положение, при котором разница между толщинами зубьев по делительной окружности было бы минимальным. Величина смещения определит радиальное биение F_{rr} ;

6) погрешность шага определится как разница между номинальным и фактическим расстоянием между двумя одноименными поверхностями соседних зубьев:

$$f_{Pr} = \pi m_n - \frac{m_n Z_k}{2} (\mu_{\Sigma L(R)i+1} - \mu_{\Sigma L(R)i}); \quad (5)$$

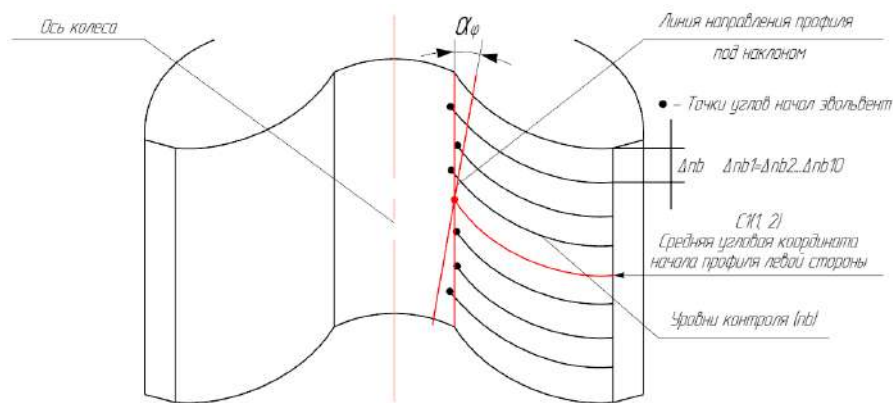


Рис. 5. Определение погрешности направления зуба

Fig. 5. Determination of tooth direction error

7) погрешность профиля f_f определится как расстояние между номинальной боковой поверхностью зуба и показаниями координатного контроля.

Таким образом, с достаточной степенью достоверности для качества зубчатых колес можно применить координатный метод измерений.

Полученные результаты и их обсуждение

Приведенные в работе рекомендации позволяют производить контроль качества изготовления зубчатых колес в пределах параметров точности координатно-измерительных машин. Анализ данных, приведенных в [8], показывает, что рассматриваемой операции могут подвергаться прямозубые колеса 7–12 степеней точности, модулей $m_n = 1,5–6$ мм и числом зубьев $Z_k = 18–100$, наиболее используемые в среднем машиностроении. Приведенные в табл. 3 рекомендации несколько субъективированы и в конкретном случае могут быть пересмотрены на основании данных [9]. Они могут служить исходными значениями в процессе определения стратегии определения качества зубчатых колес. Окончательные значения параметров сеток могут быть установлены на основе практического применения.

Использование двухступенчатых планов контроля для определения объемов измерений не рационально, так как это усложняет процесс не только в реализации, но и в понимании результатов.

При необходимости точность контроля может быть повышена за счет многократных измерений, но не более 5, так как это также значительно увеличивает время операции.

Следует отметить, что в процессе изготовления не все параметры качества зубчатых колес, приведенные в [8], должны быть реализованы и проконтролированы. Это также дает определенную свободу в определении параметров сеток контрольных точек.

Заключение

Полученные результаты исследований позволяют использовать координатные измерения для оценки показателей качества зубчатых колес в рекомендуемых пределах показателей. Установлены рациональные объемы измерений в виде количества точек контрольных сеток (от 4×5 до 7×10). Предложен порядок преобразования результатов измерений в параметры, характеризующие условия применения, которые приведены в нормативных документах. Это позволяет расширить возможности существующих на предприятии координатно-измерительных машин, повысить их загрузку и отдачу, а также снизить уровень производственных затрат (особенно на приобретение нового оборудования).

Список источников

- ГОСТ ISO 1328-1-2017. Передачи зубчатые цилиндрические. Система ISO. Классификация допусков на боковые поверхности зубьев. Ч. 1. Определения и

допускаемые значения отклонений на боковые поверхности зубьев зубчатого колеса. Принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30 ноября 2017 г. № 52). М.: Стандартинформ, 2018. 42 с.

- Карабонцева М.В., Брижинская Н.В., Левко В.А. Автоматизация контроля геометрических характеристик червячных и конических зубчатых колес при помощи координатно-измерительных машин // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 2. С. 248–255.
- Сурков И.В. Автоматизация контроля параметров зубчатых колес и передач // Станкоинструмент. 2016. №1. С. 80–87.
- Сурков И.В., Мягкова М.В. Координатные измерения линейно-угловых параметров зубчатых колес // Станки и оборудование. Серия «Металлообработка». 2007. №6.
- Золотухин И.С., Федорова К.М. Контроль геометрических параметров деталей с помощью координатно-измерительных машин. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2018. 114 с.
- Ушаков М.В., Воробьев И.А., Никольский С.М. Оценка области использования КИМ // Мир измерений. 2022. № 2. С. 49–51.
- Теория, расчет и проектирование оптимизированных методик координатного контроля в машиностроении / Соломахо В.Л., Цитович Б.В., Соколовский С.С., Соломахо Д.В. Минск: БНТУ, 2012. 239 с.
- ГОСТ 1643-81. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 21 апреля 1981 г. № 2046. М.: Изд-во стандартов, 1981. 72 с.
- ГОСТ Р ИСО 2859-1-2007. Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Ч. 1. Планы выборочного контроля последовательных партий на основе приемлемого уровня качества. Утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 марта 2007 г. № 38-ст. М.: Стандартинформ, 2008. 101 с.
- Ушаков М.В., Воробьев И.А., Никольский С.М. Рекомендации по разработке методики обработки результатов измерения зубчатых колес на КИМ // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2023. № 11. С. 519–523.

References

- State Standard GOST ISO 1328-1-2017. Cylindrical gears. ISO system. Flank tolerance classification. Part 1. Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth. Moscow: Standartinform, 2018, 42 p. (In Russ.)
- Karabontseva M.V., Brizhinskaya N.V., Levko V. A. Automation of control of geometric characteristics of worm gears and bevel gears using coordinate measuring machines. *Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal* [Siberian Aerospace Journal], 2024;25(2):248-255. (In Russ.)

3. Surkov I.V. Automation of control of gear and transmission parameters. *Stankoinstrument* [Machine tools], 2016;(1):80-87. (In Russ.)
4. Surkov I.V., Myagkova M.V. Coordinate measurements of linear-angular parameters of gears. *Stanki i oborudovanie. Seriya «Metalloobrabotka»* [Machine tools and equipment. Series "Metalworking"], 2007:6. (In Russ.)
5. Zolotukhin I.S., Fedorova K.M. *Kontrol geometricheskikh parametrov detaley s pomoshchyu koordinatno-izmeritelnykh mashin* [Control of geometric parameters of parts using coordinate measuring machines]. Tyumen: Tyumen Industrial University, 2018, 114 p. (In Russ.)
6. Ushakov M.V., Vorobyov I.A., Nikolsky S.M. Assessment of the field of use of CMM. *Mir izmereniy* [The world of measurements], 2022;(2):49-51. (In Russ.)
7. Solomaho V.L., Tsitovich B.V., Sokolovsky S.S., Solomaho D.V. *Teoriya, raschet i proektirovanie optimizirovannykh metodik koordinatnogo kontrolya v mashinostroenii* [Theory, calculation and design of optimized methods of coordinate control in mechanical engineering]. Minsk: BNTU, 2012, 239 p. (In Russ.)
8. State Standard GOST 1643-81. Cylindrical gears. Tolerances. Moscow: Standards Publishing House, 1981, 72 p. (In Russ.)
9. State Standard GOST R ISO 2859-1-2007. Statistical methods. Sampling procedures for inspection by attributes. Part 1: Sampling schemes indexed by acceptance quality limit for lot-by-lot inspection. Moscow: Standartinform, 2008, 101 p. (In Russ.)
10. Ushakov M.V., Vorobyov I.A., Nikolsky S.M. Recommendations for the development of a methodology for processing the results of measuring gears on a CMM. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembly in mechanical engineering, instrument making], 2023;(11):519-523. (In Russ.)

Поступила 19.01.2025; принята к публикации 05.02.2025; опубликована 28.03.2025
Submitted 19/01/2025; revised 05/02/2025; published 28/03/2025

Васин Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: vasin_sa53@mail.ru. ORCID 0009-0008-6737-7909

Маликов Андрей Андреевич – заведующий кафедрой, доктор технических наук, профессор,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: finance@tsu.tula.ru. ORCID 0000-0002-6757-5584

Никольский Сергей Михайлович – аспирант,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: nikolsky.serge@yandex.ru. ORCID 0009-0001-8482-7464

Sergey A. Vasin – DrSc (Eng.), Professor,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: vasin_sa53@mail.ru. ORCID 0009-0008-6737-7909

Andrey A. Malikov – Head of the Department, DrSc (Eng.), Professor,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: finance@tsu.tula.ru. ORCID 0000-0002-6757-5584

Sergey M. Nikolsky – Postgraduate Student,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: nikolsky.serge@yandex.ru. ORCID 0009-0001-8482-7464



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.518.3
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-110-118

ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Гореликов А.А., Плахотникова Е.В.

Тульский государственный университет, Тула, Россия

Аннотация. Одним из приоритетных направлений развития предприятий в условиях усиливающейся конкуренции является внедрение системы бережливого производства. Существенную поддержку в данном направлении оказывают национальные программы, которые позволяют передавать компетенции и лучшие практики по повышению производительности труда. Тиражирование опыта крупных компаний без учета уровня развития предприятий приводит к нарушению общей системы знаний, хаотичности внедряемых инструментов и, как следствие, снижению интереса производителей к развитию системы после завершения программы. По статистике не более 15% предприятий по производству металлоконструкций, участвующих в программе, продолжают совершенствование системы бережливого производства. Для решения описанной проблемы особую актуальность приобретает разработка научно-методического подхода к планированию системы бережливого производства с учетом уровня развития предприятия. В рамках работы проведен анализ теории глубинных знаний Э. Деминга, классической и гибкой модели управления и предложена новая гибридная модель управления. Разработанная авторами модель включает двухконтурный цикл управления (циклы PDSA и PDCA) и трехконтурный цикл обучения. Ядром модели являются фундаментальные основы теории глубинных знаний Э. Деминга. Реализовать модель позволяет разработанный авторами инструментарий: ранжирование организаций по уровню развития с использованием цветового кода организационных моделей Ф. Лалу; стратификация методов бережливого производства с учетом основных компонентов теории Э. Деминга; понимание системы, понимание теории вариативности, понимание основ теории познания и знание психологии; оценка приоритетности методов бережливого производства с учетом стратегических целей организации. Апробация гибридной модели и разработанного инструментария на предприятии по производству металлоконструкций Тульской области позволила: произвести взаимоувязку целей, уровня развития предприятия и номенклатуры возможных сочетаний методов бережливого производства; выявить основные причины снижения заинтересованности сотрудников в продвижении концепции БП; обосновать и дополнить номенклатуру методов бережливого производства, освоенных в период участия в национальном проекте. Внедрение предложенных модели и инструментария, по предварительным прогнозам, обеспечит повышение эффективности производства до 20% и позволит достичь двукратного повышения эффективности через два года.

Ключевые слова: бережливое производство, теория глубинных знаний Э. Деминга, методы бережливого производства, гибридная модель управления

© Гореликов А.А., Плахотникова Е.В., 2025

Для цитирования

Гореликов А.А., Плахотникова Е.В. Гибридная модель управления процессами внедрения системы бережливого производства на предприятиях металлоконструкций // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 110-118. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-110-118>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

HYBRID MANAGEMENT MODEL FOR SYSTEM IMPLEMENTATION PROCESSES OF LEAN MANUFACTURING AT METAL STRUCTURES ENTERPRISES

Gorelikov A.A., Plakhotnikova E.V.

Tula State University, Tula, Russia

Abstract. One of the priority directions of enterprise development in the context of increasing competition is the introduction of a lean manufacturing system. Significant support in this area is provided by national programs that enable the transfer of competencies and best practices for improving labor productivity. Replication of large companies experience without taking into account the level of development of enterprises leads to a violation of the general knowledge system, the chaotic nature of the implemented tools and, as a result, a decrease in the interest of manufacturers in the development of the system after the completion of the program. According to statistics, no more than 15% of the enterprises for the production of metal structures participating in the program continue to improve the lean manufacturing system. To solve the described problem, the development of a scientific and methodological approach to planning a lean manufacturing system, taking into account the level of development of the enterprise, is of particular relevance. The paper analyzes the theory of profound knowledge by E. Deming, a classical and flexible management model, and proposes a new hybrid management model. The model developed by the authors includes a two-circuit control cycle (PDSA and PDCA cycles) and a three-circuit learning cycle. The core of the model is the foundations of the theory of profound knowledge by E. Deming. The toolkit developed by the authors allows to implement the model: ranking organizations by level of development using the color code of F. Laloux's organizational models; stratification of lean manufacturing methods taking into account the main components of E. Deming's theory: understanding the system, understanding the theory of variability, understanding the basics of the theory of cognition and knowledge of psychology; assessment of the priority of lean manufacturing methods, taking into account the strategic goals of the organization. The approbation of the hybrid model and the developed toolkit at a metal structure manufacturing enterprise in the Tula region allowed: to link the goals, the level of development of the enterprise and the range of possible combinations of lean manufacturing methods; to identify the main reasons for the decrease in employee interest in promoting the concept of lean manufacturing; to substantiate and supplement the range of lean manufacturing methods mastered during the period of participation in the national project. According to preliminary forecasts, the implementation of the proposed model and toolkit will increase production efficiency by up to 20% and will allow achieving a twofold increase in efficiency in two years.

Keywords: lean manufacturing, E. Deming's theory of profound knowledge, lean manufacturing methods, hybrid management model

For citation

Gorelikov A.A., Plakhotnikova E.V. Hybrid Management Model for System Implementation Processes of Lean Manufacturing at Metal Structures Enterprises. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 110-118. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-110-118>

Введение

Сегодня в России работают более 1200 предприятий, осуществляющих производство металлоконструкций из листового и фасонного проката черных металлов. Промышленность металлоконструкций активно развивается, применяются новые технологии и материалы. На предприятиях внедряются системы автоматизации процессов проектирования и производства, что улучшает качество продукции, снижает затраты производителей и увеличивает их конкурентоспособность.

В условиях усиливающейся конкуренции перед большинством предприятий остро стоит вопрос повышения эффективности производства и снижения

времени производственного цикла. Приоритетной задачей является внедрение инструментов бережливого производства (БП) и их синхронизация в производственных системах [1]. Несмотря на успех реализации концепции БП в таких крупных корпорациях, как «Росатом», «Ростех», «Калашников», и массовое тиражирование накопленного опыта и знаний в рамках национального проекта «Производительность труда и поддержка занятости» [2], процент предприятий, активно поддерживающих систему БП, в работоспособном состоянии после завершения участия в проекте недостаточно высок. Среди предприятий по производству металлоконструкций не более пятидесяти предприятий продолжают свое развитие по внедрению инструментов БП, остальные участники

проекта останавливаются на достигнутых результатах либо возвращаются к привычной производственной системе.

Причин сложившейся ситуации несколько. Прежде всего это отсутствие быстрого эффекта и сопротивление персонала, связанное с психологическими барьерами и низкой мотивацией [3]. Второй весомой причиной является недостаточное осознание основных преимуществ БП руководством предприятий [4], что препятствует созданию подходящих организационных условий и развитию организационной культуры. К третьей причине следует отнести отсутствие адаптируемого плана внедрения концепции БП, учитывающего особенности и потребности конкретного предприятия [5]. Как отмечал Сенге: «Нет универсального правила определения, каковы же должны быть минимальные изменения, которые приведут к максимальному улучшению системы» [6]. Применение единого плана внедрения концепции БП повышает риск управленческой ошибки первого рода – излишнее вмешательство, то есть ненужные изменения в системе, которые снижают качество её работы. Заимствование успешного опыта крупных компаний без учета уровня организационного развития предприятия приводит к нарушению общей системы знаний, хаотичности внедряемых инструментов БП, к лишним затратам и низкой результативности.

По мнению авторов, именно недостаточное внимание к вопросу адаптации плана внедрения в соответствии с уровнем организационного развития предприятия и является первопричиной снижения эффективности реализации концепции БП на предприятиях металлоконструкций.

В связи с этим разработка научно-методического подхода к планированию мероприятий и поддержанию системы БП в работоспособном состоянии с учетом уровня развития предприятия приобретает особую актуальность.

Материалы и методы исследования

Основные требования к системе менеджмента бережливого производства (СМБП) регламентирует ГОСТ Р 56404-2021 [7]. По аналогии с другими системами менеджмента модель СМБП базируется на цикле PDCA (цикл Деминга - Шухарта). В классической интерпретации цикл PDCA включает четыре основных этапа: «Plan-Do-Check-Act» — планирование-действие-проверка-корректировка [8]. Этап «проверка» направлен на сравнение качественных показателей на соответствие стандартным требованиям, установленным на этапе «планирование». По результатам этапа «проверка» проводят корректировку ранее разработанного плана, и цикл запускается заново. Таким образом, разработка и проведение изменений, реальная деятельность и ее анализ осуществляется в едином цикле, поэтому достаточно трудно понять: чем определяются достигаемые результаты [9]. Положительный эффект от внедрения инструментов

БП может быть вызван недостатками стандартов, отрицательной неэффективностью методов для конкретно взятого предприятия или недостатками их внедрения на этапе «действие».

Существует и другая модель, предложенная Демингом, – цикл PDSA. По аналогии с циклом PDCA, цикл PDSA содержит четыре элемента: «Plan-Do-Study-Act» — планирование-действие-изучение-корректировка. Элемент «изучение» в цикле PDSA направлен на изучении результатов и определение их успешности.

Использование данной модели при внедрении СМБП позволило бы уменьшить неопределенность достигнутых результатов, но отсутствие в ней этапа «проверка» и возможности сравнения полученных результатов со стандартом может снизить оперативность дальнейших усовершенствований. Следует понимать, что оценка разрыва между фактическим с запланированным результатом является эффективным средством для понимания срочности внесения изменений.

Таким образом, при освоении концепции БП существует необходимость совместного применения этапов «обучение» и «проверка». Пояснить причины, почему сравнение со стандартом необходимо при постоянном развитии и обучении системы, позволяет теория глубинных знаний Э. Деминга [10].

Э. Деминг выделил четыре компонента, отметив, что их нельзя рассматривать изолированно [6]:

1) понимание системы (ПС) – понимание всего процесса, в который вовлечены поставщики, производители и потребители, законов их взаимодействия, ограничений системы, условий перехода системы в устойчивое состояние, так как именно устойчивое состояние определяет выходной результат системы, а не ее отдельные элементы [11];

2) понимание теории вариабельности (ПТВ) – понимание связи теории вариабельности со статистической теорией, общих и специальных причин вариабельности и т.д.;

3) понимание основ теории познания (ПОТП) – понимание концепций, объясняющих знания, и пределов того, что может быть познано;

4) знание психологии (ЗП) – понимание феномена человеческой личности, внутренней мотивации для развития у сотрудников желания к обучению и получению нового знания.

Обеспечение баланса между компонентами при реализации проектов по внедрению СМБП является основной задачей управления, решение которой требует разработки нового подхода.

На данный момент при освоении СМБП используют классический или гибкий подход к управлению.

Классический подход предполагает строгое планирование, ограниченное по срокам, ресурсам, бюджетам и конечному описанию проекта. Он дает возможность контроля, но не позволяет внести изменения в проект и провести анализ его успешности в пе-

риод реализации. Отсутствие гибкости подхода в случае возникновения неучтенных при планировании проблем приводит к дополнительным потерям времени и материальных ресурсов на корректирующие мероприятия после «проверки». Рассмотрение классического подхода в призме теории глубинных знаний Э. Деминга позволяет предположить, что компонент «понимание теории познания» в системе управления либо слабо выражен, либо отсутствует.

Гибкий подход – это работа в условиях высокого уровня неопределенности конечного результата. В нем отсутствуют регламентируемые критерии оценки, нет фиксированного бюджета и ресурсов, присутствует возможность свободы принятия решений и внесения изменений на любой стадии проекта. Данный подход в управлении проектами создает благоприятные условия для внедрения инноваций [12]. Но система, созданная в результате внедрения инноваций, постепенно деградирует, если не прилагать усилий к ее поддержанию и совершенствованию [13]. Отсутствующий компонент «понимание системы» и стандартизованных требований к качеству результатов при гибком подходе не позволяет обеспечить устойчивое состояние системы и ритмичность ее совершенствования.

По мнению авторов, альтернативным вариантом, позволяющим обеспечить гибкость и строгую структуру, устойчивость и обучаемость системы, является гибридный подход к управлению, основанный на теории глубинных знаний Э. Деминга (рис. 1).



Рис. 1. Гибридная модель управления при внедрении системы бережливого производства

Fig. 1. Hybrid management model for implementing a lean manufacturing system

Разработанная авторами гибридная модель включает двухконтурный цикл управления (циклы PDSA и PDCA) и трехконтурный цикл обучения (K1-K2-K3). Процесс планирования начинается с этапа анализа целей организации, осваивающих СМБП. В соответствии с целями и уровнем развития организации формируется номенклатура методов БП и мероприя-

тий по их внедрению. Подбор методов осуществляется с учетом потребности организации в сочетании четырех компонентов теории глубинных знаний Э. Деминга (понимание системы, теории вариабельности, основ теории познания и знание психологии), которые позволят в требуемых условиях обеспечить устойчивость и эффективность системы. Интеграция в цикл PDSA трёхконтурного цикла обучения (K1-K2-K3) направлена на корректное прогнозирование достижимости целей организации до внедрения методов БП и перепроектирования производства. Каждый из контуров цикла K1-K2-K3, используя обратную связь, позволяет сделать обращение к предыдущему этапу и ответить на один из вопросов, касающихся сосредоточенности предприятия на том, что необходимо улучшить (табл. 1). Полученный массив знаний позволит дополнительно обосновать принимаемые управленческие решения по выбору конкретного пути улучшения на следующей стадии цикла и приступить к осознанному внедрению СМБП в рамках цикла PDCA.

Следующий цикл модели – цикл PDCA позволяет внедрить систему БП, проверить ее эффективность в реальных условиях и перейти к устойчивой модели построенного совершенствования. На этапе «проверки», с учетом уже сформированного массива знаний, модель снова обращается к трехконтурной системе обучения (K1-K2-K3), которая, так же как на предыдущем цикле, направлена на изучение и анализ содержания процесса, системы и стратегической концепции предприятия в целом.

Интеграция в гибридную модель трехконтурного цикла обучения (K1-K2-K3) позволяет создать платформу для «обучающегося предприятия». Под термином «обучающееся предприятие» следует понимать предприятие, в котором люди постоянно расширяют возможности улучшения результатов и возвращаются новые широкомасштабные способы мышления.

Следует помнить, что эффективность любых усовершенствований ограничена уровнем развития организации. В момент перехода организации в состояние «плато», когда вложения в улучшение системы уже не дают ожидаемый эффект, задачей руководителя является обеспечить переход на новый уровень развития. В данном случае уже сформированная в организации система глубоких знаний позволит пересмотреть стратегические цели организации и перейти на новый цикл гибридной модели управления в рамках нового уровня её развития.

Реализация предложенной модели требует разработки соответствующего инструментария, который позволит произвести оценку уровня развития предприятия и, в соответствии с полученным результатом и целями организации, обеспечить баланс между компонентами теории углубленных знаний и сформировать номенклатуру методов БП для запуска цикла PDSA.

Существуют различные классификации уровней развития организации [14]. По мнению авторов, для решения задач в рамках предложенной гибридной модели в наибольшей степени подойдет классификация

на основе теории интегральной психологии с использованием цветового кода организационных моделей Ф. Лалу [15]. Для общего понимания аспектов предлагаемой классификации краткая характеристика моделей организации [16] представлена в табл. 2.

В табл. 2 наряду с качественным описанием приведены нормированные значения весовости (приоритетности) компонентов теории углубленных знаний для обеспечения устойчивого и эффективного функционирования организации соответствующего типа.

Оранжевые организации, работающие благодаря четко выстроенным устойчивым процессам, нуждаются в более детальном понимании теории переменности. Компонент «понимание теории переменности» для таких предприятий имеет наибольший приоритет ($m_{\text{ПТВ}} = 0,430$). Так как основными задачами оранжевых организаций является оценка экономической эффективности и конкурентоспособности, следующее место по приоритетности занимает компонент «понимание системы» ($m_{\text{ПС}} = 0,283$).

Зеленые организации ориентированы на продвижение духовных ценностей, для них приоритеты

между сотрудниками, поставщиками, клиентами и обществом в целом распределяются равномерно. Руководители зеленых организаций считают, что решение, принятое с учетом позиции всех заинтересованных сторон, может обойтись дороже, но в долгосрочной перспективе отдача от него больше [15]. В таких организациях несущественно, но преобладает компонент «знание психологии» ($m_{\text{ЗП}} = 0,295$), приоритетность остальных компонентов распределяется практически равномерно.

Бирюзовые организации, стремящиеся к постоянному совершенствованию и гармонии, основной задачей видят поиск путей лучшего взаимодействия как внутри организации (между сотрудниками), так и с субъектами внешнего окружения (конкурентами и партнерами), выявление передового опыта и распространение неформализованных знаний [16]. Заложенные в основу бирюзовых организаций принципы позволяют говорить о равнозначности их потребности в каждом компоненте теории Э. Деминга ($m_{\text{ПС}} = m_{\text{ПТВ}} = m_{\text{ПОТП}} = m_{\text{ЗП}} = 0,250$).

Таблица 1. Декомпозиция модели обучения с тремя циклами
Table 1. Decomposition of the learning model with three cycles

Обозначение	Название	Цель	Вопрос	Исполнители
K1	Одноконтурное обучение	Решение проблемы на уровне выполнения задачи	Правильно ли выбраны мероприятия по внедрению и освоению методов БП?	Исполнители на местах
K2	Двухконтурное обучение	Решение проблемы на уровне выполнения процесса	Правильно ли выбраны методы БП?	Руководители среднего звена
K3	Трехконтурное обучение	Решение проблемы на уровне стратегических целей организации	Как было принято решение, что поставленные цели и задачи правильные?	Руководители высшего звена

Таблица 2. Классификационные признаки уровня развития организации по цветовому коду
Table 2. Classification criteria of the organization's level of development by color code

Цветовой код типа организации	Краткая характеристика предприятия	Нормированные значения весовости компонентов теории углубленных знаний*
Оранжевый	Базовые принципы: новаторство, ответственность, меритократия Менеджмент: управление по целям, стратегия HR-менеджмент, KPI и BSC Стратегия: разрабатывается высшим руководством Принятие решений: централизованное Организационная структура: иерархическая	$m_{\text{ПС}} = 0,283$; $m_{\text{ПТВ}} = 0,430$; $m_{\text{ПОТП}} = 0,088$; $m_{\text{ЗП}} = 0,200$
Зеленый	Базовые принципы: расширение полномочий, организационная культура, увеличение числа заинтересованных лиц Менеджмент: HR-менеджмент, социальная ответственность Стратегия: следует из ценностей Принятие решений: децентрализованное Организационная структура: адаптивная	$m_{\text{ПС}} = 0,248$; $m_{\text{ПТВ}} = 0,209$; $m_{\text{ПОТП}} = 0,248$; $m_{\text{ЗП}} = 0,295$
Бирюзовый	Базовые принципы: эволюция, самоуправление, целостность личности Менеджмент: коучинг, взаимодействие равноправных коллег Стратегия: формируется командами Принятие решений: децентрализованное Организационная структура: адаптивная	$m_{\text{ПС}} = 0,250$; $m_{\text{ПТВ}} = 0,250$; $m_{\text{ПОТП}} = 0,250$; $m_{\text{ЗП}} = 0,250$

* $m_{\text{ПС}}$ – весовость компонента «понимание системы»; $m_{\text{ПТВ}}$ – весовость компонента «понимание теории переменности»; $m_{\text{ПОТП}}$ – весовость компонента «понимание основ теории познания»; $m_{\text{ЗП}}$ – весовость компонента «знание психологии».

Весовая значимость компонентов теории углубленных знаний ($m_{(ПС)}$, $m_{(ПТВ)}$, $m_{(ПОТП)}$, $m_{(ЗП)}$) была определена путем использования экспертного метода попарных сравнений, который находит широкое применение в различных научно-технических задачах [17].

Формирование представления о приоритетности компонентов теории углубленных знаний Э. Деминга в различных типах организаций позволит расставить правильные акценты при выборе номенклатуры методов БП и определить рациональную последовательность их внедрения.

Существует более 20-ти методов БП, направленных на различные аспекты улучшения деятельности организации: качество процессов, продукции и услуг, их стоимость и время выполнения, безопасность [18]. Целесообразность применения того или иного метода определяется поставленными целями и, как следует из предложенной гибридной модели (см. рис. 1), уровнем развития организации.

Произвести взаимоувязку целей, уровня развития организации и номенклатуры возможных сочетаний методов позволяет разработанная матрица приоритетов (табл. 3).

При разработке матрицы (см. табл. 3) был проведен анализ 22-х методов и групп методов БП на предмет их принадлежности к одному из компонентов теории углубленных знаний Э. Деминга и степени

их влияния на достижение целей в области: качество, стоимость, время, безопасность.

В центральной части матрицы (см. табл. 3) представлена балльная оценка влияния метода (группы методов) на достижение основных целей по 3-балльной шкале: 9 – сильное влияние, 3 – среднее влияние и 1 – слабое влияние. При построении центральной части матрицы учтены рекомендации ГОСТ Р 56407 – 2023 [19], которые дополнены нерассмотренными в стандарте методами.

Рассчитать приоритетность методов БП (P_n) позволяет формула

$$P_n = m_i \cdot \sum_1^j B_j \cdot b_j, \quad (1)$$

где m_i – нормированные значения весомости компонентов теории углубленных знаний Э. Деминга, зависящие от уровня развития организации; B_j – балльная оценка влияния метода на достижения целей; b_j – нормированные значения весомости целей для конкретной организации, полученные методом попарного сопоставления [20].

Оценка приоритетности методов БП при планировании и освоении СМБП позволит организациям не только избавиться от потерь, но и «принять» концепцию в рамках собственной организационной культуры с расчетом на долгосрочную эффективность системы.

Таблица 3. Матрица приоритетов методов бережливого производства

Table 3. Matrix of priorities of lean manufacturing methods

Компоненты теории углубленных знаний	Нормированные значения весомости компонентов m_i	i	Название метода (группы методов)	Балльная оценка влияния метода на достижения целей в области B_j			
				Качество B_K	Стоимость B_C	Время B_B	Безопасность $B_Б$
Понимание системы	$m_{(ПС)}$	1	Производственный анализ	3	3	9	3
		2	VSM	9	3	9	1
		3	Kanban	1	3	9	1
		4	QFD	3	3	1	1
		5	Визуализация	9	1	3	9
		6	5S	9	1	3	9
Понимание теории вариативности	$m_{(ПТВ)}$	7	TQM	9	3	1	1
		8	Статистические методы контроля	9	3	3	1
		9	JIT	1	3	9	3
		10	SMED	3	3	9	3
		11	OEE	1	9	9	3
		12	TPM	9	3	3	3
		13	Визуальный контроль	3	1	3	3
		14	6 sigma	9	3	3	3
Понимание основ теории познания	$m_{(ПОТП)}$	15	TWI	3	1	3	3
		16	Коучинг	3	1	3	3
		17	Штурм-прорыв	9	3	3	1
		18	5W	9	3	3	3
		19	Инструменты анализа и решения проблем	3	3	3	3
Знание психологии	$m_{(ЗП)}$	20	Кайдзен	9	3	3	3
		21	KPI	1	1	3	3
		22	Публичное поощрение	1	1	3	3
Нормированные значения весомости целей b_i				$b(K)$	$b(C)$	$b(B)$	$b(Б)$

Полученные результаты и их обсуждение

Разработанный подход был использован для анализа причин снижения эффективности методов БП на предприятии Тульской области по производству металлоконструкций после завершения работ в рамках национального проекта «Производительность труда и поддержка занятости». В рамках программы на предприятии были параллельно внедрены шесть методов БП: 5S (система организации и рационализации рабочих мест), производственный анализ, VSM (карта потока создания ценности), OEE (общая эффективность оборудования), SMED (быстрая переналадка оборудования). Внедрение методов позволило повысить производительность предприятия за первый год на 10%. В соответствии с разработанным планом к третьему году участия в национальном проекте ожидаемая производительность должна была соответствовать 30%, но фактически предприятие не смогло преодолеть предел 18%, что существенно снизило мотивацию не только сотрудников, но и руководства, в части дальнейшего развития СМБП.

Для выявления причин был проведен анализ внедренной номенклатуры методов на предмет сбалансированности компонентов теории глубинных знаний Э. Деминга. Первичная диагностика позволила определить, что при подборе методов в рамках проекта в номенклатуру не были включены методы, направленные на понимание психологии внутренней мотивации сотрудников и основ теории познания (см. табл. 3).

Для корректировки номенклатуры методов была проведена оценка уровня развития рассматриваемого предприятия. В соответствии с классификационными характеристиками (см. табл. 2) предприятие было отнесено к типу оранжевой организации. Это позволило принять в качестве исходных данных нормированные значения весомости компонентов теории углубленных знаний, представленные в табл. 2.

Совместно с руководством предприятия была проведена экспертная оценка весомости целей организации в рамках утвержденной стратегии развития. Нормированные значения весомости целей были зафиксированы в матрице приоритетов, форма матрицы соответствовала табл. 3. Весомость достижения целей в области повышения качества соответствовала значению $b(K) = 0,409$, снижения стоимости $b(C) = 0,137$, снижения времени $b(B) = 0,409$, повышения безопасности $b(B) = 0,045$.

По формуле (1) была проведена количественная оценка приоритетности методов P_m , что позволило произвести их ранжирование. Результаты ранжирования методов по приоритетности представлены в виде столбчатой диаграммы (рис. 2).

В подгруппу методов, направленных на понимание системы, вошли методы: VSM ($P_{VSM} = 2,212$) – первый приоритет; производственный анализ ($P_{ПА} = 1,54$) – второй приоритет; визуализация ($P_B = 1,534$) – третий приоритет.

В подгруппу методов, направленных на понимание теории вариабельности, вошли методы: OEE ($P_{OEE} = 1,54$) – первый приоритет; 6 sigma ($P_{6\sigma} = 2,341$) – второй приоритет; SMED и TPM ($P_{SMED} = P_{TPM} = 2,34$) – третий приоритет.

В группу методов, направленных на понимание основ теории познания, вошли: 5W ($P_{5W} = 0,479$) – первый приоритет; Штурм-прорыв ($P_{ШП} = 0,472$) – второй приоритет; инструменты анализа и решения проблем ($P_{ИАРП} = 0,264$) – третий приоритет.

В группу методов, направленных на знание психологии, вошли: Кайдзен ($P_{5W} = 0,479$) – первый приоритет; KPI ($P_{KPI} = 0,38$) и публичное поощрение ($P_{П} = 0,38$), равные по значимости, разделили второй и третий приоритеты.

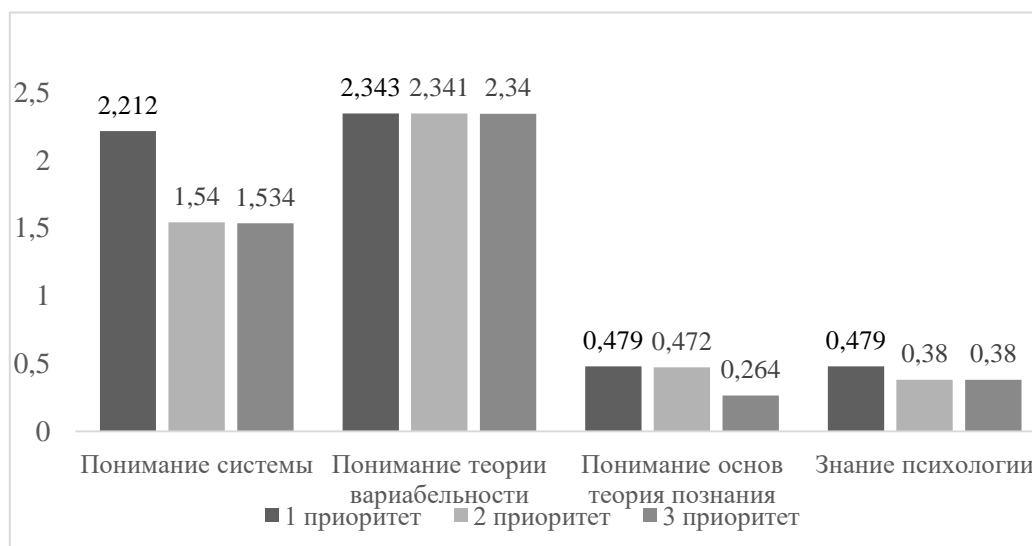


Рис. 2. Столбчатая диаграмма приоритетности методов бережливого производства

Fig. 2. Bar chart of the priority of lean production methods

В соответствии с полученными результатами по первому приоритету в базовую номенклатуру методов БП вошли методы: ОЕЕ (общая эффективность оборудования); VSM (карта потока создания ценности); 5W (сегментация); Кайдзен (непрерывное совершенствование процессов). Учитывая, что часть методов уже были внедрены на предприятии в рамках национального проекта «Производительность труда и поддержка занятости», руководством предприятия после прохождения трехконтурной системы обучения (К1-К2-К3) (см. **табл. 1**) было принято решение внедрить метод сегментации (5W) и ввести в практику предприятия КРІ. Замена метода первого приоритета (Кайдзен) в сегменте «знания психологии» на метод второго приоритета – КРІ (см. **табл. 4**) обосновано высокой материальной мотивацией исполнителей на местах, свойственной данной организации.

По предварительным прогнозам внедрение указанных методов позволит повысить эффективность производства до 20% и достичь двукратного повышения эффективности через два года.

Заключение

Ричард Фуллер отмечал: «Нельзя ничего изменить, сражаясь с существующей реальностью. Чтобы что-то изменить, создай новую модель, которая сделает существующую безнадежно устаревшей» [15].

По мнению авторов, предложенная гибридная модель управления процессами при внедрении СМБП является одним из вариантов новой модели. Двухконтурный цикл управления с возможностью выхода из цикла постоянного совершенствования на новый уровень развития организации позволит быстро адаптироваться в условиях существующей реальности. Трехконтурная система обучения, заложенная в модель, позволит снизить риски при принятии управленческих решений и создать платформу для развития «обучающегося предприятия». Фундаментальные основы теории глубинных знаний Э. Деминга, составляющие ядро предлагаемой модели и учитываемые при разработке инструментария для ее реализации, обеспечивают сбалансированность необходимых для устойчивого развития предприятия компонентов: понимание системы, понимание теории вариативности, понимание основ теории познания и знание психологии.

Список источников

- Денисова Я.В., Петрова А.С., Сопин В.Ф. Оптимизация производственного процесса путем внедрения методов бережливого производства // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. 84(2). С. 315-323.
- Паспорт национального проекта (программы) «Производительность труда и поддержка занятости» (утв. президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол от 24.12.2018 № 16) // СПК «КонсультантПлюс».
- Удальцова Н. Л. Практика и проблемы применения концепции бережливого производства в российских компаниях // Экономика, предпринимательство и право. 2023. Т. 13, № 12. С. 5383-5396.
- Плахотникова Е.В., Васин С.А. Проблемы реализации принципов бережливого производства при организации потока создания ценности технических систем // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2017. №2. С. 29-32.
- Бельш К. Комплексный подход к внедрению и оценке эффективности проектов по бережливому производству на промышленном предприятии // Вопросы инновационной экономики. 2018. Т. 8, № 3. С. 513-530.
- Лоуренс Лич. Вовремя и в рамках бюджета: управление проектами по методу критической цепи: пер. с англ. М.: Альпина Паблишерз, 2010. 354 с.
- ГОСТ Р 56404-2021. Бережливое производство. Требования к системам менеджмента. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 20 с.
- Модернизация сетцентрической концепции в обогащенном производстве / Лончих П.А., Федотова А.В., Головина Е.Ю., Лончих Н.П., Евлоева М.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 152-162.
- Жемчугов А.М., Жемчугов М.К. Цикл PDCA Деминга. Современное развитие // Проблемы экономики и менеджмента. 2016. №2 (54). С. 3-28.
- Гореликов А.А. Обоснованная теория глубоких знаний: целенаправленный переход от контроля к прогнозированию // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 12. С. 466-469.
- Михайлова Н.В., Фёдорова Л.А. Концепции У.Э. Деминга — «Опорные точки» современной системы Всеобщего управления на основе качества // Век качества. 2012. № 5–6. С. 33–37.
- Иванова Т.Н., Иванов Д.В. Классический и гибкие подходы к управлению проектами // Бюллетень науки и практики. 2019. № 10. С. 168-175.
- Имаи М. Кайдзен: ключ к успеху японских компаний. М.: Альпина Бизнес Букс, 2004. 274 с.
- Сафронова К.О., Цвиркунов Д.И. Исследование уровня зрелости предприятий в применении бережливого производства // Вестник Московского университета. Серия 6: Экономика. 2020. № 2. С. 106–122.
- Лалу Ф. Открывая организации будущего: пер. с англ. Москва: Манн, Иванов и Фербер, 2016. 524 с.
- Фомченкова Л.В. Трансформация задач стратегического анализа в условиях организационного развития // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 4-1 (46). С. 127-129.
- Гореликов А.А., Плахотникова Е.В. Определение рейтинга важности технических характеристик в процессе построения «Дома качества» // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 3. С. 209-212.
- Штанько А.В. 25 инструментов бережливого производства. СПб., 2021. 31 с.
- ГОСТ Р 56407-2023. Бережливое производство. Основные инструменты и методы их применения. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 12 с.
- Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети: пер. с англ. / науч. ред. Андрейченков А.В., Андрейченкова О.Н. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 360 с.

References

1. Denisova Y.V., Petrova A.S., Sopin V.F. Optimization of the production process through the introduction of lean manufacturing methods. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* [Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2022;84(2):315-323. (In Russ.)
2. Passport of the national project (program) "Labor Productivity and Employment Support" (approved by the Presidium of the Presidential Council for Strategic Development and National Projects, Protocol No. 16 dated December 24, 2018). *SPK «KonsultantPlus»* [Computer-based legal research system ConsultantPlus]. (In Russ.)
3. Udaltsova N.L. Practice and problems of applying the concept of lean manufacturing in Russian companies. *Ekonomika, predprinimatelstvo i pravo* [Journal of Economics, Entrepreneurship and Law], 2023;13(12):5383-5396. (In Russ.)
4. Plakhotnikova E.V., Vasin S.A. Problems of implementing the principles of lean manufacturing in the organization of the value stream of technical systems. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa* [Equipment and technologies for the oil and gas complex], 2017;(2):29-32. (In Russ.)
5. Belysh K. Multipurpose approach to implementation and evaluation of the efficiency of the projects on lean manufacturing in industrial enterprises. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki* [Russian Journal of Innovation Economics], 2018;8(3):513-530. (In Russ.)
6. Lawrence Leach. *Vovremya i v ramkah byudzheta: upravlenie proektami po metodu kriticheskoy tsepi* [On time and within budget: project management using the critical chain method]. Moscow: Alpina Publishers, 2010, 354 p. (In Russ.)
7. State standard GOST R 56404-2021. Lean manufacturing. Requirements for management systems. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2022. 20 p. (In Russ.)
8. Lontsikh P.A., Fedotova A.V., Golovina E.Yu., Lontsikh N.P., Evloeva M.V. Improving the network-centric concept in enrichment production. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2024;22(4):152-162. (In Russ.)
9. Zhemchugov A.M., Zhemchugov M.K. The Deming PDCA cycle. Modern development. *Problemy ekonomiki i menedzhmenta* [Problems of Economics and Management], 2016;(2(54)):3-28 (In Russ.)
10. Gorelikov A.A. Grounded theory of profound knowledge: purposeful transition from control to forecasting. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences], 2024;(12):466-469. (In Russ.)
11. Mikhailova N.V., Fedorova L.A. The concepts of W.E. Deming — the "Reference points" of the modern quality-based Universal management system. *Vek kachestva* [The age of quality], 2012;(5-6):33-37. (In Russ.)
12. Ivanova T.N., Ivanov D.V. Classical and flexible approaches to project management. *Byulleten nauki i praktiki* [Bulletin of Science and Practice], 2019;(10):168-175. (In Russ.)
13. Imai M. *Kaidzen: klyuch k uspekhu yaponskih kompaniy* [Kaizen: the key to the success of Japanese companies]. Moscow: Alpina Business Books, 2004, 274 p. (In Russ.)
14. Safronova K.O., Tsvirkunov D.I. Research of the maturity level of enterprises in the application of lean production. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 6: Ekonomika* [Bulletin of the Moscow University. Series 6: Economics], 2020;(2):106-122. (In Russ.)
15. Lalu F. *Otkryvaya organizatsii budushchego* [Discovering the organizations of the future]. Moscow: Mann, Ivanov and Ferber, 2016, 524 p. (In Russ.)
16. Fomchenkova, L. V. Transformation of strategic analysis tasks in the context of organizational development. *Mezhdunarodniy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Scientific Research Journal], 2016;(4-1(46)):127-129. (In Russ.)
17. Gorelikov A.A., Plakhotnikova E.V. Determining the rating of the importance of technical characteristics in the process of building a "Quality house". *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences], 2023;(3):209-212. (In Russ.)
18. Shtanko A.V. *25 instrumentov berezhlivogo proizvodstva* [25 lean manufacturing tools]. St. Petersburg, 2021, 31 p.
19. State standard GOST R 56407-2023 Lean manufacturing. Basic tools and methods of their application. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2023, 12 p. (In Russ.)
20. Saati T.L., Andreichenkov A.V., Andreichenkova O.N. *Prinyatie resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyah: analiticheskie seti* [Decision-making with dependencies and feedbacks: analytical networks]. Moscow: LKI Publishing House, 2008, 360 p. (In Russ.)

Поступила 02.02.2025; принята к публикации 13.02.2025; опубликована 28.03.2025
Submitted 02/02/2025; revised 13/02/2025; published 28/03/2025

Гореликов Александр Анатольевич – аспирант,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
E-mail: faibolung@yandex.ru. ORCID 0009-0000-4627-6158

Плахотникова Елена Владимировна – доктор технических наук, доцент,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
E-mail: e_plakhotnikova@mail.ru, ORCID 0000-0001-8440-2207

Alexander A. Gorelikov – Postgraduate Student,
Tula State University, Tula, Russia.
E-mail: faibolung@yandex.ru. ORCID 0009-0000-4627-6158

Elena V. Plakhotnikova – DrSc (Eng.), Associate Professor,
Tula State University, Tula, Russia.
E-mail: faibolung@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8440-2207



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.5
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-119-126

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА УСЛУГ В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Мусабиров Л.А.^{1,2}, Галимов Ф.М.², Шабалина О.К.^{1,2}

¹ ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», Казань, Россия

² Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия

Аннотация. Актуальность работы. Оценка качества оказания услуг позволяет совершенствовать деятельность организации, выявлять потребности заинтересованных сторон, возможности для улучшения и разработки мероприятий, направленных на повышение качества оказанных услуг. Обеспечение высокого качества оказания услуг в области обеспечения единства измерений играет ключевую роль в различных отраслях, включая промышленность, науку, здравоохранение, строительство, жилищное и коммунальное хозяйство и др., однако методология оценки качества услуг в данной области остается слабоизученной. **Цель работы.** Разработка проекта методики, позволяющей проводить мониторинг и количественную оценку показателей качества услуг в области обеспечения единства измерений, таких как поверка и калибровка средств измерений. **Используемые методы.** Статья содержит описание метода, учитывающего различные показатели для проведения оценки качества услуг. **Новизна.** Особенность предложенного метода заключается в возможности его применения в метрологических организациях, выполняющих работы по поверке и калибровке средств измерений. **Результат.** В работе описана методика, основанная на анализе современных методов оценки и результатах практического применения методов оценки качества услуг. Разработанная методика позволит повысить точность оценки качества услуг, что, в свою очередь, позволит улучшить процесс оказания услуг, а также повысить доверие к результатам измерений. Авторами предложены практические рекомендации по внедрению и использованию данного метода. **Практическая значимость.** Использование предложенного метода в качестве основы для разработки документа, описывающего порядок мониторинга, и количественной оценки качества услуг и их улучшения.

Ключевые слова: качество, обеспечение единства измерений, разработка методики оценки качества, система менеджмента качества, удовлетворенность потребителей

© Мусабиров Л.А., Галимов Ф.М., Шабалина О.К., 2025

Для цитирования

Мусабиров Л.А., Галимов Ф.М., Шабалина О.К. Разработка методики мониторинга и оценки качества услуг в области обеспечения единства измерений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 119-126. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-119-126>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY FOR MONITORING AND ASSESSING THE QUALITY OF SERVICES IN THE FIELD OF ENSURING UNIFORMITY OF MEASUREMENTS

Musabirova L.A.^{1,2}, Galimov F.M.², Shabalina O.K.^{1,2}

¹ Affiliated Branch of the D.I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology, Kazan, Russia

² Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, Kazan, Russia

Abstract. Relevance. Assessing the service quality allows to improve the organization's activities, identify the needs of stakeholders and opportunities for improvement, and also develop measures aimed at improving the service quality. Ensuring high quality of services in the field of ensuring uniformity of measurements plays a key role in various industries, including production, science, healthcare, construction, housing and public utilities, etc., however, the methodology for the service quality assessment in this area remains poorly studied. **Objectives.** It is required to develop a draft methodology that allows for monitoring and quantitative assessment of services quality indicators in the field of ensuring uniformity of measurements, such as verification and calibration of measuring instruments. **Methods Applied.** The article contains a description of a method that takes into account various indicators for assessing the service quality. **Originality.** The peculiarity of the proposed method lies in the possibility of its application in metrological organizations performing verification and calibration of measuring instruments. **Result.** The paper describes a methodology based on the analysis of modern assessment methods and the results of the practical application of methods for service quality assessment. The developed methodology will improve the accuracy of assessing the services quality, which in turn will improve the process of providing services, as well as increase confidence in the measurement results. The authors offer practical recommendations for the implementation and usage of this method. **Practical Relevance.** It is of practical importance to use the proposed method as a basis for developing a document describing the procedure for monitoring and quantitative assessment of the service quality and their improvement

Keywords: quality, ensuring uniformity of measurements, development of quality assessment methodology, quality management system, customer satisfaction

For citation

Musabirova L.A., Galimov F.M., Shabalina O.K. Development of the Methodology for Monitoring and Assessing the Quality of Services in the Field of Ensuring Uniformity of Measurements. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 119-126. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-119-126>

Введение

В настоящее время конкурентоспособность организации во многом определяется качеством продукции (услуг). Вопрос измерения качества продукции рассматривает квалиметрия. Термин «квалиметрия» начиная с 1972 года является стандартизованным. Стандарт [1] содержит определения основных понятий в области управления качеством продукции. Таким образом, существующее определение термина «квалиметрия» в рамках данного стандарта распространяется на измерение качества продукции, в то время как вопрос измерения качества услуг является не менее важным. По состоянию на 2024 год в системе поиска «Яндекс» было введено более 100000 запросов по данной теме за год.

Вопрос выбора метода оценки качества услуг в области обеспечения единства измерений (ОЕИ) [2] в последние годы становится все более востребован и требует всестороннего исследования. Основной проблемой оценки качества услуг является выбор и определение значений показателей качества, поскольку они не всегда могут быть выражены в кон-

кретных единицах измерения, также оценка качества услуг чаще всего зависит от мнения потребителей, поскольку применяются субъективные методы оценки, однако стоит учитывать, что качество услуг определяется множеством факторов, а выбранные методы оценки качества услуг могут охватывать только определенные показатели, что может привести к искажению информации. В качестве решения данной проблемы предлагается оценка выбранных показателей, косвенно определяющих качество услуг.

В данной статье авторами представлен краткий обзор существующих методов оценки качества услуг, а также перечислены возможные сферы применения рассмотренных методов. По результатам анализа исследований в данной области описан проект методики, применение которого позволит повысить удовлетворенность заказчиков и качество услуг. Результаты исследования будут полезны как для организаций, оказывающих услуги в области ОЕИ, так и для исследователей, занимающихся разработкой методик оценки качества в различных сферах деятельности.

Состояние вопроса и постановка проблемы

В настоящий момент существуют различные методы оценки качества оказания услуг, среди которых наиболее широко распространенными являются следующие [3]:

1) метод «SERVQUAL» – основан на оценке и сравнении ожиданий и восприятия потребителей услуг по пяти критериям качества (надежность, эмпатия, уверенность, отзывчивость, материальность). Данный метод часто используется в различных сферах, таких как розничная торговля, образование, медицина, ресторанный и гостиничный бизнес и др.;

2) метод «SERVPERF» — это альтернативный подход к оценке качества услуг, который основан на оценке восприятия потребителем оказанных услуг, а не на оценке различий между ожиданиями и восприятием (как в «SERVQUAL»), данный метод широко используется в различных сферах, таких как строительство, розничная торговля, образование и др.;

3) метод критических случаев – заключается в анализе конкретных инцидентов (случаев), когда потребители ощущали особенно сильные положительные или отрицательные эмоции. Он направлен на выявление наиболее важных моментов взаимодействия между потребителями и поставщиками услуг, данный метод применяется для улучшения качества обслуживания путем выявления положительных или негативных случаев в процессе предоставления услуг, данный метод применяется в ресторанном, гостиничном бизнесе, розничной торговле и др.

При разработке метода важно учитывать требования нормативно-правовых актов, регламентирующих деятельность организации в области проведения оценки качества. Например, для организаций, аккредитованных на проведение работ в области ОЕИ, согласно [4], а именно на выполнение работ по калибровке средств измерений, необходимо соблюдение [5], для организаций, выполняющих поверку средств измерений, при разработке документированной информации системы менеджмента качества (СМК) [6] требуется соблюдение [7, 8].

По результатам эмпирического исследования применения метода «SERVQUAL» [9] были выявлены недостатки. Предлагаемый метод должен быть разработан с учетом различных факторов, которые могут оказать воздействие на качество, таких как, например, квалификация работников, применяемые эталоны, средства измерений и вспомогательное оборудование, человеческий фактор, условия, в которых проводятся работы и др. [10].

Анализ опыта применения существующих методов, описанный в исследованиях [11-13], показал, что применение данных методов не позволяет провести оценку в соответствии с требованиями нормативно-правовых актов и не предусматривает оценку в необходимом объеме, в связи с чем необходимо разработать проект методики, который будет содержать порядок проведения данной оценки.

Полученные результаты и их обсуждение

Разработанный метод предусматривает комплексную оценку показателей, которые характеризуют качество оказания услуг.

Для проведения мониторинга и оценки используются данные, полученные за отчетный период. Алгоритм мониторинга и оценки качества оказания услуг в области ОЕИ представлен на **рис. 1**.

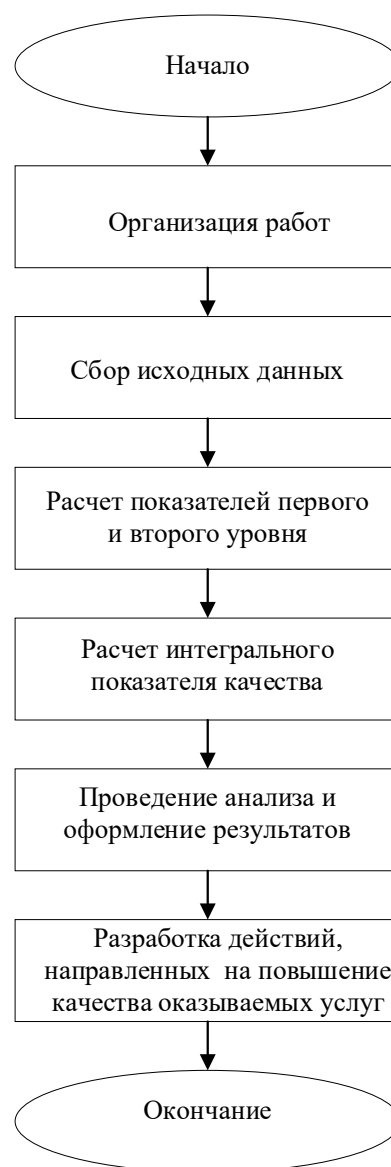


Рис. 1. Алгоритм мониторинга и оценки качества оказания услуг в области ОЕИ

Fig. 1. Algorithm for service quality in the field of EUM monitoring and assessment

Оценка качества работ в области ОЕИ производится по результатам мониторинга и сбора исходных данных, необходимых для расчета показателей, полученных за отчетный период.

Оценка качества услуг определяется как средневзвешенное значение показателей, указанных в **табл. 1**.

Таблица 1. Показатели первого уровня
Table 1. First level indicators

Номер показателя	Обозначение показателя	Содержание показателя	Коэффициент значимости k
1	P_1	Характеризует удовлетворенность заказчиков качеством услуг	1
2	P_2	Характеризует соответствие требованиям критериев аккредитации/ГОСТ ISO/IEC 17025, а также наличие соответствующей области аккредитации	1
3	P_3	Характеризует соблюдение требований методики, устанавливающей порядок выполнения работ в области ОЕИ (далее – методика)	1
4	P_4	Характеризует качество услуг, предоставляемых поставщиками	1

Величина показателя «Удовлетворенность заказчиков качеством услуг» P_1 рассчитывается на основе средневзвешенных значений показателей, указанных в табл. 2. Информация для расчета показателей второго уровня предоставляется руководителями структурных подразделений по окончании отчетного периода.

Таблица 2. Показатели второго уровня для расчета P_1
Table 2. Second level indicators for calculating P_1

Номер показателя	Обозначение показателя	Содержание показателя	Коэффициент значимости γ	Записи, необходимые для расчета
1	C_1	Количество претензий	1	Журнал учета претензий
2	C_2	Доля услуг, оказанных в отчетный период согласно условиям договора	1	Акты сдачи-приемки оказанных услуг
3	C_3	Доля положительных индикаторов качества, полученных по результатам проведения оценки качества методом «SERVQUAL»	1	Анкетные заказчиков

Расчет показателей второго уровня, приведенных в табл. 2.

Показатель C_1 вычисляют по формуле

$$C_1 = 1 - \frac{L_1}{N}, \quad (1)$$

где L_1 – количество претензий, поступивших в организацию за отчетный период; N – общее количество оказанных услуг в области ОЕИ.

Показатель C_2 вычисляют по формуле

$$C_2 = \frac{L_2}{L_3}, \quad (2)$$

где L_2 – количество актов сдачи-приемки оказанных услуг, выполненных в соответствии с условиями договора в установленные сроки; L_3 – общее количество актов сдачи-приемки оказанных услуг.

Показатель C_3 вычисляют по формуле

$$C_3 = \frac{L_4}{5}, \quad (3)$$

где L_4 – количество индикаторов качества по методу «SERVQUAL» с положительным значением.

Величина показателя первого уровня P_1 рассчитывается по формуле

$$P_1 = \frac{C_1 \cdot \gamma_1 + C_2 \cdot \gamma_2 + C_3 \cdot \gamma_3}{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3}, \quad (4)$$

где C_1, C_2, C_3 – значения показателей, рассчитанных по формулам (1)–(3); $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – коэффициенты значимости показателя (см. табл. 2).

Величина показателя «Соответствие требованиям критериев аккредитации/ГОСТ ISO/IEC 17025, а также наличие соответствующей области аккредитации» P_2 вычисляют по формуле

$$P_2 = 1 - \frac{R_1}{N}, \quad (5)$$

где R_1 – количество оказанных услуг в области ОЕИ, несоответствующих области аккредитации.

Для определения значения показателя «Соблюдение требований методики, устанавливающей порядок выполнения работ (оказания услуг в области ОЕИ)» P_3 вычисляют средневзвешенное значение показателей, приведенных в табл. 3.

Показатель S_1 вычисляют по формуле

$$S_1 = \frac{T_1}{N}, \quad (6)$$

где T_1 – количество услуг в области ОЕИ, выполненных в соответствии с условиями методики.

Таблица 3. Показатели второго уровня для расчета P_3
 Table 3. Second level indicators for calculating P_3

Номер показателя	Обозначение показателя	Содержание показателя	Коэффициент значимости λ	Записи, необходимые для расчета
1	S_1	Доля услуг в области ОЕИ, выполненных при соблюдении условий методики	1	Протоколы поверки/сертификаты калибровки, журналы учета условий
2	S_2	Доля услуг в области ОЕИ, выполненных с использованием оборудования, соответствующего требованиям методики	1	Протоколы поверки/сертификаты калибровки, журнал учета использования оборудования
3	S_3	Доля услуг в области ОЕИ, проведенных с соблюдением требований методики	1	Протоколы поверки, сертификаты калибровки
4	S_4	Доля персонала, прошедшего обучение и аттестацию согласно установленным требованиям	1	Удостоверения о повышении квалификации, личные карточки работников, план повышения квалификации персонала с отметкой о выполнении, протоколы аттестации работников
5	S_5	Доля услуг, при оформлении которых допущены опечатки или ошибки в расчетах	1	Протоколы поверки, сертификаты калибровки

Показатель S_2 вычисляют по формуле

$$S_2 = \frac{T_2}{N}, \quad (7)$$

где T_2 – количество услуг в области ОЕИ, оказанных с использованием оборудования, соответствующего требованиям методики.

Показатель S_3 вычисляют по формуле

$$S_3 = \frac{T_3}{N}, \quad (8)$$

где T_3 – количество услуг в области ОЕИ, проведенных с соблюдением требований методики.

Показатель S_4 вычисляют по формуле

$$S_4 = \frac{T_4}{T_5}, \quad (9)$$

где T_4 – количество персонала, прошедшего обучение и аттестацию согласно установленным требованиям; T_5 – общее количество персонала, участвующего в оказании услуг.

Показатель S_5 вычисляют по формуле

$$S_5 = 1 - \frac{T_6}{N}, \quad (10)$$

где T_6 – количество услуг в области ОЕИ, при оформлении которых допущены опечатки или ошибки в расчетах.

Величина показателя первого уровня P_3 рассчитывается по формуле

$$P_3 = \frac{S_1 \cdot \lambda_1 + S_2 \cdot \lambda_2 + S_3 \cdot \lambda_3 + S_4 \cdot \lambda_4 + S_5 \cdot \lambda_5}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5}, \quad (11)$$

где S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 – значения показателей, рассчитанных по формулам (6)–(10); $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ – коэффициенты значимости показателя (см. табл. 3).

Для определения величины показателя «Качество услуг, предоставляемых поставщиками» P_4 вычисляют средневзвешенное значение показателей, приведенных в табл. 4.

Таблица 4. Показатели второго уровня для расчета P_4
 Table 4. Second level indicators for calculating P_4

Номер показателя	Обозначение показателя	Содержание показателя	Коэффициент значимости показателя μ	Записи, необходимые для расчета
1	H_1	Доля поставщиков, имеющих документацию, подтверждающую соответствие установленным требованиям	1	Документация о закупках
2	H_2	Доля услуг, соответствующих условиям договора	1	Документация о закупках

Показатель H_1 вычисляют по формуле

$$H_1 = \frac{U_1}{U_2}, \quad (12)$$

где U_1 – количество поставщиков, предоставивших документацию, подтверждающую соответствие установленным требованиям; U_2 – общее количество поставщиков услуг.

Показатель H_2 вычисляют по формуле

$$H_2 = \frac{U_3}{U_4}, \quad (13)$$

где U_3 – количество услуг, оказанных согласно условиям договора; U_4 – общее количество полученных услуг в области ОЕИ.

Величина показателя первого уровня P_4 рассчитывается по формуле

$$P_4 = \frac{H_1 \cdot \mu_1 + H_2 \cdot \mu_2}{\mu_1 + \mu_2}, \quad (14)$$

где H_1 , H_2 – значения показателей, рассчитанных по формулам (12), (13); μ_1 , μ_2 – коэффициент значимости показателя (см. табл. 4).

Интегральный показатель качества оказания услуг в области ОЕИ рассчитывается по формуле

$$K = \frac{P_1 \cdot k_1 + P_2 \cdot k_2 + P_3 \cdot k_3 + P_4 \cdot k_4}{k_1 + k_2 + k_3 + k_4}, \quad (15)$$

где P_1 , P_2 , P_3 , P_4 – значения показателей первого уровня, рассчитанных по формулам (4), (5), (11), (14); k_1 , k_2 , k_3 , k_4 – коэффициент значимости показателя (см. табл. 1).

Структурное подразделение, назначенное ответственным за оценку качества, вычисляет показатели первого уровня, приведенные в табл. 1, и делает расчет интегрального показателя качества, полученного на основе расчета показателей первого и второго уровня. По результатам количественной оценки качества услуг проводится анализ полученных значений и оформляется отчет по оценке качества оказываемых услуг за отчетный период. Критерии оценки, коэффициенты значимости показателей и целевое значение интегрального показателя устанавливаются организацией самостоятельно.

В общем виде в отчет рекомендуется включать такие разделы, как «Введение», «Результаты оценки качества услуг», «Выводы и рекомендации».

Раздел «Введение» может включать основание, цель и сроки проведения оценки.

В разделе «Результаты оценки качества услуг» приводятся результаты расчета показателей качества услуг и приводится сравнительный анализ результатов оценки качества по сравнению с предыдущими периодами, а также сравнение с целевым значением интегрального показателя.

В разделе «Выводы и рекомендации» приводятся выводы по оценке качества услуг, факторы, оказавшие

влияние на полученный уровень оказываемых услуг, а также приводятся рекомендации по улучшению.

Сроки и место хранения документов, оформляемых в ходе проведения оценки, устанавливаются в соответствии с номенклатурой дел организации.

Данные, полученные по результатам оценки качества услуг, могут применяться:

- при пересмотре документов по СМК;
- при проведении анализа СМК;
- при разработке и реализации мероприятий по совершенствованию СМК.

Заключение

В рамках данного исследования авторами был проведен анализ существующих методов, включая результаты апробации «SERQUAL». В ходе разработки проекта методики были определены показатели первого и второго уровней, которые могут оказать воздействие на качество, и описан порядок расчета интегрального показателя качества услуг.

В целях дальнейшего совершенствования предложенного метода потребуется проведение дополнительных исследований, по результатам которых будет возможно выявление сильных и слабых сторон, а также направлений для улучшения.

Список источников

1. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. М.: Стандартиформ, 2009. 21 с.
2. Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77904/.
3. Мусабинова Л.А. Анализ методов оценки качества услуг // WORLD OF SCIENCE: сборник статей II Международной научно-практической конференции. Пенза: Наука и Просвещение, 2023. С. 95-97.
4. Федеральный закон от 28 декабря 2013 г. № 412-ФЗ «Об аккредитации в национальной системе аккредитации» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_156522/.
5. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. М.: Стандартиформ, 2019. 32 с.
6. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартиформ, 2019. 53 с.
7. Приказ Министерства экономического развития РФ от 26 октября 2020 г. № 707 «Об утверждении критериев аккредитации и перечня документов, подтверждающих соответствие заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации» / Зарегистрировано в Минюсте РФ 16 ноября 2020 г., Рег. № 60907.
8. Приказ Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 31.07.2020 № 2510 «Об утверждении порядка проведения поверки средств

- измерений, требований к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке» / Зарегистрировано в Минюсте РФ 20 ноября 2020 г., Рег. № 61033.
9. Мусабинова Л.А., Галимов Ф.М. Апробация метода «SERVQUAL» при оценке качества услуг в области обеспечения единства измерений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 124-131.
 10. Мусабинова Л.А. Анализ факторов, влияющих на качество оказания услуг в области обеспечения единства измерений // Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации: сборник материалов XIX Международной научно-практической конференции, Москва, 30 ноября 2023 года. М.: Алеф, 2023. С. 239-242.
 11. Салганова Е.И. Независимая оценка качества предоставления услуг организациями социального обслуживания Челябинской области // Материалы XXII Международной конференции памяти профессора Л.Н. Когана. Челябинск, 2019. С. 1741-1753.
 12. Тимофеев А.В. Методика SERVQUAL для измерения качества банковских услуг // Мавлютовские чтения: материалы XV Всероссийской молодежной научной конференции, Уфа, 26–28 октября 2021 года. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2021. Т. 4. С. 807-811.
 13. Конисбаева М.Е. Методологические подходы оценки качества медицинских услуг в условиях цифровизации // Лучшая научная статья 2022: сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 30 октября 2022 года. Пенза: Наука и Просвещение, 2022. С. 40-45.
 14. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.
 6. State standard GOST R ISO 9000-2015. Quality management system. Fundamentals and vocabulary. Moscow: Standards Publishing House, 2019, 53 p. (In Russ)
 7. Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation “On approval of the accreditation criteria and the list of documents confirming the compliance of the applicant, accredited person with the accreditation criteria” No. 707 dated October 26, 2020. Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation on November 16, 2020, registration No. 60907. (In Russ)
 8. Order of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation “On approval of the procedure for verification of measuring instruments, requirements for the verification mark and the content of the verification certificate” No. 2510 dated July 31, 2020. Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation on November 20, 2020, registration No. 61033. (In Russ)
 9. Musabirova L.A., Galimov F.M. Evaluating the SERVQUAL method in assessing the quality of services in the field of ensuring uniformity of measurements. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2023;21(4):124-131. (In Russ)
 10. Musabirova L.A. Analysis of the factors influencing the quality of services in the field of ensuring the uniformity of measurements. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i mirovogo soobshchestva v epohu cifrovizatsii: sbornik materialov XIX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Current trends in the development of science and the global community in the era of digitalization. Proceedings of the XIX International Scientific and Practical Conference]. Moscow: Aleph, 2023, pp. 239-242. (In Russ)
 11. Salganova E.I. Independent evaluation of the quality of the terms of the rendering of the services by the social service organizations of the Chelyabinsk region. *Materialy XXII Mezhdunarodnoy konferentsii pamyati professora L.N. Kogana* [Materials of the XXII International Conference in memory of Professor L.N. Kogan]. Chelyabinsk, 2019, pp. 1741-1753. (In Russ.)
 12. Timofeev A.V. SERVQUAL methodology for measuring the quality of banking services. *Mavlyutovskie chteniya: materialy XV Vserossiyskoy molodeznoy nauchnoy konferentsii* [Mavlyutov readings. Proceedings of the XV All-Russian Youth Scientific Conference]. Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2021, pp. 807-811. (In Russ.)
 13. Konisbaeva M.E. Methodological approaches to assessing the quality of medical services in the context of digitalization. *Luchaya nauchnaya statya 2022: sbornik statey Mezhdunarodnogo nauchno issledovatel'skogo konkursa* [The best scientific article 2022. Proceedings of the International Scientific Research Competition]. Penza: Science and Education, 2022, pp. 40-45. (In Russ.)
 14. Storozhev M.V., Popov E.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal pressure treatment]. Moscow: Mechanical engineering, 1977, 423 p. (In Russ.)

References

1. State Standard GOST 15467-79. Product quality management. Basic concepts. Terms and Definitions. Moscow: Standards Publishing House, 2009, 21 p. (In Russ)
2. Federal Law “On ensuring the uniformity of measurements” No. 102 dated June 26, 2008 Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77904/ (Accessed on May 20, 2023). (In Russ)
3. Musabirova L.A. Analysis of the quality of services methods. *WORLD OF SCIENCE: sbornik statei II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [WORLD OF SCIENCE: collection of articles of the II International Scientific and Practical Conference]. Penza: Publishing House Science and Enlightenment, 2023, pp. 95-97. (In Russ.)
4. Federal Law “About accreditation in the national accreditation system” No. 412 dated December 28, 2013. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_156522/ (Accessed on May 20, 2023). (In Russ)
5. State standard GOST ISO/IEC 17025-2019. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Moscow: Standards Publishing House, 2019, 32 p. (In Russ)

Поступила 08.07.2024; принята к публикации 15.10.2024; опубликована 28.03.2025
Submitted 08/07/2024; revised 15/10/2024; published 28/03/2025

Мусабинова Ляйсан Альбертовна – аспирант, заместитель начальника ОСМК,
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,
Казань, Россия;
ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», Казань, Россия.
Email: musabirova.la@mail.ru. ORCID 0009-0006-0738-8601

Галимов Фарид Мисбахович – доктор технических наук, профессор,
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,
Казань, Россия.
Email: far-galim@yandex.ru.

Шабалина Ольга Константиновна – начальник ОСМК,
ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», Казань, Россия;
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,
Казань, Россия.
Email: geogmord@mail.ru

Lyaisan A. Musabirova – Postgraduate Student, Deputy Chief of the QMS Department
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia;
Affiliated Branch of the D.I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology, Kazan, Russia.
Email: musabirova.la@mail.ru. ORCID 0009-0006-0738-8601

Farid M. Galimov – DrSc (Eng.), Professor,
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia.
Email: far-galim@yandex.ru.

Olga K. Shabalina – Chief of the QMS Department,
Affiliated Branch of the D.I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology, Kazan, Russia;
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia.
Email: geogmord@mail.ru



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
 УДК 62-9
 DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-127-137

СИСТЕМНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Кушнарев Л.И.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Результаты анализа по оценке и состоянию конкурентоспособности российской техники указывают на необходимость повышения ее качества и в первую очередь показателей надежности и эффективности. Работа направлена на интенсификацию инновационного развития предприятий и отраслей отечественного машиностроения. **Цель исследований.** Повышение качества (надежности) машин и оборудования российского производства до (и выше) уровня лучших мировых аналогов на основе реорганизации существующей системы обособленных заводов-изготовителей и создания инновационной фирменной производственно-технологической системы (фирмы), обеспечивающей формирование и управление качеством продукции машиностроения на всех этапах жизненного цикла. **Методы исследования.** В работе использовались следующие методы: монографический, сравнительных оценок, статистический, анализа и синтеза и др. **Научная новизна.** Разработка принципов построения и организации фирменной производственно-технологической системы, обеспечивающей повышение качества выпускаемой продукции конкурентоспособного уровня. **Результаты.** Результаты организационно-технологических исследований направлены на создание крупных машиностроительных фирм (предприятий или объединений с полным технологическим циклом), способных обеспечить интеграцию усилий всех структур фирмы на всех этапах жизненного цикла изделий на повышение качества техники до уровня лучших мировых аналогов. **Практическая значимость.** Решение проблемы повышения качества и в первую очередь надежности техники обеспечит повышение конкурентоспособности и внутренний спрос на отечественную технику. Это позволит увеличить объемы производства продукции машиностроения, повысить эффективность и обеспечить проведение диверсификации и модернизации производства. Использование высоконадежных машин и оборудования обеспечит повышение их производительности, снизит простои по техническим причинам, что будет способствовать своевременному и качественному выполнению технологических процессов производства продукции, работ и услуг. Инновационное развитие системы машиностроительного производства потребует ускоренного совершенствования организации и технологии производства машин и оборудования, что, в свою очередь, потребует привлечения учреждений науки и образования. Комплексный подход к решению проблемы повышения качества российской техники обеспечит прорыв в развитии отечественных техники и технологий.

Ключевые слова: конкурентоспособность, качество, надежность, фирма, фирменный технический сервис, сопровождение продукции

© Кушнарев Л.И., 2025

Для цитирования

Кушнарев Л.И. Системные проблемы машиностроения по повышению надежности отечественной техники // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 127-137. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-127-137>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
 The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

SYSTEMIC PROBLEMS OF MECHANICAL ENGINEERING TO IMPROVE THE RELIABILITY OF DOMESTIC EQUIPMEN

Kushnarev L.I.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The results of the analysis on the assessment and state of competitiveness of Russian technology indicate the need to improve its quality and, first of all, reliability and efficiency indicators. The work is aimed at intensifying the innovative development of enterprises and branches of domestic engineering. **Objectives.** The purpose of the research is to increase the quality level of Russian-made machinery and equipment to (and above) the level of the best world analogues, based on the reorganization of the existing system of separate manufacturing plants and the creation of an innovative proprietary production and technological system (firm) that ensures the formation and quality management of mechanical engineering products at all stages of the life cycle. **Methods Applied.** The following research methods were used in the work: monographic and statistical methods, comparative assessments, analysis and synthesis, and others. **Originality.** The scientific novelty of the work lies in the development of principles for the construction and organization of a proprietary production and technological system that ensures the improvement of the quality of products at a competitive level. **Results.** The results of organizational and technological research are aimed at creating large machine-building firms (enterprises or associations with a full technological cycle) capable of integrating the efforts of all company structures at all stages of the product lifecycle to improve the quality of machinery to the level of the best world analogues. **Practical Relevance.** Solving the problem of improving the quality and the reliability of equipment will ensure increased competitiveness and domestic demand for domestic equipment. This will increase the volume of production of mechanical engineering products, increase efficiency and ensure the diversification and modernization of production. The use of highly reliable machines and equipment will ensure an increase in their productivity, reduce downtime for technical reasons, which will contribute to the timely and high-quality implementation of technological processes for manufacturing products, works and services. The innovative development of the machine-building production system will require accelerated improvement of the organization and technology of production of machinery and equipment, which will require the involvement of scientific and educational institutions. An integrated approach to solving the problem of improving the quality of Russian equipment will provide a breakthrough in the development of domestic equipment and technologies.

Keywords: competitiveness, quality, reliability, firm, proprietary technical service, product support

For citation

Kushnarev L.I. Systemic Problems of Mechanical Engineering to Improve the Reliability of Domestic Equipmen. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 127-137. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-127-137>

Введение

Главной особенностью современного этапа развития отечественного машиностроения является преодоление негативных разрушительных последствий глобализации производства и вступления Российской Федерации во Всемирную торговую организацию, поскольку, как оказалось, наши партнеры преследовали этим не равноправное и эффективное развитие всех членов-участников организации, а расширение рынков сбыта своей продукции и товаров, имеющих более высокий уровень качества. В результате целые отрасли народного хозяйства России оказались без заказов и спроса на свою производимую продукцию. Это привело многие из них не только к стагнации и застою в развитии производства, но и к банкротству и ликвидации, как было и задумано иностранными конкурентами. Страна превратилась в сырьевой придаток Запада.

Изменение экономического курса в направлении развития собственного производства вызвало агрессивную реакцию западных конкурентов, которые ввели и продолжают вводить экономические санкции, спровоцировали начало специальной военной операции, чтобы истощить ресурсы и ослабить Россию. И поскольку современные войны – это войны с применением современной техники и технологий, то очень важно, чтобы они обеспечивали высочайший уровень надежности и эффективности процессов и операций, для которых создавались. Необходимость обеспечения высокой надежности процессов является обязательным требованием, предъявляемым к современной технике как гражданского, так и военного назначения. В свою очередь, своевременность, высокое качество и эффективность технологических процессов производства продукции, работ и услуг могут быть обеспечены только работоспособной, исправной технологической машиной или оборудованием [1–3].

Конкурентоспособность машин и оборудования на рынке техники потребители определяют в первую очередь по показателям надежности и эффективности. Именно по уровню надежности и эффективности современная российская техника уступает сегодня лучшим зарубежным аналогам на мировом рынке техники. Высочайший уровень качества, надежности машин и оборудования имеют машиностроительные предприятия экономически развитых стран Запада, строящие свое производство на принципах фирм-производителей техники. Результаты организационно-технологических исследований указывают на целесообразность реорганизации системы действующих заводов-изготовителей в фирмы, способные обеспечить управление качеством продукции на всех этапах жизненного цикла и выпуск конкурентоспособных машин и оборудования [2].

Целью исследований является всемерное повышение качества (надежности) российских машин и оборудования до уровня лучших мировых аналогов и выше на основе реорганизации существующей системы обособленных заводов-изготовителей и создания инновационной фирменной производственно-технологической системы (фирмы), обеспечивающей управление качеством продукции машиностроения на всех этапах жизненного цикла.

Достижение поставленной в работе цели исследования требует решения следующих задач:

- исследование причин низкого уровня надежности и эффективности современной российской техники и определение направлений их повышения;
- разработка принципиальной схемы и принципов функционирования инновационной системы производства (фирмы), обеспечивающих стабильное повышение качества (надежности) машин и оборудования;

– организация фирменной производственно-технологической системы машиностроения (фирмы), обеспечивающей формирование и управление качеством выпускаемых машин и оборудования на всех этапах жизненного цикла;

– предварительная оценка экономической эффективности разработки и внедрения перспективной фирменной производственно-технологической системы машиностроения.

Материалы и методы исследования

Для выполнения настоящей научно-исследовательской работы была собрана и проанализирована информация и фактические данные о состоянии машин и технологического оборудования, используемых в машиностроении и других машинно-технологичных отраслях экономики Российской Федерации, о показателях интенсивности их использования, эксплуатационной надежности и эффективности. При этом для обработки полученной информации использовались следующие методы исследования: монографический, сравнительных оценок, статистический, анализа и синтеза и др.

Результаты исследования

В условиях рыночных отношений основой инновационного развития техники и технологий является их конкурентоспособность. Достигнутый отечественными предприятиями машиностроения уровень конкурентоспособности техники определяется уровнем ее эффективности и характеризуется как низкий. Основные причины низкой эффективности отечественной техники можно разделить на технологические, технические, организационные и экономические, содержание которых подробно представлено на **рис. 1**.

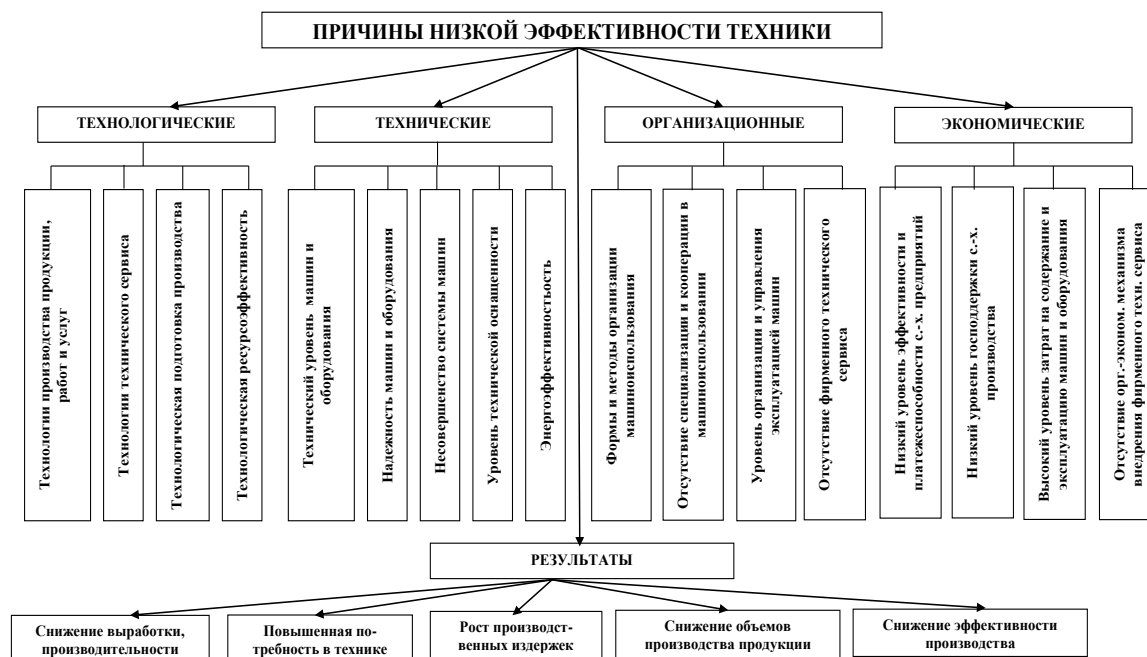


Рис. 1. Причины и результаты низкой эффективности отечественной техники

Fig. 1. Reasons and results of low efficiency of domestic equipment

Наличие технологических и технических причин связано не только с уровнем инновационного развития отечественных технологий и технических средств, а в первую очередь с застоем и экстенсивным развитием машиностроительного производства. Существующая система заводов-изготовителей, даже несмотря на жесткую конкуренцию между производителями машин и оборудования, не стимулирует и не мотивирует предприятия, коллективы предприятий на повышение качества выпускаемой машиностроительной продукции. В результате нет спроса и потребности производителей техники во внедрении новых технологий, обеспечивающих повышение качества изготовления и увеличение ресурса деталей, узлов, агрегатов и машин. Количество регистрируемых за год изобретений и патентов сократилось в сравнении с доперестроечным периодом работы машиностроения более чем на 45–50 тыс., из них становятся востребованными только 5–8 тыс.

Длительное время, из года в год, при эксплуатации машин и оборудования имеют место одни и те же отказы из-за какой-либо конкретной детали. Изготовитель машин и оборудования на это практически не реагирует. Вместо подбора необходимого материала, его упрочнения при изготовлении деталей продолжают изготавливаться недолговечные изделия. В процессе эксплуатации машин и оборудования имеет место большое количество их отказов, сопровождающихся длительными простоями техники в ремонте и огромными затратами на восстановление ее работоспособности.

Прежде всего, низкий уровень надежности машин и оборудования формировался на заводах-изготовителях с учетом сложившейся системы технического обслуживания (ТО) и ремонта, которая обеспечивала их работоспособность в процессе эксплуатации [2, 3]. Ограниченные технологические возможности заводов-изготовителей не позволяли изготавливать конструктивные элементы машин и оборудования с высоким ресурсом и безотказностью. Поэтому при производстве техники предусматривалась возможность их быстрой замены при ТО и ремонте – ремонтпригодность. Необходимость этого объяснялась нехваткой материалов, отсутствием нужных технологий изготовления и технологического оборудования. В результате эта тенденция сохранилась и до настоящего времени. Показатели безотказности техники для ее производителей особого значения не имеют. Главное, собрать изделие и реализовать потребителю. На практике не работают ни законы «О защите прав потребителей», ни постановления Правительства о наработке до отказа в гарантийный период эксплуатации, ни гарантии производителя о безотказной работе новой техники, ни рекламационные службы и т.д. Все дальнейшие действия по обеспечению эксплуатации, работоспособности техники ложатся на плечи потребителей. В то же время очень часто потребителями машин и оборудования (например, станочного) являются предприятия машиностроения или предприятия других машино-

технологичных отраслей. В результате на ненадежной и некачественной технике, естественно, будет производиться некачественная продукция. Большое количество производственно-технических ресурсов расходуется неэффективно (материалы, энергия, ресурс оборудования, труд рабочих и специалистов и др.). Таковы негативные результаты деятельности существующей системы обособленных заводов-изготовителей (рис. 2) [4, 5].

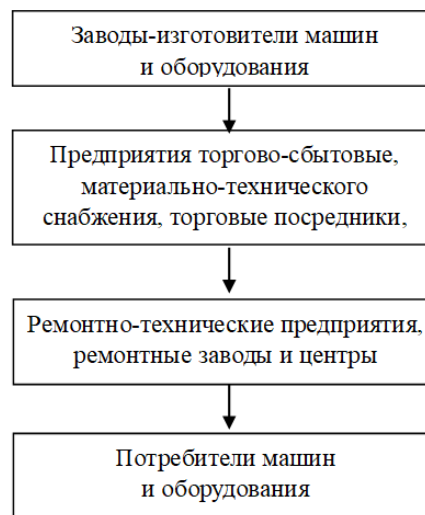


Рис. 2. Существующая система производства, реализации и эксплуатации техники

Fig. 2. The existing system of production, sale and operation of equipment

Реализация произведенных заводом-изготовителем машин и оборудования, запасных частей для их ремонта осуществляется, как правило, через предприятия-посредники, выполняющие торгово-сбытовые функции. В последние годы заводы-изготовители для продажи выпускаемой техники и запчастей практикуют создание торговых домов. При отказах машин и оборудования в гарантийный период эксплуатации эти структуры-посредники поставляют потребителям вышедшие не по их вине из строя конструктивные элементы для замены. На этом рекламационная работа изготовителя заканчивается, качество техники остается на прежнем уровне. Это указывает на отсутствие обратных связей производителя техники с ее потребителями [6, 7].

Поэтому, по мнению автора, на наш взгляд, устранение технологических и технических причин во многом зависит от решения организационно-технологических проблем, причем системного характера. Производство машин и оборудования более высокого качественного уровня, конкурентоспособного уровня требует, соответственно, не только повышения технологического уровня производства, его технической оснащенности, но и более высокого уровня квалификации, знаний и технической культуры работников предприятия. Эти требования к уровню знаний относятся не только к знанию современной техники и передовых технологий, а в первую очередь

к принципам функционирования фирм, формам и методам организации их производства, фирменному инженерно-техническому сопровождению продукции машиностроения. Поэтому достижение поставленной цели требует решения не только практических задач в сфере производства, но и их кадрового и научного обеспечения в сферах науки и образования.

Создание машиностроительной фирмы является весьма сложной комплексной проблемой, решение которой основывается на перспективных формах и методах научной (рациональной) организации производства, использовании новейших технологий и технических средств. Это значительно повышает уровень наукоемкости продукции машиностроения.

Полученные результаты многолетних организационно-технологических исследований показывают, что высокий, конкурентоспособный уровень качества своей продукции имеют предприятия, обеспечивающие свое участие на этапах жизненного цикла машины или оборудования (рис. 3). И чем больше степень этого участия, тем выше качество продукции [8].

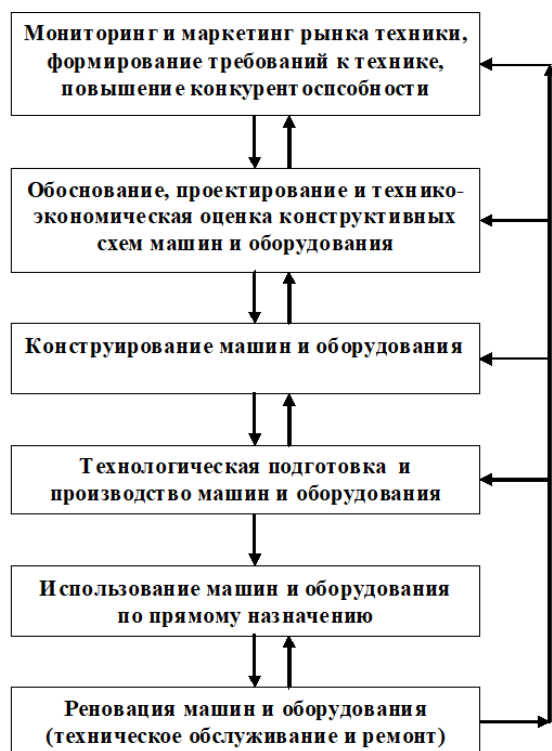


Рис. 3. Основные этапы жизненного цикла изделий фирмы

Fig. 3. The main stages of the life cycle of the company's products

Реализовать этот принцип на практике очень просто. Особенно для условий функционирования существующих обособленных заводов-изготовителей техники, не имеющих необходимой инфраструктуры, специальных подразделений и служб и адаптированных к работе в условиях нормальной рыночной конкуренции. Фирма-производитель техники, включая в своем составе все необходимые структуры и службы

в соответствии с этапами жизненного цикла изделий машиностроения, способна обеспечить реализацию технологических процессов производства с наивысшим качеством.

На первом этапе ведется мониторинг и изучается состояние реализации производственных (технологических) процессов, для которых будет использоваться разрабатываемая машина или оборудование. Определяются показатели производительности, затраты труда и времени, экономические затраты на выполняемые операции в соответствии с назначением машины (оборудования) и т.д. По принятым методикам определяются показатели эффективности, которые закладываются в исходные требования к проектируемому изделию. К сожалению, на данном этапе производителями недостаточно уделяется внимания обеспечению высокого уровня эксплуатационной надежности выпускаемой техники. Не осуществляется сбор, анализ и обработка общего количества эксплуатационных отказов и по группам сложности, затратам на устранение их последствий, а также других показателей безотказности и ремонтпригодности техники. Не предпринимается никаких действий по исключению отказов в дальнейшем. В результате изначально уровень надежности проектируемой машины или оборудования будет оставаться на прежнем уровне [9].

При конструировании деталей, узлов и агрегатов машины, если мы не заложили ранее требования по обеспечению определенного уровня надежности, то, соответственно, и получим недолговечные изделия. Что мы и наблюдаем у многих отечественных машин и оборудования, у которых от модели к модели отказывают одни и те же детали, узлы и агрегаты.

Ранее выполненными исследованиями установлено, что на этапах проектирования и конструирования машин и оборудования закладывается до 75% уровня надежности, на этапе производства – до 20%, а эксплуатации – всего около 5% (рис. 4).

При технологической подготовке производства техники и непосредственно при ее производстве в разработанную конструкцию машины вносятся в соответствии с реальными возможностями завода-изготовителя большое количество дополнений и изменений. При этом они не всегда направлены на обеспечение заданного уровня качества и в первую очередь надежности машины или оборудования.

При технологической подготовке производства изделий машиностроения и непосредственно при их производстве в разработанную конструкцию машин может вноситься, в соответствии с реальными возможностями завода-изготовителя, большое количество дополнений и изменений. При этом они не всегда направлены на обеспечение заданного уровня качества и в первую очередь надежности машины или оборудования.

Решение поставленных в работе задач требует реорганизации системы существующих заводов-изготовителей машин и оборудования и создания фирменных производственно-технологических систем машиностроения (фирм) (рис. 5).



Рис. 4. Обеспечение качества изделий машиностроения на этапах жизненного цикла

Fig. 4. Ensuring the quality of mechanical engineering products at the stages of the life cycle

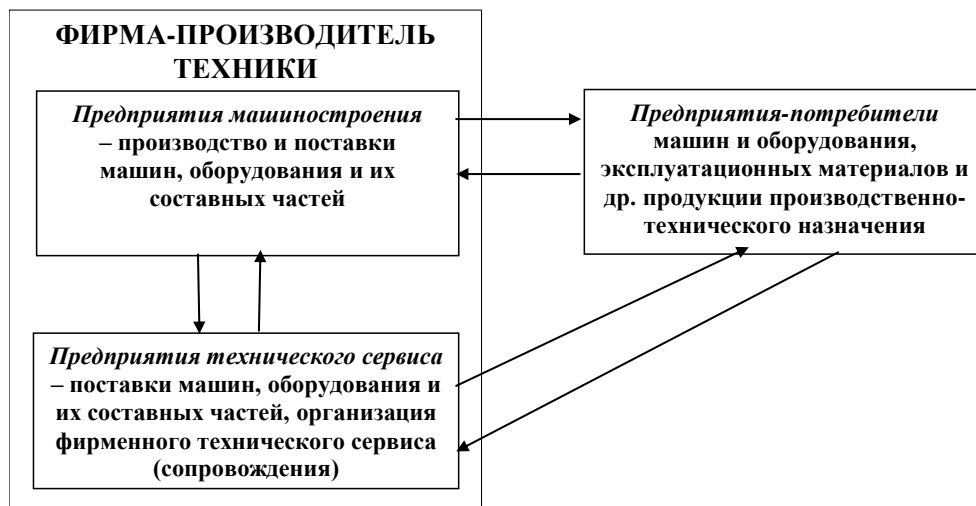


Рис. 5. Принципиальная схема взаимосвязей в фирме

Fig. 5. A schematic diagram of the interactions in the company

При этом под машиностроительной фирмой будем понимать предприятие или объединение предприятий, которое включает в своем составе все структурные подразделения или предприятия, обеспечивающие выполнение всех процессов и функций на всех этапах жизненного цикла выпускаемых машин и оборудования, а также осуществляет управление качеством продукции.

Фирма обеспечивает управление качеством изделий в течение всего технологического цикла – начиная от идеи создания машины до ее списания и утилизации. Фирм, обеспечивающих полный технологический цикл, в нашей стране пока нет. В результате – нет конкурентоспособного уровня качества отечественных машин и оборудования [10].

Принципиальной особенностью предлагаемой инновационной фирменной производственно-технологической системы машиностроения является ее нацеленность на создание конкурентоспособной продукции, выпускаемых машин и оборудования. Это требует, чтобы машиностроительная фирма, наряду с внутрифирменными связями, обязательно имела устойчивые прямые и обратные связи с потребителями техники. Принимая участие в обеспечении работоспособности выпускаемых машин и оборудования, у фирмы появляется возможность не только повысить уровень исправности изделий, но и получить достоверную информацию об эксплуатационной надежности техники в реальных производственных и климатических условиях (см. рис. 3). Из-за отсутствия прямых и обратных связей заводов-изготовителей с потребителями техники они не владеют полной и достоверной информацией о качественном уровне и показателях надежности выпускаемых машин и оборудования. Отсутствие информации об уровне и показателях надежности выпускаемой техники в проектных и конструкторских организациях не позволяет им оперативно реагировать на появление и причины появления внезапных эксплуатационных отказов, дорабатывать и совершенствовать конструктивные элементы машин и оборудования. И как следствие, уровень качества отечественной техники не повышается.

Особую озабоченность представляет существующая система технического сервиса или скорее то, что осталось от системы технического обслуживания и ремонта машин. Ранее ремонтно-обслуживающее производство (самое крупное в мире) представляло собой отдельную отрасль народного хозяйства со своим министерством, тысячами предприятий по стране, основной задачей которого было оказание потребителям услуг по ТО и ремонту техники, по материально-техническому обеспечению, восстановлению и изготовлению деталей, другим направлениям сервисной деятельности. Несмотря на наличие мощной системы технического сервиса, значительная часть работ и услуг по ТО и ремонту сложных машин и оборудования выполнялась исключительно силами и средствами потребителей техники. Достигнутый специализированными ремонтными предприятиями послеремонтный ресурс, например, после капитального ремонта тракторов составлял всего около 46% от нового. Поэтому основной причиной ликвидации отрасли стало низкое качество работ и услуг по ремонту машин и оборудования [1–3].

В настоящее время, когда ремонтно-технические предприятия стали независимыми хозяйствующими субъектами, состояние с качеством работ по ТО и ремонту техники существенно ухудшилось. Явно прослеживается заинтересованность ремонтников в низком качестве ремонта, что приводит к повторному ремонту машины. Поэтому потребители стараются собственными силами и средствами обеспечивать работоспособность своей техники.

Потребитель приобретает необходимую технику не для ее постоянного технического обслуживания и ре-

монта, а для выполнения определенных работ и услуг в соответствии с ее служебным назначением. И при этом важно, чтобы машина или оборудование имели высокий уровень эксплуатационной надежности и, прежде всего, безотказности. Поэтому потребители весьма положительно оценили высокий уровень надежности зарубежной техники. Чтобы обеспечить высокий уровень надежности российской техники, требуется разработка и внедрение инновационных форм и методов организации не только ТО и ремонта, а всего комплекса мероприятий и услуг по техническому сервису. Таким методом организации технического сервиса является фирменный метод технического сервиса. Фирменная система (подсистема) технического сервиса может обеспечить работоспособность выпускаемой фирмой техники, но и повысить качество (надежность) техники. Реализовать это способна только фирменная система технического сервиса, одной из основных задач которой является изучение причин эксплуатационных отказов и их исключение на основе оперативной доработки и повышения качества конструктивных элементов машины. Отсутствие информации о надежности машины и ее конструктивных элементов делает невозможным повышение качества отечественных машин и оборудования до конкурентоспособного уровня на российском и тем более мировом рынке техники [10].

В настоящее время из-за снижения объемов производства отечественной техники, машин и оборудования, значительном росте цен, при том же неизменно низком уровне их качества и в первую очередь надежности, российские потребители стараются эксплуатировать имеющуюся технику далеко за пределами оптимальных сроков службы. Продолжительность эксплуатации превышает рекомендованный срок службы в 2–3 раза. Вместо приобретения новых машин и оборудования предпочитают отдавать их ремонту, несмотря на высокие затраты.

После такой длительной эксплуатации машина (оборудование) подлежит списанию и утилизации. Дальнейшее использование ее отдельных узлов и агрегатов нецелесообразно из-за старения и коррозии металла. Это приводит к невозможности создания вторичного рынка техники, на который бы поставлялись машины и оборудование после капитального ремонта.

Многолетний опыт существования ремонтно-обслуживающего производства показал, что обеспечить требуемый качественный уровень капитально отремонтированной техники с последующей гарантией надежной эксплуатации сможет только фирма-производитель. Это позволило бы фирме определить максимальный ресурс отдельных ответственных изделий конструкции и эксплуатационную надежность отремонтированных машин или оборудования, целесообразность выбора конструкционных материалов и другие аспекты. Невозможность создания и развития вторичного рынка техники связана, прежде всего, с низким уровнем эксплуатационной надежности российской техники. Решение этой задачи требует увеличения ресурса конструктив-

ных элементов на основе повышения точности изготовления и повышения износостойкости ответственных рабочих поверхностей деталей. Это возможно только при создании фирменной производственно-технологической системы и системы фирменного технического сервиса, нацеленных на повышение качества техники [11].

Эффективное функционирование системы технического сервиса требует качественного выполнения операций ТО и ремонта сложной техники. Поэтому предприятия технического сервиса оснащались необходимым технологическим оборудованием: станочным, контрольно-измерительным, диагностическим, оснасткой и приспособлениями. Проектированием и конструированием ремонтно-технологического оборудования и оснастки занимались специализированные НИИ и опытно-конструкторские и технологические бюро (ОКТБ), изготовлением – специализированные предприятия. Их дефицит и несовершенство конструкции ощущали все структуры системы ТО и ремонта техники. С решением этой проблемы могли бы легко справиться те же проектировщики и конструкторы, которые занимаются разработкой конструктивных элементов машин и оборудования. Уже на стадии проектирования и конструирования появляется возможность предусмотреть в конструкции деталей элементы, которые бы повышали ремонтпригодность и упрощали конструкцию оборудования, инструмента и приспособлений.

Таковы основные причины низкого уровня надежности и конкурентоспособности отечественных машин и оборудования. Приведенные при этом направления повышения надежности российской техники показывают на возможность решения стоящих перед машиностроением проблем с минимальными инвестиционными

вложениями. Естественно, для этого потребуется использование последних достижений науки и практики, которые позволят разработать концепцию инновационного развития машиностроения в направлении повышения качества изготовления и эксплуатационной надежности выпускаемых машин и оборудования. Приведенные результаты анализа состояния и причин низкой конкурентоспособности отечественного машиностроения позволяют установить главное направление решения всего комплекса проблем – это повышение надежности выпускаемой техники (рис. 6) [1, 7].

Для реализации концепции фирменного производства и технического сервиса отечественной техники представляется целесообразным разработать комплексный организационно-технологический проект и бизнес-план создания фирменной производственно-технологической системы (фирмы) машиностроения. Решение и практическая реализация комплекса проблем повышения качества (надежности) машин и оборудования требует привлечения потенциала учреждений науки и образования. С одной стороны, требуется специальная подготовка и переподготовка руководителей и специалистов для понимания ими необходимости технологической модернизации предприятия, целесообразности внедряемых решений и непосредственного участия в реализации наукоемкого проекта. С другой стороны, исполнители процессов и работ также должны пройти обучение и практическую подготовку по специальным курсам. Учреждения науки и образования должны разработать по данному направлению учебные программы и методические комплексы для подготовки и переподготовки руководителей, специалистов и рабочих массовых профессий.



Рис. 6. Направления повышения качества машин и оборудования

Fig. 6. Directions for improving the quality of machinery and equipment

В статье неоднократно подчеркивалось, что реализация комплекса проблем, связанных с повышением качества и конкурентоспособности российских машин и оборудования, не требует огромных инвестиций. Потребность фирм в инвестициях зависит от обеспеченности производственными площадями, оснащенности современным технологическим оборудованием, укомплектованности специалистами и производственным персоналом. Фирма должна функционировать, производить продукцию машиностроения и иметь установившиеся логистические связи. Основной проблемой этого предприятия будет реализация организационно-технологических мероприятий по повышению качества изготовления, эксплуатационной надежности выпускаемой техники. Это существенно ускорило бы получение результатов по повышению надежности выпускаемых машин и оборудования [12, 13].

Но это совсем необязательно, поскольку основная масса машиностроительных предприятий РФ находится в начальной стадии восстановления своего производства: занимается поиском заказов, техническим переоснащением, диверсификацией и модернизацией производства, другими задачами. В данном случае реализация организационно-технологического проекта позволит даже сократить капиталовложения, необходимые на перечисленные выше цели, за счет использования результатов научного поиска, оптимальных решений, повышения наукоемкости процессов производства. Решение проблемы повышения качества выпускаемой российским машиностроением техники, ее надежности и эффективности станет возможным только при наличии следующих необходимых условий [14–16]:

1. Как показывает российский опыт функционирования предприятий машиностроения в условиях рыночных отношений – законы рынка здесь не работают. Всячески игнорируются права потребителя техники, который, приобретая машину или оборудование, платит за качественное изделие, которое должно в течение определенного срока эффективно выполнять заданные функции в соответствии со служебным назначением. Но очень часто эти машины и оборудование отказывают даже в гарантийный период эксплуатации. Производитель техники при этом не несет практически никакой ответственности – ни экономической, ни юридической. Все убытки, издержки, потери от простоев машин и оборудования по техническим причинам несет потребитель техники. Права потребителей абсолютно никак не защищены.

2. При производстве техники в машиностроении в настоящее время практически отменены все государственные стандарты. Они носят чисто информационный, рекомендательный характер. Многие из них длительное время не пересматривались и устарели. Производители продукции, и не только машиностроительной, взамен стандартов разрабатывают и используют свои технические условия, как правило,

имеющие заниженные требования к качеству продукции.

3. Полностью отсутствует нормативно-правовая и законодательная база, защищающая права потребителей техники и обеспечивающая полную юридическую и экономическую ответственность заводоизготовителей за производство и поставки некачественной техники.

4. Целесообразно разработать систему экономического стимулирования фирм-производителей за выпуск высококачественных и конкурентоспособных машин и оборудования.

Только решение отмеченных в работе проблем низкой надежности отечественной техники, разработка и реализация намеченных направлений инновационного развития производственно-технологической системы машиностроения позволит выйти на производство высококонкурентных, качественных и надежных машин и оборудования. Внедрение результатов исследования обеспечивает высочайшую эффективность производственно-хозяйственной деятельности предприятий машиностроения и других машинно-технологических отраслей народного хозяйства Российской Федерации. Предварительные расчеты и экспертные оценки экономической эффективности показывают, что годовой экономический эффект может превысить 2,0–2,5 триллиона рублей. При этом существенно возрастает престиж России на международном уровне, повышается культурно-технический уровень занятых разработкой, производством и эксплуатацией техники.

Заключение

1. Основными причинами низкого уровня качества (надежности) машин и оборудования отечественного производства являются: игнорирование требований потребителей; устаревшие формы организации производства машин обособленными заводами-изготовителями; низкий уровень наукоемкости и необходимость осуществления технологической модернизации производства. Поэтому главной целью настоящей работы является всемерное повышение качества выпускаемой отечественной техники на основе решения обозначенных проблем.

2. Необходимо обеспечить защиту прав потребителя на приобретение качественной, надежной и эффективной техники, которую он приобретает для производства общественно необходимых качественных продукции, работ и услуг. А это возможно только при своевременном и качественном выполнении производственных процессов с помощью качественных и надежных машин и оборудования и требует прямых производственно-экономических связей производителя и потребителя техники.

3. Главным направлением решения проблем повышения качества является создание фирменной производственно-технологической системы машиностроения, реализующей все процессы жизненного цикла

изделий, от идеи создания машины до ее утилизации, и управляя ими в направлении повышения качества отечественных машин и оборудования до уровня лучших мировых аналогов.

4. Важным звеном в фирменной системе производства должна быть фирменная система инженерно-технического сопровождения (технического сервиса) машин и оборудования. Ее главными задачами должно быть не только обеспечение их работоспособности, но и доработка конструктивных элементов машин, повышение их ресурса и безотказности.

5. Внедрение результатов исследования по повышению качества (надежности) техники обеспечивает высокую эффективность производственно-хозяйственной деятельности предприятий машиностроения (за счет повышения спроса и цены, увеличения объема услуг) и других машинно-технологичных отраслей (уменьшения простоев по техническим причинам, снижения эксплуатационных расходов и др.) народного хозяйства Российской Федерации. Предварительные расчеты и экспертные оценки экономической эффективности показывают, что годовой экономический эффект может превысить 2,0–2,5 триллиона рублей в год.

Список источников

1. Планово-предупредительная система ТО и ремонта машин и оборудования. М.: Машиностроение, 2001. 369 с.
2. Проблемы технического сервиса в АПК России: монография / Черноиванов В.И., Северный А.Э., Кричевский М.Е. и др. М.: ГОСНИТИ, 2000. 309 с.
3. Качество и надежность отечественной техники – основа ее конкурентоспособности / Кушнарев Л.И., Чепурина Е.Л., Чепурин А.В., Кушнарев С.Л. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2015. № 11. С. 35-37.
4. Шакамов Р.Р., Старунов А.В. Анализ системы технического сервиса сельскохозяйственной техники в Германии // Наука: научно-производственный журнал. 2020. № 4. С. 104-108.
5. Модернизация системы технического сервиса агропромышленного комплекса: монография / Кушнарев Л.И., Чепурина Е.Л., Кушнарев С.Л., Чепурин А.В., Корнеев В.М.; под ред. Л.И. Кушнарева. М.: МЭСХ, 2015. 440 с.
6. Брче М.А., Омелченко И.Н., Шааб А. Устойчивое развитие: механизмы реализации. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 172 с.
7. Кушнарев Л.И. Повышение качества машин и оборудования на основе фирменного технического сервиса // Технический сервис машин. 2023. № 3 (152). С. 46-50.
8. Журавлев С.Ю. Организация и технология технического сервиса сельскохозяйственной техники нового поколения // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 7 (213). С. 116-122.
9. Организация и развитие фирменного технического сервиса машин и оборудования для АПК / Голубев И.Г., Быков В.В., Митракова В.Д., Ермолин Н.В. М., 2000.
10. Кушнарев Л.И. Фирменный технический сервис машин и оборудования. Проблемы. Поиски. Решения: монография. Saarbrücken, Deutschland. Palmarium. Academic publishing, 2014. 210 с.
11. Кушнарев Л.И. К проблеме импортозамещения и конкурентоспособности техники // Труды ГОСНИТИ. Т. 123. Ч. 1. М.: ГОСНИТИ, 2016. С. 79–85.
12. Кушнарев С.Л. Принципы организации фирменного обслуживания сельскохозяйственной техники // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2004. №1. С. 35-37.
13. Чепурина Е.Л., Кушнарева Д.Л. Повышение безотказности машин и оборудования в животноводстве // Эффективное животноводство. 2018. № 7(146). С. 49-51.
14. Кушнарев С.Л., Чепурина Е.Л., Чепурин А.В. К обоснованию создания фирменной системы инженерно-технического сервиса машин и оборудования // Международный технико-экономический журнал. 2019. № 2. С. 41-47.
15. Чепурина Е.Л., Кушнарева Д.Л. Основы методики проектирования систем технического сервиса (статья) // Технический сервис машин. 2019. № 3(136). С. 73-80.
16. Кушнарев Л.И. К организации фирменного технического сервиса машин и оборудования // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2024. № 3. С. 8-14.

References

1. *Planovo-predupreditel'naya sistema TO i remonta mashin i oborudovaniy* [Planned preventive maintenance and repair of machinery and equipment]. Moscow: Machine building, 2001, 369 p. (In Russ.)
2. Chernoiivanov V.I., Severny A.E., Krichevsky M.E. et al. *Problemy tekhnicheskogo servisa v APK Rossii: monografiya* [Problems of technical service in the agro-industrial complex of Russia: monograph]. Moscow: GOSNITI, 2000, 309 p. (In Russ.)
3. Kushnarev L.I., Chepurina E.L., Chepurin A.V., Kushnarev S.L. The quality and reliability of domestic technology is the basis of its competitiveness. *Traktory i sel'hozmashiny* [Tractors and agricultural machinery], 2015;(11):35-37. (In Russ.)
4. Shakamatov R.R., Starunov A.V. Analysis of the technical service system of agricultural machinery in Germany. *Nauka: nauchno-proizvodstvennyi zhurnal* [Science: scientific and production journal], 2020;(4):104-108. (In Russ.)
5. Kushnarev L.I., Chepurina E.L., Kushnarev S.L., Chepurin A.V., Korneev V.M. *Modernizatsiya sistemy tekhnicheskogo servisa agropromyshlennogo kompleksa: monografiya* [Modernization of the technical service system of the agro-industrial complex: monograph]. Moscow: MESKH, 2015, 440 p. (In Russ.)
6. Brche M.A., Omelchenko I.N., Shaab A. *Ustoichivoe razvitie: mekhanizmy realizatsii* [Sustainable development: implementation mechanisms]. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2020, 172 p. (In Russ.)
7. Kushnarev L.I. Improving the quality of machinery and equipment based on proprietary technical service.

- Tekhnicheskij servis mashin* [Technical service of machines], 2023;(3(152)):46-50 (In Russ.)
8. Zhuravlev S.Yu. Organization and technology of technical service of new generation agricultural machinery. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Vestnik of the Altai State Agrarian University], 2022;(7(213)):116-122. (In Russ.)
 9. Golubev I.G., Bykov V.V., Mitrakova V.D., Ermolin N.V. *Organizatsiya i razvitie firmennogo tekhnicheskogo servisa mashin i oborudovaniya dlya APK* [Organization and development of branded technical service of machinery and equipment for agriculture]. Moscow, 2000. (In Russ.)
 10. Kushnarev L.I. *Firmenniy tekhnicheskij servis mashin i oborudovaniya. Problemy. Poiski. Resheniya: monografiya* [Branded technical service of machinery and equipment. Problems. Search. Solutions. Monograph]. Saarbrücken: Palmarium. Academic publishing, 2014, 210 p.
 11. Kushnarev L.I. On the problem of import substitution and competitiveness of technology. *Trudy GOSNITI* [Proceedings of GOSNITI], 2016;123:79-85. (In Russ.)
 12. Kushnarev S.L. Principles of organization of branded maintenance of agricultural machinery. *Remont. Vostanovlenie. Modernizatsiya* [Repair. Restoration. Modernization], 2004;(1):35-37. (In Russ.)
 13. Chepurina E.L., Kushnareva D.L. Improving the reliability of machinery and equipment in animal husbandry. *Effektivnoe zhivotnovodstvo* [Efficient animal husbandry], 2018;(7(146)):49-51. (In Russ.)
 14. Kushnarev S.L., Chepurina E.L., Chepurin A.V. To substantiate the creation of a branded system of engineering and technical service of machinery and equipment. *Mezhdunarodniy tekhniko-ekonomicheskij zhurnal* [International Technical and Economic Journal], 2019;(2):41-47. (In Russ.)
 15. Chepurina E.L., Kushnareva D.L. Fundamentals of the methodology for designing technical service systems (article). *Tekhnicheskij servis mashin* [Technical service of machines], 2019;(3(136)):73-80. (In Russ.)
 16. Kushnarev L.I. On the organization of branded technical service of machines and equipment. *Remont. Vostanovlenie. Modernizatsiya* [Repair. Restoration. Modernization], 2024;(3):8-14. (In Russ.)

Поступила 03.07.2024; принята к публикации 05.10.2024; опубликована 28.03.2025

Submitted 03/07/2024; revised 05/10/2024; published 28/03/2025

Кушнарев Леонид Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры МТ-13 «Технологии обработки материалов», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.
Email: kushnarevl@mail.ru. ORCID 0000-0001-8199-0322

Leonid I. Kushnarev – DrSc (Eng.), Professor, Professor of the MT-13 Department of Materials Processing Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.
Email: kushnarevl@mail.ru. ORCID 0000-0001-8199-0322



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.562
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-138-148

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ОПЕРАТИВНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Бобрышов А.П., Кузьменко В.П., Солёный С.В., Квас Е.С.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Вопрос оценки качества электрических контрольно-измерительных приборов устанавливает необходимость проведения перечня нетривиальных операций, нацеленных на оценку наибольшего числа параметров, характеризующих измерительные устройства. Одним из наиболее распространенных способов анализа в науке являются исследования результатов с точки зрения статистики и вероятности, описывающие возможность возникновения определённого перечня сценариев работы или состояний, а также производящие изучение количественной стороны массовых явлений в числовом формате. На основе полученных результатов возможно производить наиболее точную качественную оценку, отражающую корректность функционирования, особенность и степень годности исследуемого аппарата или процесса. **Цель работы.** Цель исследования заключается в выведении универсальной зависимости ключевого параметра точности электрических контрольно-измерительных приборов от количественной оценки вероятности корректной поверки. **Используемые методы.** В рамках работы используются различные разносторонние методы научного, практического и технического исследования с ссылками на нормативную документацию в областях метрологии и качества продукции и процессов. В исследовании используются различные математические модели и методы, оценивающие соответствие принадлежности приводимых результатов измерений к нормальному закону распределения. Дополнительно используются программный комплекс и язык программирования для автоматизации расчетов и получения результатов выстраиваемой зависимости. **Новизна.** В работе приводится методика расчёта вероятности корректности поверки электрических контрольно-измерительных приборов на основе результатов прогноза изменения параметра среднеквадратического отклонения в зависимости от точности измерительного устройства, что позволяет получить результаты вероятности с высокой степенью достоверности. **Результат.** Представлена методика построения универсальной оперативной характеристики поверки на основе проведенных результатов исследования закона распределения электрических измерений как случайной величины, а также результатов оценки прогнозирования изменения точности и среднеквадратического отклонения выборки измерений. Полученный результат показывает динамику проявления статистических выбросов с различной степенью как вероятности, так и величины измерений, фальсифицирующих дальнейшие проводимые оценки состояния приборов или систем. **Практическая значимость.** Результатом проводимого исследования является определение и обоснование дополнительного качественного параметра для электрических контрольно-измерительных приборов, применение которого повысит степень достоверности, точности и глубины проводимых качественных оценок измерительной продукции или результатов измерений. На основе представленных исследований возможно сформировать обоснование процедуры изменения паспортной точности приборов или изменение межповерочного интервала по результатам плановой аттестации.

Ключевые слова: электрические контрольно-измерительные приборы, качество, оперативная характеристика поверки, точность, вероятность, статистика, закон распределения

© Бобрышов А.П., Кузьменко В.П., Солёный С.В., Квас Е.С., 2025

Для цитирования

Универсальная оперативная характеристика качественной оценки электрических контрольно-измерительных приборов / Бобрышов А.П., Кузьменко В.П., Солёный С.В., Квас Е.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 138-148. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-138-148>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

UNIVERSAL OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF QUALITY ASSESSMENT OF ELECTRICAL CONTROL AND MEASURING INSTRUMENTS

Bobryshov A.P., Kuzmenko V.P., Solyony S.V., Kvas E.S.

St. Petersburg State University University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

Abstract. Statement of the problem (relevance of the work). The issue of assessing the quality of electrical measuring instruments establishes the need to carry out a list of non-trivial operations aimed at assessing the greatest number of parameters characterizing measuring devices. One of the most common methods of analysis in science is the assessment of results in terms of statistics and probability, describing the possibility of a certain list of operating scenarios or states, as well as assessing the quantitative side of mass phenomena in numerical format. Based on the results obtained, it is possible to produce the most accurate qualitative assessment reflecting the correctness of the functioning, feature and degree of suitability of the device or process under study. **Objectives.** The purpose of the study is to derive a universal dependence of the key parameter of the accuracy of electrical measuring instruments on the quantitative assessment of the probability of correct verification. **Methods Applied.** The work uses various methods of scientific, practical and technical research with references to regulatory documentation in the fields of metrology and quality of products and processes. The study uses various mathematical models and methods that evaluate the compliance of the measurement results with the normal distribution law. Additionally, a software package and programming language are used to automate calculations and obtain the results of the constructed dependence. **Originality.** The paper presents a methodology for calculating the probability of correctness of verification of electrical control and measuring instruments based on the results of predicting the change in the standard deviation parameter depending on the accuracy of the measuring device, which allows obtaining probability results with a high degree of reliability. **Result.** The paper presents a methodology for constructing a universal operational characteristics of verification based on the conducted results of the study of the distribution law of electrical measurements as a random variable, as well as the results of assessing the predicting change in the accuracy and standard deviation of a sample of measurements. The obtained result shows the dynamics of the manifestation of statistical outliers with varying degrees of both probability and measurement value, falsifying further assessments of the state of devices or systems. **Practical Relevance.** The result of the conducted research is the definition and justification of an additional quality parameter for electrical control and measuring instruments, the use of which will increase the degree of reliability, accuracy and depth of the conducted qualitative assessments of measuring products or measurement results. Based on the presented research, it is possible to formulate a justification for the procedure for changing the potential accuracy of devices or changing the inter-verification interval based on the results of scheduled certification.

Keywords: electrical control and measuring instruments, quality, operational characteristics of verification, accuracy, probability, statistics, distribution law

For citation

Bobryshov A.P., Kuzmenko V.P., Solyony S.V., Kvas E.S. Universal Operational Characteristics of Quality Assessment of Electrical Control and Measuring Instruments. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 138-148. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-138-148>

Введение

Качество является достаточно сложным понятием, определяющим различный характер описываемого объекта или процесса, чаще всего характеризующийся наличием или отсутствием определённого свойства [1]. Данный параметр может быть описан количественной величиной, определяющей его общее или среднее значение в определенной системе исчисления. Качество продукции или услуги с технической точки зрения определяется способностью и полнотой выполнения заявленных потребностей, соответствующих назначению описываемого продукта или услуги. Для сложных объектов или процессов данный параметр описывается и исчисляется средним значением оценочной характеристики от общего числа каждого отдельного узла объектов или процес-

сов, также отдельно оцениваемых [2]. Ключевой качественной, оценочной характеристикой для электрических контрольно-измерительных приборов (КИП) является параметр точности, описывающий количественно соответствие устройства установленным нормам. Подтверждением данного утверждения являются два отдельных факта.

Первым доказательством является полное соответствие точности как оценочной характеристики пригодности измерительного аппарата при проведении мероприятий поверки или калибровки. Непревышение допустимой паспортной погрешности каждого отдельного и среднего значений отклонений измерений при заданных нормальных условиях определяет возможность устройства корректно функционировать и выполнять заявленный функционал.

Вторым доказательством является связь двух стандартов: РД 50-605-86 «Методические указания по применению стандартов на статистический приемочный контроль» и МИ 187-86 «Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Достоверность и требования к методикам поверки средств измерений».

В первом руководящем документе приводятся методические рекомендации на тему выборочного контроля и оценки качества продукции с применением статистических методов оценки. В стандарте приводится описание вывода дефектности исследуемой партии и связи данного параметра с оперативной характеристикой, являющейся зависимостью вероятности приемки партии продукции от величины, характеризующей его качество [3]. Описываемую вероятность с точки зрения контроля электрических КИП можно охарактеризовать как достоверность соответствия паспортной точности прибора. Чем меньше данный параметр, тем меньше вероятность принятия такого прибора в действительности годным или, что более точно подходит под описание, такой прибор или партия в меньшей степени является качественной продукцией. Об этом можно утверждать, учитывая распределение погрешностей и возможность его выхода за рамки установленного значения при приближении среднего показателя отклонений к граничному.

Второй стандарт достоверности и требований к методикам поверки средств измерений приводит критерии оценки электрических КИП с точки зрения достоверности поверки. Стандарт описывает основную теорию и базовые функциональные зависимости метрологических характеристик в совокупности с теорией вероятности, статистикой и математического анализа для построения оперативной характеристики поверки (ОХП) [4]. Данная характеристика является зависимостью вероятности приёмки исследуемой партии продукции от уровня дефектности.

Учитывая приведенное описание точности как оценочной характеристики пригодности КИП в первом доказательстве и связь двух стандартов руководящего документа о статических методах контроля качества и стандарта достоверности и вероятности поверки во втором доказательстве, а также рассматривая общую связь нормативных документов в виде оперативной характеристики, использующей параметр, определяющий качество продукции, можно сделать вывод, что точность электрического КИП действительно является его количественной оценкой качества. Остается привести корректную математическую форму описания и вывода качества электрических приборов.

Оценка соответствия погрешностей электрических измерений нормальному закону распределения случайной величины

Из рассмотрения достоверности во втором стандарте с точки зрения теории вероятности и статистики устанавливается необходимость определения закона распределения (ЗР) оцениваемой величины погрешности электрических измерений КИП как случайной.

Изначально стоит установить, что большинство оцениваемых величин подчиняются нормальному ЗР или его разновидности, при этом данное распределение в большей степени применимо для непрерывных случайных величин. Такие величины относятся к бесчисленному набору значений в заданном диапазоне, что отражает суть погрешностей измерений электрической величины в рамках заданной паспортной точности. В частных случаях возможно рассматривать такие отклонения как дискретные величины [5].

Для оценки ЗР-величины были взяты результаты измерений-поверки восьми электрических КИП: цифровых и аналоговых вольтметров, амперметров, ваттметров и омметра. Вычисления для оценки ЗР проводились с использованием программного комплекса STATISTICA версии 10.0.1011 и Excel. Программное обеспечение STATISTICA является наиболее распространенным и доступным инструментом с широким списком функций и методов для осуществления анализа, управления, извлечения или определения, а также визуализации данных с использованием статистических методов. Программа достаточно часто используется для проведения различного рода анализа, например в областях науки, медицины, бизнеса, экономики, маркетинга и т.п. [6, 7]. Главная причина выбора именно данного программного комплекса заключается в возможности осуществления всех выбранных критериев оценки нормальности исследуемых выборок.

В качестве основных критериев оценки были выбраны критерии: Пирсона, Колмогорова-Смирнова, Лиллиефорса и Шапиро-Уилка. Критерий Пирсона, или критерий хи-квадрат, является непараметрическим методом, позволяющим осуществить оценку значимости различий между определёнными в результате исследования исходами, качественными характеристиками выборки и теоретическими результатами, подчиняющимися закону нулевой гипотезы. Ключевой особенностью критерия является универсальность, позволяющая применять метод к оценке различных гипотез [8].

Критерий Колмогорова-Смирнова также относится к непараметрическим критериям согласия и предназначен для проверки исследуемых выборок на соответствие некоторому известному теоретическому ЗР. Главной особенностью метода, по сути, является оценка расстояния между эмпирической выборочной функцией распределения и кумулятивной функцией теоретического распределения. Также может применяться для оценки разницы двух распределений [9]. Как и критерий Пирсона, данный метод является наиболее распространенным в статистической оценке.

Критерий Лиллиефорса является доработанной версией метода Колмогорова-Смирнова и в большей степени ориентируется на оценку соответствия исследуемой выборки нормальному ЗР. Ключевыми особенностями являются отсутствие использования поправки Чебышева и значительно низкие значения критических точек в сравнении с методом Колмогорова-Смирнова. Данные отличия устанавливают зависимость точности критерия от размера выборки, но при этом подведение теоретиче-

ской кривой под выборку позволяет снизить значения отклонений отдельных точек [10].

Критерий Шапиро-Уилка использует отношение оптимальной линейной оценки дисперсии к её обычной оценке, используя максимальное правдоподобие. Особенность критерия заключается в наибольшей эффективности при проверке гипотезы о нормальности распределения и одинаковой мощности для выборок малого объема [11]. Для работы с большим набором значений предпочтительней использовать критерий Ройсто-

на, являющийся доработанной версией метода Шапиро-Уилка [12].

Результаты сортировки значений и распределений по вычисленным группам, согласно формуле Стерджесса, составило 6 для 21 значения вычисленных погрешностей. На **рис. 1** представлены гистограммы исследуемых отклонений, на **рис. 2** – гистограммы, построенные в программе STATISTICA.

Результаты оценки погрешностей по выбранным критериям приведены в **таблице**.

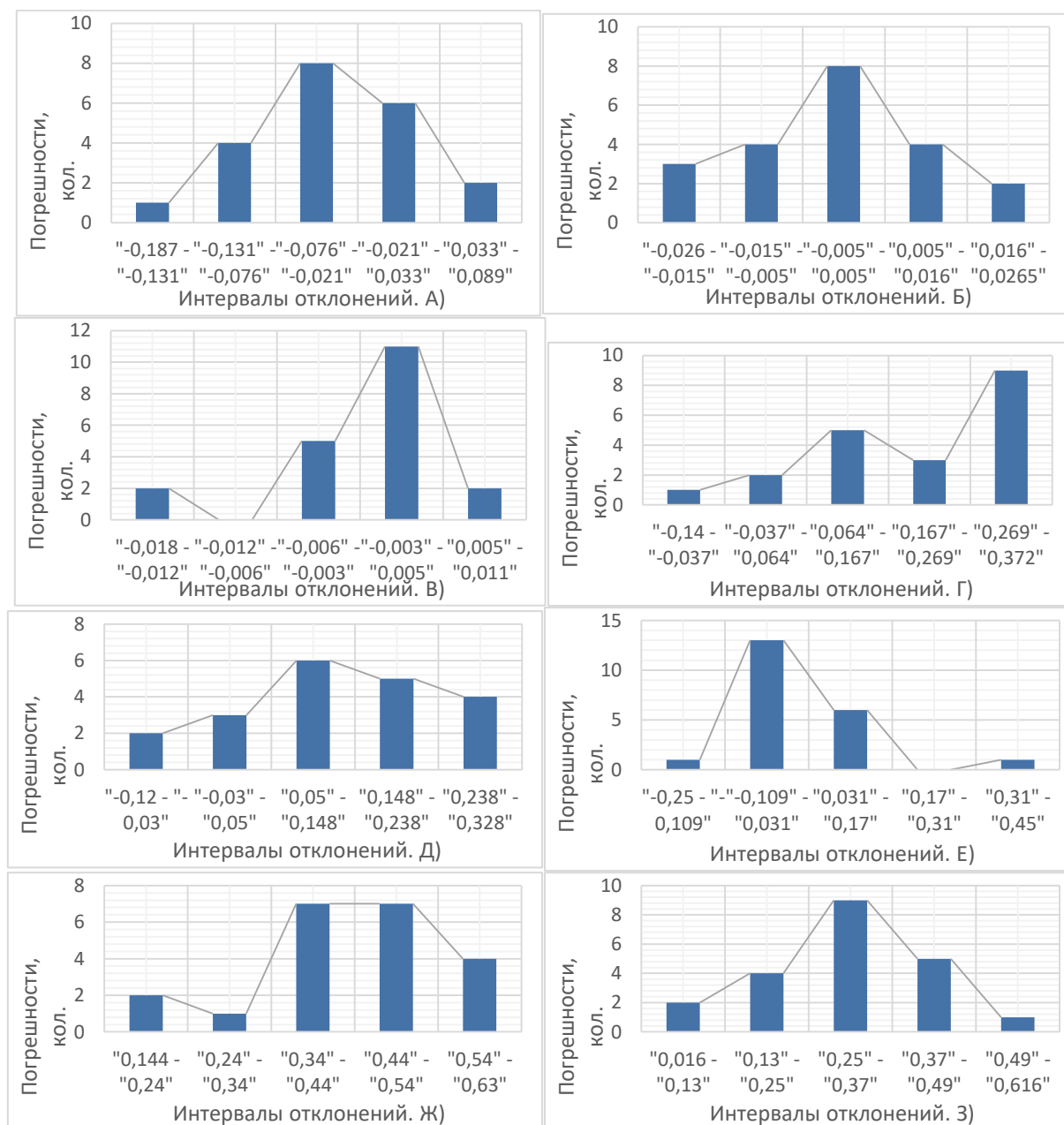


Рис. 1. Гистограммы распределений отклонений измерений электрических КИП:

А – цифровой ваттметр; Б – цифровой амперметр; В – цифровой омметр; Г – стрелочный вольтметр;

Д – цифровой вольтметр; Е – цифровой амперметр; Ж – стрелочный вольтметр; З – цифровой вольтметр

Fig. 1. Histograms of measurements deviations distributions of electrical control and measuring instruments:

A is digital wattmeter; Б is digital ammeter; В is digital ohmmeter; Г is pointer voltmeter; Д is digital voltmeter;

Е is digital ammeter; Ж is pointer voltmeter; З is digital voltmeter

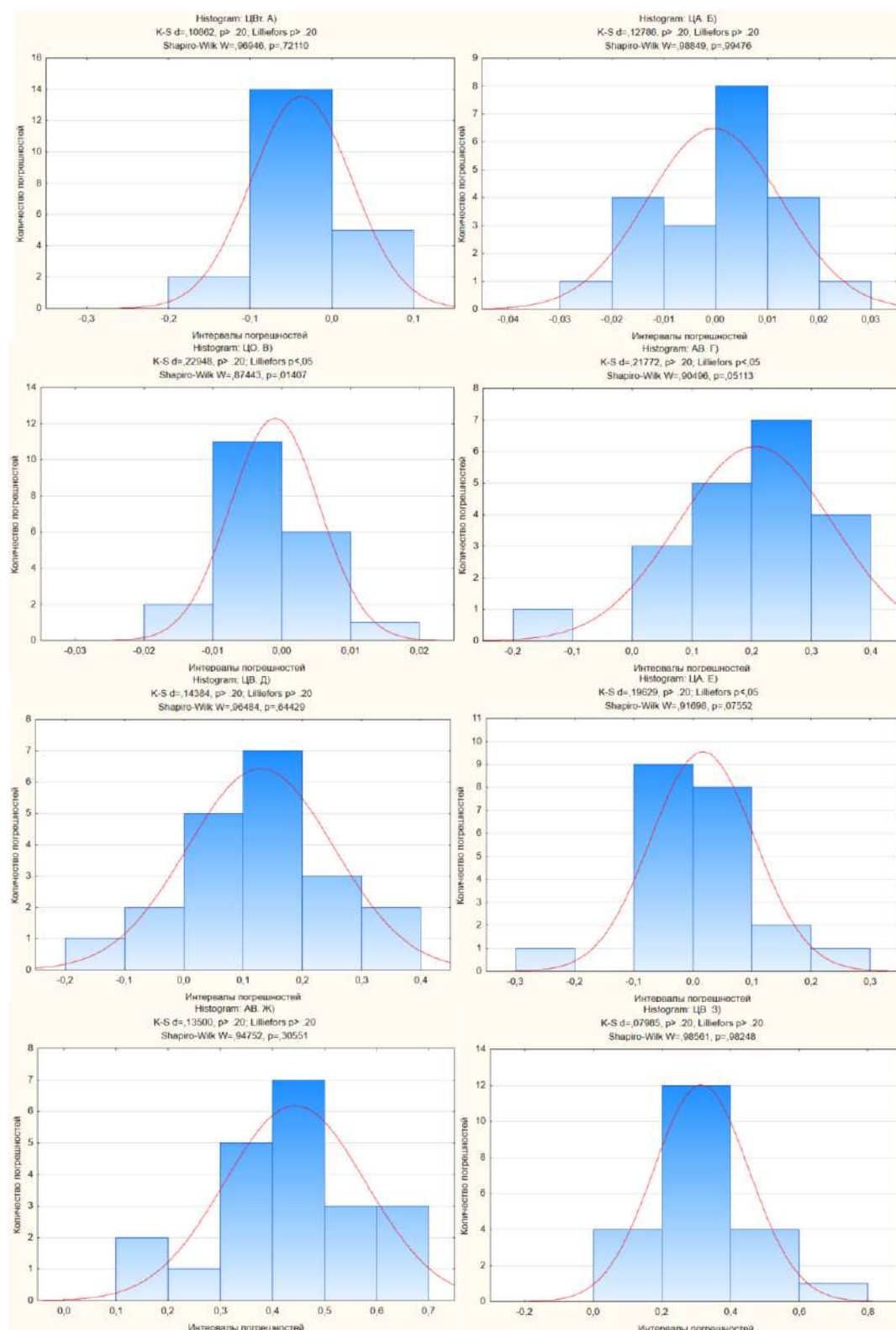


Рис. 2. Гистограммы распределений отклонений измерений электрических КИП в STATISTICA:

А – цифровой ваттметр; Б – цифровой амперметр; В – цифровой омметр; Г – стрелочный вольтметр; Д – цифровой вольтметр; Е – цифровой амперметр; Ж – стрелочный вольтметр; З – цифровой вольтметр

Fig. 2. Histograms of measurements deviations distributions of electrical control and measuring instruments in STATISTICA: A is digital wattmeter; Б is digital ammeter; В is digital ohmmeter; Г is pointer voltmeter; Д is digital voltmeter; Е is digital ammeter; Ж is pointer voltmeter; З is digital voltmeter

Таблица. Итоги расчетов критериев принятия нулевой гипотезы нормальности распределения погрешностей электрических КИП

Table. Results of calculations of criteria for accepting the null hypothesis of normality of the errors distribution in electrical control and measuring instruments

Прибор	Критерий			
	Пирсона ($\chi^2 = 11,3$)	Колмогорова-Смирнова	Лиллиефорса	Шапиро-Уилка ($p > 0,05$)
Цифровой ваттметр «А»	0,389	$P > 0,20$	$P > 0,20$	$P = 0,721$
Цифровой амперметр «Б»	1,904	$P > 0,20$	$P > 0,20$	$P = 0,994$
Омметр цифровой «В»	11,819	$P > 0,20$	$P < 0,05$	$P = 0,014$
Стрелочный вольтметр «Г»	9,585	$P > 0,20$	$P < 0,05$	$P = 0,05$
Цифровой вольтметр «Д»	2,429	$P > 0,20$	$P > 0,20$	$P = 0,644$
Цифровой амперметр «Е»	14,24	$P > 0,20$	$P < 0,05$	$P = 0,075$
Стрелочный вольтметр «Ж»	4,47	$P > 0,20$	$P > 0,20$	$P = 0,305$
Цифровой вольтметр «З»	1,016	$P > 0,20$	$P > 0,20$	$P = 0,982$

Для оценки нулевой гипотезы соответствия распределения экспериментальных значений нормальному ЗР по критерию Пирсона число степеней свободы составляло 3, что определяет оценочную величину равной 11,3 по таблице критических точек распределения для значимости в 0,01. Средние погрешности всех представленных измерительных приборов укладываются в показатель паспортной точности устройства.

Проводя анализ представленных гистограмм, можно заметить явное сходство с графиком распределения нормального закона. Данное замечание также подтверждают 24 критерия из 32 представленных, что составляет 75% от общей оценки. Можно отметить явно выделяющийся исследуемый КИП – омметр цифровой «В», поскольку критерии оценки Пирсона, Лиллиефорса и Шапиро-Уилка по данному прибору показали отклонение нулевой гипотезы. Проводя анализ гистограмм, можно отметить сходство формы графика с классическим колоколом: на **рис. 1** данная форма имеет левостороннюю асимметрию, при этом **рис. 2** показывает наиболее близкую форму к колоколу, хоть и с небольшой асимметрией вправо. Разница графиков обуславливается округлением исследуемых значений программой STATISTICA при построении графиков. Было проведено сравнение ручного вычисления и программного, при которых оценочные величины имели незначительные расхождения, например вычисленное значение критерия Шапиро-Уилка программой 0,848 и в ручном формате 0,785, что говорит о едином результате, несмотря на различия в вычисленных значениях. Стоит отметить, что критерий Пирсона достаточно близок к принятию нулевой гипотезы, при этом, если провести статистические операции исключения выбросов или увеличения интервалов построения гистограммы, значение данного критерия снизится до 9,76, а диаграмма распределения визуально приблизится к колоколообразной форме [13, 14]. Критерий Лиллиефорса также будет соответствовать принятию нулевой гипотезы, но по Шапиро-Уилка значение хоть и окажется близким к принятию, но составит 0,046.

В свою очередь, стрелочный вольтметр «Г» и цифровой амперметр «Е» при оценке распределения по-

грешностей, в которых по 2 критерия показали отклонение нулевой гипотезы, гистограммы на **рис. 1** отражают левостороннюю и правостороннюю асимметрию соответственно. При этом графики на **рис. 2** для стрелочного вольтметра «Г» также показывает левостороннюю асимметрию, а гистограмма для цифрового амперметра «Е» приближена к симметричному колоколу. Проводя схожие статистические операции, как и для цифрового омметра «В», описанные критерии согласия снижаются до принятия нулевой гипотезы и нормальности распределения [13, 14].

Оценочные критерии о нормальности распределения для КИП «А», «Б», «Д», «Ж» и «З» полностью принимают нулевую гипотезу. При этом сравнение графиков на **рис. 1 и 2** показывают общее сходство соответствующих зависимостей как между собой, так и между гистограммой нормального распределения.

Подводя краткий итог, учитывая изменение значений критериев при применении статистических приемов корректировки выборки, можно сказать, что при оценке погрешностей электрических измерительных устройств (ИУ) с точки зрения вероятности, достоверности и статистики возможно принимать ЗР Гаусса как общий. Полученный вывод подтверждает исследования ученых в данном вопросе [15, 16]. Полученные результаты открывают возможности использования методик, законов и выражений, свойственных нормальному ЗР, для оценки и анализа электрических погрешностей измерений.

Оценка характера изменения значений, необходимых для построения оперативной характеристики поверки качественной оценки электрических контрольно-измерительных приборов

Для осуществления расчета и построения ОХП необходимо произвести определение таких ключевых параметров, как среднеквадратическое отклонение (СКО), дисперсия, математическое ожидание и вероятность точности. В описанном ранее стандарте на достоверность и требования к методике поверки приводятся зависимости, используемые при построении ключевой зависимости:

$$L(x) = \int_{-y}^y \varphi(\bar{x} / x) d\bar{x}. \quad (1)$$

$L(x)$ является определяющим выражением ОХП, которая характеризуется как условная плотность распределения вероятностей нормализованной оценки \bar{x} , где значение x является отношением контролируемой характеристики к модулю её предельного значения [4].

В научном труде [17] осуществляется фактическое сравнение автоматизированного процесса поверки и классической аттестации вручную оператором. В качестве сравнительных величин и зависимостей приводятся классические формулы вычисления статистических и вероятностных значений, используемых для графического представления ОХП. В статье представленные результаты получены с учетом принятия соответствия нормальности распределения погрешностей измерений, о чем было сказано выше в тексте настоящего труда. Общая методика вычислений величин для анализа и выявления ключевых параметров для построения ОХП взяты из материалов научного труда об оценке влияния автоматизации на поверку, а также методических указаний к проведению практических исследований на тему метрологической аттестации и поверки [17, 18].

Погрешность электрических измерений возможно оценить как вероятность попадания вычисленного отклонения в заданный паспортный диапазон точности. В общем смысле при проведении поверки электрических КИП всегда вычисляется среднее значение отклонения. В теории вероятности существует распространенная формула определения вероятности попадания случайной величины в заданный интервал. Для нормального распределения данная зависимость математически похожа на ключевую формулу ОХП, приведенную в стандарте МИ 187-86, и выглядит следующим образом:

$$P(x_1 \leq \Delta \leq x_2) = \Phi\left(\frac{x_2 - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_1 - \mu}{\sigma}\right). \quad (2)$$

Для обеспечения оценки отклонений измерений, согласно представленным соотношениям, необходимо произвести вычисление средних показателей отклонения, характеризующих распределение полученных погрешностей. Ключевым в данном случае является среднее квадратическое отклонение, характеризующее, насколько могут отклоняться исследуемые величины от ожидаемого результата. Для вычисления данных показателей необходимо произвести вычисление математического ожидания:

$$\Delta x_{\text{откл.}} = |x_{\text{э.}} - x_{\text{изм.}}|, \quad (3)$$

$$\mu_{\text{откл.}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \Delta x_{\text{откл.}}}{n}. \quad (4)$$

В данных выражениях ключевыми параметрами являются сами погрешности, как модуль разницы между эталонным измерением и исследуемым. Модуль взят по причине исключения влияния отрицательных значений

на оценку отклонения, поскольку в таком учете наиболее ожидаемым результатом может получиться ноль. Дополнительными доводами является то, что для расчета дисперсии используется квадрат разности и рассмотрение ОХП как вероятностной исключительно в положительных значениях.

Определив математическое ожидание как наиболее предполагаемую величину и зная каждое вычисленное отклонение, возможно вычислить дисперсию, являющуюся мерой разброса оцениваемых значений. В свою очередь вычислив квадратный корень из дисперсии, получается среднее квадратическое отклонение, являющееся стандартным отклонением проводимых измерений или мерой разброса погрешностей от математического ожидания:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (\Delta x_{\text{откл.}} - \mu_{\text{откл.}})^2}{n-1}, \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{D}. \quad (6)$$

Далее возможно воспользоваться формулой (2) для определения вероятности попадания исследуемого значения в заданный интервал, при этом не будут учтены особенности анализируемого электрического КИП, такие как точность прибора в прямой зависимости с его статистическими величинами. Для этого необходимо конкретизировать оценочные параметры, влияющие на расчет вероятности корректности определения годности ИУ. Учитывая опорные величины из формулы (1), необходимо уточнить математическое ожидание и СКО.

Числитель зависимости возможно рассмотреть как отношение средней приведенной погрешности измерений к пределу допускаемого отклонения. Данная величина характеризует, насколько сильно исследуемый электрический КИП отклоняется от паспортной точности, чем ближе значение к 1, тем больше значение погрешности отражает ИУ.

$$\Delta x_{\text{прив.}} = \frac{|x_{\text{э.}} - x_{\text{изм.}}| \cdot 100}{x_{\text{норм.}}}, \quad (7)$$

$$\Delta x_{\text{прив.ср.}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \Delta x_{\text{прив.}}}{n}, \quad (8)$$

$$b = \frac{\Delta x_{\text{прив.ср.}}}{\Delta x_{\text{паспорт.}}}. \quad (9)$$

Полученное значение b в данном случае принимается как наиболее ожидаемое значение отклонения прибора с учетом паспортной точности исследуемого КИП, являясь оценочным значением как математическое ожидание. Также параметр b укладывается в выражение ОХП из стандарта МИ 187-86, где числителем является отношение оценки контролируемой характеристики к модулю предельного значения, что точно отражает введенная величина [4].

Полученное ранее СКО исследуемой погрешности является контролируемой характеристикой как разброс

значений относительно средней. Отношение данной величины к предельно допустимому значению паспортной точности является знаменателем выражения ОХП согласно зависимости из МИ 187-86 [4]. СКО необходимо представить в процентном эквиваленте для возможности вывода отношения нормирующей величины, при этом выводимый параметр должен коррелировать с паспортной точностью, как с предельно допустимым значением. Для этого необходимо определиться с максимально возможной величиной СКО в формате измерений. Учитывая связь и вычисление приведенной погрешности с учетом нормирующей величины КИП, а также необходимость установки связи между паспортной точностью, логично выбрать именно нормирующую величину в качестве максимально возможного СКО, поскольку оно является максимально возможным 100%-м отклонением при выключенном приборе. В данном случае возможность получения наиболее неадекватных величин, не учитывая конструктивные особенности прибора, не рассматривается. Таким образом, получим формулы представления полученной СКО погрешностей измерений в процентном эквиваленте относительно паспортной точности, а также отношения полученной величины к паспортной точности прибора:

$$\sigma_{\%} = \frac{\sigma \cdot 100}{x_{\text{норм.}}}, \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{относ.}} = \frac{\sigma_{\%}}{\Delta x_{\text{паспорт.}}}. \quad (11)$$

Поскольку паспортная точность электрических КИП подразумевает возможность проявления как отрицательной, так и положительной величины, устанавливается интервал допустимых погрешностей от $-\Delta x_{\text{паспорт.}}$ до $\Delta x_{\text{паспорт.}}$. Таким образом, произведем вывод итоговой зависимости ОХП, с учетом выведенных статистических значений, характеризующих отклонения исследуемого КИП с учетом паспортных данных.

$$P_{\text{год.}}(-\Delta x_{\text{паспорт.}} \leq x \leq \Delta x_{\text{паспорт.}}) = \Phi\left(\frac{\Delta x_{\text{паспорт.}} - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{-\Delta x_{\text{паспорт.}} - \mu}{\sigma}\right), \quad (12)$$

$$P_{\text{год.}} = \Phi\left(\frac{\Delta x_{\text{паспорт.}} - \mu}{\sigma}\right) - \left(1 - \Phi\left(\frac{\Delta x_{\text{паспорт.}} + \mu}{\sigma}\right)\right), \quad (13)$$

$$P_{\text{год.}} = \Phi\left(\frac{\Delta x_{\text{паспорт.}} - \mu}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{\Delta x_{\text{паспорт.}} + \mu}{\sigma}\right) - 1, \quad (14)$$

$$P_{\text{год.}} = \Phi\left(\frac{1-b}{\sigma_{\text{относ.}}}\right) + \Phi\left(\frac{1+b}{\sigma_{\text{относ.}}}\right) - 1. \quad (15)$$

В формуле (13) используется свойство нечетной функции Лапласа, а в (15) вводится математическое ожидание и СКО с учетом отношения к паспортной точности прибора, при этом исключается данное значение

из левой части числителей функции через сокращение дроби.

Построение универсальной оперативной характеристики поверки

Стоит отметить, что полученная зависимость устанавливает вероятность для одной определенной точки вычисленной точности, поскольку изменение данного параметра напрямую зависит от изменения погрешности, что также сказывается на математическом ожидании и СКО. Согласно результатам проведенного моделирования, в случае изменения точек измерений при одной и той же средней приведенной точности вероятность и соответствующая ей точка в начале графика ОХП не изменяется, при этом примерно в центре устанавливается диапазон разброса значений с дальнейшим сведением в точку 50%. Несмотря на выявленный диапазон разброса значений, такая характеристика может применяться для приборов одинаковой паспортной точности, что говорит об универсальности характеристики. Но поскольку представленное вычисление учитывает точность прибора, то есть приведенную погрешность, устанавливается зависимость от максимального значения шкалы, что говорит о невозможности применения одной ОХП для КИП одного класса точности, но разного диапазона измерений, ввиду разных максимальных значений. Данный факт также подтверждается конструктивными различиями в механизме отображения электрической величины таких ИУ. В результате моделирования были получены значения вероятности и построена ОХП для прибора класса точности 2,5% и максимальным значением шкалы 250 вольт (рис. 3).

Моделирование результатов отклонений проводилось с учетом установленной ранее принадлежности погрешностей электрических измерений нормального ЗР. В имитации погрешностей и расчете вероятностей учитывалось требование, что в случае превышения заявленной паспортной точности хотя бы одного измерения из выборки в результате проведения поверки такой электрический КИП признается негодным. Такое ложное принятие относится ко 2-му роду статистических ошибок. На рис. 3 видны все отдельные значения, расположенные под средней кривой, именно данные величины относятся к измерениям с минимум одной погрешностью, превышающей точность прибора. Разницу между полученными вероятностями в одной и той же точке отношения средней погрешности к паспортной точности возможно объяснить математическим округлением программы при расчете и автоматическим подбором функции Лапласа из таблицы, что может в некоторой степени искажать вычисления. Также не стоит забывать про особенность моделирования и статистические выбросы, то есть в некоторых имитациях погрешностей получалось одно или более значений, превышающих паспортную точность, а также многие величины могли быть достаточно близки к допустимому граничному значению. Изменяющееся значение СКО также может оказывать свое влияние на округления и выбор значений из таблицы Лапласа, поскольку незначительно в одной точке данный параметр может отклоняться.

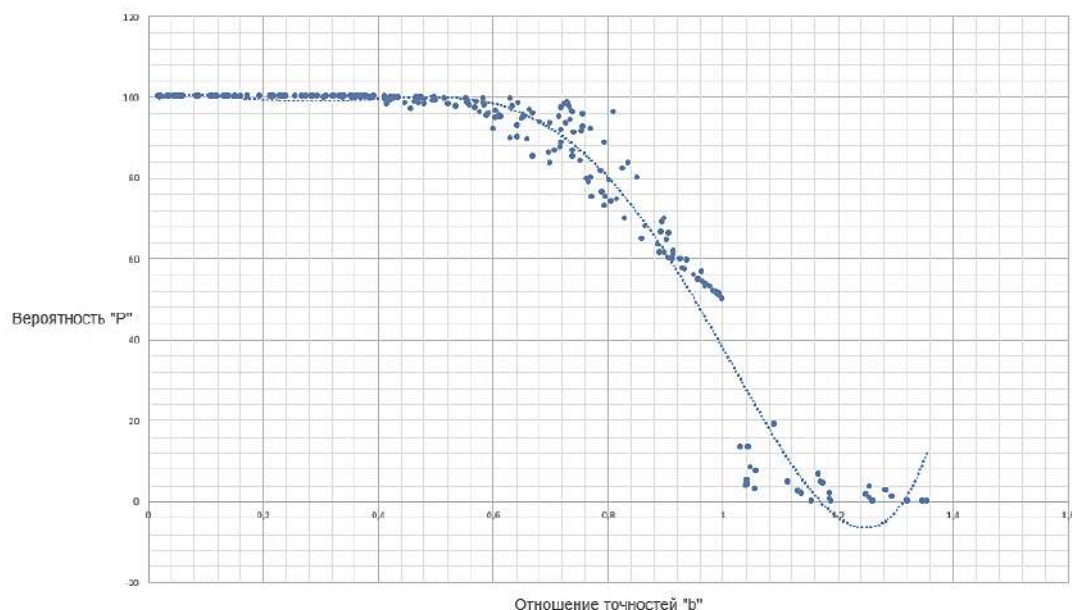


Рис. 3. Универсальная оперативная характеристика поверки для прибора класса точности 2,5
Fig. 3. Universal operational verification characteristics for a device of accuracy class 2.5

Стоит отметить, что нельзя учитывать только значения с минимальной расчетной вероятностью в полученной точке, поскольку в таком случае возможно проявление ошибки 1-го рода, то есть отклонение в действительности годного КИП. Учитывая среднее превышение вероятности в точках повышенной концентрации возникновения выбросов, предлагается установить область достоверности в максимум 5% от минимальных расчетных вероятностей и принимать приборы с таким значением в действительности годными для приведения статистических ошибок 1-го и 2-го рода в равновесную точку. Дополнительно необходимо уточнить корректировку межповерочного интервала или возможное изменение класса точности такого КИП. Начало данного допустимого интервала предлагается принять со значений отношения средней погрешности к паспортной точности 0,6 до 0,85, поскольку именно в данном диапазоне максимальное количество разбросанных значений.

Полученную ОХП можно назвать универсальной для ИУ одного класса точности и максимального значения нормируемой величины и применять её для оценки качества производства или поверки электрических цифровых или стрелочных КИП без необходимости нового вычисления вероятности для отдельного устройства. Достаточно оценить отношение средней приведенной погрешности к паспортной точности прибора и установить соответствие с кривой ОХП.

Заключение

Качество электрического КИП характеризует его способность корректно выполнять заявленные функции, а именно с наибольшей степенью точности отображать измеряемую электрическую величину. Выведенная ОХП помогает произвести оценку вероятности отображения ИУ корректных значений, при этом область

ошибки демонстрирует возможность проявления комбинации таких отклонений, при которых средняя величина погрешностей будет меньше, чем паспортная точность. В рамках исследования было введено понятие 5% области достоверности, отображающее комбинации значений, при которых ни одно измерение не превысило паспортную точность, несмотря на близость погрешности такого измерения к граничной величине. В результате проводимого моделирования удалось установить диапазон с концентрацией подобных выбросов, начинающийся приблизительно от 0,6 до 0,83. Далее не имеет смысла сравнивать значения, поскольку по результатам ОХП такие КИП являются негодными, несмотря на меньшую величину средней приведенной погрешности, чем паспортная точность исследуемого ИУ, по причине нахождения в выборке единичных отклонений, превышающих граничные значения.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что пороговое значение годности по отношению точностей электрического КИП к паспортной точности для прибора максимальной погрешности в 2,5 является 0,75. Аттестация такого КИП должна сопровождаться сокращением межповерочного интервала, поскольку с наибольшей вероятностью точность такого прибора будет падать намного быстрее. При этом сам ИУ стоит отнести к отдельной категории годности или понизить его значение паспортной точности. В контексте качества проводимых мероприятий поверки полученное значение возможно трактовать как качественную границу годности электрического КИП.

Как описывалось в материалах научного исследования, универсальность представленной ОХП заключается в возможности ее применения к ИУ подобной точности и максимального значения при разных величинах средней погрешности приборов. Примером также явля-

ются цифровые и стрелочные КИП с одинаковыми паспортными значениями.

Список источников

1. Лисютин А.И. Качество продукции: понятие и характеристики качества // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. №3. С. 282-285.
2. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. Введ. 1979-07-01. М.: Стандартинформ, 2009. 21 с.
3. РД 50-605-86. Методические указания по применению стандартов на статистический приемочный контроль. Введ. 1987-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1986. 44 с.
4. МИ 187-86. Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Достоверность и требования к методикам поверки средств измерений. Введ. 1987-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1987. 12 с.
5. Метрологические аспекты распределений вероятностей непрерывных и дискретных величин в электрических измерениях / Савкова Е.Н., Лагунов Д.В., Науменко М.В., Бороденко И.М. // Материалы Республиканской научно-практической конференции. Минск, 2021. С.145-151.
6. Гржибовский А.М., Иванов С.В., Горбатова М.А. Описательная статистика с использованием пакетов статистических программ STATISTICA и SPSS // Наука и здравоохранение. 2016. №1. С. 7-23.
7. Боровиков В.П. Популярное введение в программу STATISTICA. М.: КомпьютерПресс, 1998. 267 с.
8. Критерий Пирсона: сущность и применение метода на практике / Светличная В.Б., Матвеева Т.А., Зотова С.А., Стецкова В.В. // Материалы IX Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». М., 2017.
9. Орлов А.И. Непараметрические критерии согласия Колмогорова, Смирнова, омега-квадрат и ошибки при их применении // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 97.
10. Кайда А.Ю., Рыбаченко И.А. Проверка согласованности атрибутов набора данных с нормальным законом распределения // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 2021. С. 351–352.
11. Precision statistics: neuroet networking of Chi-square test and Shapiro-Wilk test in the analysis of small selections of biometric data / Ivanov A.I., Vjatchanin S.E., Malygina E.A., Lukin V.S. // Надежность и качество сложных систем. 2019. №1. С. 27–34.
12. Лемешко Б.Ю., Рогожников А.П. О нормальности погрешностей измерений в классических экспериментах и мощностях критериев, применяемых для проверки отклонения от нормального закона // Метрология. 2012. № 5. С. 3–26.
13. Гапеева В.Д., Цыбенко В.А., Фаюстов А.А. Отсевание грубых погрешностей результатов измерений с помощью различных критериев в среде Excel // Молодой ученый. 2021. № 49. С. 20–27.
14. Миронычев В.Н., Титов П.Л. Метрология, стандартизация и сертификация. Владивосток: ДФУ, 2015. 141 с.
15. Pender P. A. Law of ordinal random error: The Rasch measurement model and random error distributions of ordinal assessments // Measurement. 2019, pp. 771-781.
16. Simkin G.S. Normal law of measurement error distribution // Measurement Techniques. 2024, pp. 271-271.
17. Теоретическая оценка влияния автоматизации на производственный процесс поверки контрольно-измерительных приборов / Бобрышов А.П., Солёный С.В., Сержантова М.В., Кузьменко В.П., Создательева М.Э., Рудаков Р.В. // Ядерная физика и инжиниринг. 2023. № 6. С. 571–577.
18. Барина О.А., Назаров В.Н. Метрологическая аттестация и поверка погрешности. Поверки измерительных приборов. Влияние погрешности поверки на оценку годности. Построение оперативной характеристики поверки. Критерии качества поверки средств измерений: методические указания по выполнению комплекса лабораторно-практических исследований. СПб., 2009. 15 с.

References

1. Lisutina A.I. Product quality: concept and characteristics of quality. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tula State University. Technical sciences], 2020;(3):282-285. (In Russ.)
2. State standard GOST 15467-79. Product quality management. Basic concepts. Terms and definitions. Moscow: Standards Publishing House, 2009, 21 p. (In Russ.)
3. Regulatory document RD 50-605-86. Methodological guidelines for the application of standards for statistical acceptance control. Moscow: Standards Publishing House, 1986, 44 p. (In Russ.)
4. MI 187-86. Methodological guidelines. State system for ensuring the uniformity of measurements. Reliability and requirements for verification methods of measuring instruments. Moscow: Standards Publishing House, 1987, 12 p. (In Russ.)
5. Savkova E.N., Lagunov D.V., Naumenko M.V., Borodenok I.M. Metrological aspects of probability distributions of continuous and discrete quantities in electrical measurements. *Materialy Respublikanskoy nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proceedings of republican scientific and practical conference]. Minsk, 2021, pp.145-151. (In Russ.)
6. Grzhibovsky A.M., Ivanov S.V., Gorbatova M.A. Descriptive statistics using statistical software packages STATISTICA and SPSS. *Nauka i zdavooohranenie* [Science and Healthcare], 2016;(1):7-23.
7. Borovikov V.P. *Populyarnoe vvedenie v programmu STATISTICA* [Popular introduction to the STATISTICA program]. Moscow: ComputerPress, 1998, 267 p.
8. Svetlichnaya V.B., Matveeva T.A., Zotova S.A., Stetskova V.V. Pearson's criterion: the essence and application of the method in practice. *Materialy IX Mezhduнародnoy studencheskoy nauchnoy konferencii «Studencheskiy nauchnyy forum»* [Proceedings of the IX International Student Scientific Conference "Student Scientific Forum"]. Moscow, 2017.
9. Orlov A.I. Nonparametric goodness-of-fit tests of Kolmogorov, Smirnov, omega-square and errors in their application. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*

- [Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], 2014;(97).
10. Kaida A.Yu., Rybachenko I.A. Checking the consistency of data set attributes with the normal distribution law. *Molodezh i sovremennye informatsionnye tekhnologii: sbornik trudov XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodyh uchyonyh* [Youth and modern information technologies. Proceedings of the XVIII International scientific and practical conference of students, postgraduate students and young scientists]. Tomsk, 2021, pp. 351-352. (In Russ.)
 11. Ivanov A.I., Vjatchanin S.E., Malygina E.A., Lukin V.S. Precision statistics: neuroet networking of Chi-square test and Shapiro-Wilk test in the analysis of small samples of biometric data. Reliability and quality of complex systems. 2019;(1):27-34.
 12. Lemeshko B.Yu., Rogozhnikov A.P. On the normality of measurement errors in classical experiments and the power of criteria used to check for deviations from the normal law. *Metrologiya* [Metrology], 2012;(5):3-26. (In Russ.)
 13. Gapeeva V.D., Tsybenko B.A., Fayustov A.A. Filtering out gross errors in measurement results using various criteria in the Excel environment. *Molodoy ucheniy* [Young scientist], 2021;(49):20-27.
 14. Mironychev V.N., Titov P.L. *Metrologiya, standartizatsiya i sertifikatsiya* [Metrology, standardization and certification]. Vladivostok: FEFU, 2015, pp. 141.
 15. Pender P.A. Law of ordinal random error: The Rasch measurement model and random error distributions of ordinal assessments. *Measurement*. 2019:771-781.
 16. Simkin G.S. Normal law of measurement error distribution. *Measurement Techniques*. 2024:271-271.
 17. Bobryshov A.P., Solenyi S.V., Serzhantova M.V., Kuzmenko V.P., Sozdateleva M.E., Rudakov R.V. Theoretical assessment of the influence of automation on the production process of verification of measuring instruments. *Yadernaya fizika i inzhiniring* [Nuclear Physics and Engineering], 2023;(6):571 - 577.
 18. Barinova O.A., Nazarov V.N. Metrological certification and verification of error. Verification of measuring instruments. The influence of verification error on the assessment of suitability. Design of operational verification characteristics. Quality criteria for verification of measuring instruments. Methodical instructions for the implementation of a set of laboratory and practical studies. Saint Petersburg, 2009, 15 p.

Поступила 08.08.2024; принята к публикации 16.10.2024; опубликована 28.03.2025
Submitted 08/08/2024; revised 16/10/2024; published 28/03/2025

Бобрышов Алексей Павлович – аспирант, ассистент кафедры электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университета аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия.
Email: ap.bobryshov@mail.ru. ORCID 0009-0009-6220-8206

Кузьменко Владимир Павлович – кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия.
Email: mr.konnny@gmail.com. ORCID 0000-0002-0270-4875

Солёный Сергей Валентинович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия.
Email: ssv555ssv@yandex.ru. ORCID 0000-0002-7919-3890

Квас Евгений Станиславович – старший преподаватель кафедры электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия.
Email: kvas66@bk.ru. ORCID 0000-0001-5164-8454

Aleksey P. Bobryshov – Postgraduate Student, Assistant of the Department of Electromechanics and Robotics, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia.
Email: ap.bobryshov@mail.ru. ORCID 0009-0009-6220-8206

Vladimir P. Kuzmenko – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Electromechanics and Robotics. Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia.
Email: mr.konnny@gmail.com. ORCID 0000-0002-0270-4875

Sergey V. Solyony – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Electromechanics and Robotics. Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia.
Email: ssv555ssv@yandex.ru. ORCID 0000-0002-7919-3890

Evgeny S. Kvas – Senior Lecturer at the Department of Electromechanics and Robotics. Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia.
Email: kvas66@bk.ru. ORCID 0000-0001-5164-8454

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.793 : 519.21
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-149-157

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

Полякова М.А.¹, Извеков Ю.А.¹, Самодурова М.Н.², Трофимова С.Н.², Шеметова В.В.¹,
Ярушина Д.В.²

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет (национальный университет), Челябинск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Для обеспечения необходимых свойств поверхности изделий широко применяются различные методы нанесения покрытий. Покрытие и изделие, на которое оно наносится, представляют собой систему, свойства которой зависят от многих факторов, к которым относятся материал покрытия и изделия, метод и режимы нанесения покрытия, также следует учитывать одновременное присутствие управляющих, неконтролируемых и возмущающих параметров процесса нанесения покрытия. С этой точки зрения актуальной задачей является разработка математического аппарата, позволяющего определять вероятность получения функциональных свойств покрытий с учетом внешних условий эксплуатации изделия. **Целью работы** является разработка теоретического подхода, позволяющего прогнозировать вероятность получения функциональных свойств покрытий с учетом наличия различных влияющих факторов. **Используемые методы.** Системный анализ, функциональный анализ, теория вероятностей, цепи Маркова, матричное исчисление, метод Монте-Карло. **Новизна.** С использованием теории вероятностей разработан математический аппарат, позволяющий вычислять вероятность получения функциональных свойств порошковых покрытий, наносимых газотермическими методами. **Результат.** С использованием последовательного преобразования матриц получено стационарное распределение вероятности нахождения системы «изделие с покрытием» в различных состояниях, которое не зависит от начального состояния системы. С использованием метода Монте-Карло определен предельный стационарный режим процесса. Установлена высокая сходимость результатов расчета вероятности получения функциональных свойств покрытий. Это свидетельствует о корректности разработанного математического аппарата. **Практическая значимость.** Полученные результаты теоретических исследований могут быть адаптированы для определения вероятности получения свойств покрытий различного состава, которые получены различными методами нанесения.

Ключевые слова: порошковое покрытие, функциональное свойство, газотермический метод, вероятность прогнозирования, цепи Маркова, матричное исчисление, метод Монте-Карло

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-20054, <https://rscf.ru/project/23-19-20054/> и при поддержке Правительства Челябинской области.

© Полякова М.А., Извеков Ю.А., Самодурова М.Н., Трофимова С.Н., Шеметова В.В., Ярушина Д.В., 2025

Для цитирования

Прогнозирование вероятности получения функциональных свойств порошковых покрытий / Полякова М.А., Извеков Ю.А., Самодурова М.Н., Трофимова С.Н., Шеметова В.В., Ярушина Д.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 149-157. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-149-157>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

PREDICTING THE PROBABILITY OF OBTAINING THE FUNCTIONAL PROPERTIES OF POWDER COATINGS

Polyakova M.A.¹, Izvekov Yu.A.¹, Samodurova M.N.², Trofimova S.N.², Shemetova V.V.¹, Yarushina D.V.²

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). To ensure the required surface properties of products, various coating methods are widely used. The coating and the product to which it is deposited are a system which properties depend on many factors, including material of the coating and the product, the method and modes of deposition, and the simultaneous presence of controlling, uncontrolled and disturbing parameters of the coating process. From this point of view, an urgent task is to develop a mathematical apparatus that makes it possible to determine the probability of obtaining the functional properties of coatings, taking into account the external operating conditions of the product. **Objectives.** The aim is to develop a theoretical approach that makes it possible to predict the probability of obtaining the functional properties of coatings, taking into account the presence of various influencing factors. **Methods Applied.** System analysis, functional analysis, theory of probability, Markov chains, matrix analysis, and the Monte Carlo method were used in the study. **Originality.** Using theory of probability, a mathematical apparatus has been developed that makes it possible to calculate the probability of obtaining the functional properties of coatings from powdered materials deposited by gas thermal spraying. **Result.** Using a sequential transformation of matrices, a stationary probability distribution of finding the “coated product” system in various states was obtained, which does not depend on the initial state of the system. Using the Monte Carlo method, the limiting stationary mode of the process was determined. A high convergence of the results of calculating the probability of obtaining the functional properties of coatings has been established. This indicates the correctness of the developed mathematical apparatus. **Practical Relevance.** The obtained results of theoretical studies can be adapted to determine the probability of obtaining the properties of coatings of various compositions, which are obtained by different methods of deposition.

Keywords: powdered coating, functional property, gas-thermal method, forecasting probability, Markov chain, matrix calculus, Monte Carlo method

The work was supported by the Russian Science Foundation and the Government of the Chelyabinsk Region, Project No. 23-19-20054, <https://rscf.ru/en/project/23-19-20054/>.

For citation

Polyakova M.A., Izvekov Yu.A., Samodurova M.N., Trofimova S.N., Shemetova V.V., Yarushina D.V. Predicting the Probability of Obtaining the Functional Properties of Powder Coatings. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 149-157. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-149-157>

Введение

Целью любого процесса нанесения покрытия является получение определенного уровня функциональных свойств, что необходимо для обеспечения работоспособности изделия с покрытием в определенных условиях эксплуатации. Поэтому при разработке математических моделей, которые формализуют как процессы нанесения покрытий, так и процессы формирования их функциональных свойств, следует использовать аппараты. Наличие различных факторов, которые в той или иной степени оказывают влияние на свойства получаемого покрытия, является основанием для использования аналитических и численных задач оптимизации. При этом следует учитывать, что параметры состояния покрытия носят в определенной степени случайный характер вследствие наличия нерегулируемых параметров или воз-

мущающих факторов, всегда присутствующих в процессах нанесения покрытий. Поэтому для прогнозирования получения свойств покрытий необходимо учитывать вероятность происхождения того или иного события. Специфика существующих методов решения задач оптимизации с нечеткими переменными, состоящая в построении нечетких множеств цели и допустимых выборов и их пересечения, кроме чрезвычайно высокой математической сложности, не устраняет неопределенности в выборе решения, даже если в силу физических особенностей модели решение должно быть только однозначным [1-3].

Задачи оптимизации относятся к достаточно сложным теоретическим задачам, для решения которых необходимо разрабатывать специальные методы, которые условно делят на прямые и непрямые [4-6]. Применение прямых методов решения задач стохастической оптимизации позволяет получить непо-

средственный результат как решение системы дифференциальных уравнений, описывающих соответствующие процессы [7-9]. В случае использования непрямых методов используют аппарат теории вероятностей и математической статистики [10, 11].

Поскольку целью данного теоретического исследования является определение вероятности получения функциональных свойств покрытий, то данную задачу можно решать с использованием прямых методов решения стохастических задач. Данный подход особенно эффективен при определении вероятности получения функциональных свойств покрытий, получаемых газотермическими методами с использованием в качестве исходных материалов порошковых композиций сложного состава. Как известно, к методам газотермического напыления относятся газопламенное напыление, плазменное напыление, детонационное напыление, холодное газодинамическое напыление и другие методы, основанные на использовании теплоты сгорания газов и их кинетической энергии для разогрева, ускорения и переноса порошкового материала на подложку. При этом покрытие наращивается непрерывно, как результат падения отдельных частиц, что обуславливает характерное для таких покрытий слоистое строение. Одной из тенденций получения покрытий такими методами является использование в качестве исходных материалов смеси порошков, которые в покрытии образуют высокоэнтропийные соединения [12-14]. Данный подход представляет значительный интерес как со стороны исследователей [15-17], так и с точки зрения обеспечения уникальных функциональных свойств, характерных для данного вида материалов [18-20]. Однако наличие большого количества управляющих факторов наряду с нерегулируемыми параметрами, которые в конечном итоге будут определять функциональные свойства покрытия, требуют разработки математических моделей, позволяющих рассчитывать вероятность получения функциональных свойств порошковых покрытий из высокоэнтропийных соединений при газотермических методах их нанесения.

Методы решения

Процесс нанесения покрытия в общем виде можно представить как переход системы из одного состояния в другое, причем каждый акт такого перехода происходит в конкретный промежуток времени. Конечным результатом таких переходов является изделие с покрытием, обладающее необходимыми функциональными свойствами. В общем виде переход системы из исходного состояния в конечное можно представить в виде вектора. При прогнозировании искомого вектора состояния, в котором будут находиться необходимые полученные функциональные свойства в результате рассматриваемых процессов

нанесения покрытий, будем рассматривать задачу как стохастическую и воспользуемся уравнением

$$\frac{\partial \omega_i}{\partial t} = \sum_j (P_{ij} \omega_j - P_j \omega_i), \quad (1)$$

где ω_i – вероятность нахождения системы в состоянии i , характеризуемом набором характеристик i (квантовых чисел); P_{ij} – вероятность перехода в единицу времени из состояния j в состояние i , $P_{ij} \geq 0$.

Вероятности ω_i представляют собой диагональные элементы статистического оператора в собственном представлении.

Уравнение (1) легко выводится на основе других уравнений, например с помощью уравнения М.В. Смолуховского [21]. Оно сохраняет нормировку распределения вероятностей и является уравнением релаксационного типа: описываемая этим уравнением система получения свойств материалов с течением времени необратимо релаксирует к некоторому не зависящему от времени стационарному состоянию. Выбор того или иного модельного представления для вероятностей переходов P_{ij} позволяет использовать это уравнение для описания стохастического процесса получения новых свойств материалов.

Перепишем уравнение (1) для удобства математического исследования в матричном виде для вектора состояния W с компонентами ω_i :

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \Lambda W, \quad (2)$$

где Λ – матрица перехода с элементами,

$$\Lambda_{ij} = P_{ij} - \delta_{ij} \sum_k P_k. \quad (3)$$

Так как вероятности переходов P_{ij} вещественны, то матрица Λ будет эрмитовой, то есть ее собственные значения вещественны, а собственные векторы – ортогональны. Формальное решение уравнения (2) запишем в виде

$$W(t) = e^{t\Lambda} W(0), \quad (4)$$

где $W(0)$ – вектор состояния в начальный момент времени.

Проверим полученные уравнения на модельном примере (рис. 1).

Из полученных данных видно, что распределение вероятностей необратимо релаксирует к некоторому не зависящему от времени состоянию. Однако такой подход значительно упрощает поставленную задачу и может привести к неадекватному результату.

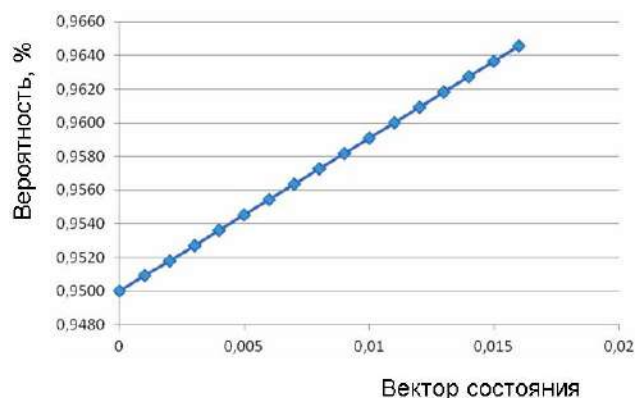


Рис. 1. Оценка вероятности получения функциональных свойств покрытий (проверочный расчет)

Fig. 1. Assessment of the probability of obtaining the functional properties of coatings (verification calculation)

Если рассматривать искомые функциональные свойства как последовательность случайных векторов, то можно сформулировать предельные теоремы, подобные тем, которые приводятся для последовательностей случайных величин. Продемонстрируем это на примере законов больших чисел. В формулировке этих законов обычно используют сходимость по вероятности. В рассматриваемом случае нанесения покрытий можем использовать случайные векторы как элементы гильбертова пространства, которое в теории вероятностей называется среднеквадратической (или сильной) сходимостью. Гильбертово пространство — это линейное бесконечномерное пространство, в котором задано скалярное произведение и выполнено условие полноты относительно нормы, порождаемой этим скалярным произведением [22–24]. В рассматриваемом случае имеем действительное гильбертово пространство, а так как для решения задачи используем методы линейной алгебры, то и операторы будут линейными. В упрощенном виде можно сказать, что линейным оператором является матрица. Ее элементы могут быть разнообразными — от чисел до функций. В дальнейшем будем использовать эту сходимость в среднем, что влечет за собой сходимость по вероятности.

Полученные результаты и их обсуждение

Пусть имеется некоторая физическая система S (металлическое изделие, на которое наносится покрытие, с сохранением своего химического состава слоя в процессе нанесения покрытия), которая с течением времени меняет своё состояние (переходит из одного состояния в другое) заранее неизвестным, случайным образом. Тогда будем говорить, что в системе S протекает случайный процесс. К такой системе будем относить материал с нанесенным покрытием, а нанесение покрытий и получение заданных функциональных свойств покрытия будем считать

собственно случайным процессом. Разделим процесс нанесения покрытия на отдельные акты, которые происходят в конкретный момент времени, когда получаем конкретную величину толщины покрытия. Будем считать процесс нанесения покрытий случайным процессом с дискретными состояниями и дискретным временем в определенном замкнутом пространстве. Иными словами, в каждый отдельный акт процесса нанесения покрытия (дискретное время) происходит формирование единичного пятна покрытия. То есть в определенный момент времени происходит определенное изменение состояния системы, на изделие наносится определенное количество материала покрытия, и происходит формирование определенной толщины покрытия. На основании этого в дальнейшем для решения задачи исследования используем математический аппарат случайных функций [25].

Введя m фиксированных моментов времени (искусственная дискретизация времени), за который происходит один акт формирования покрытия из порошкового материала, получим систему случайных величин $X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_m)$. Тогда случайную функцию можно представить как бесконечномерную систему случайных величин. Поскольку в технологических процессах нанесения покрытий газотермическими методами материал покрытия находится в основном в порошкообразном состоянии, то будем считать, что процесс происходит в ограниченной по величине зоне контакта наносимого материала (иными словами, отдельной порошковой частицы) с основой. Формирование покрытия заданной толщины происходит путем постепенного наращивания слоя от основания изделия нормально внешней поверхности покрытия. Такая физическая система может находиться в состояниях S_1, S_2, \dots, S_n , причем изменения состояний происходят скачками только в определенные моменты времени t_1, \dots, t_m . Тогда вероятность нахождения системы в состоянии S_j определится следующим образом:

$$P_{ij}^{(m)} = P(S(t_m) = S_j | S(t_{m-1}) = S_i). \quad (5)$$

Процесс будет марковским, если эта вероятность на каждом шаге зависит только от состояния, в которое система попала на предыдущем шаге, и не зависит от предыдущих шагов, то есть условная вероятность не должна зависеть от m [26]. Для вычисления вероятностей переходов за m шагов служит равенство Маркова:

$$P_{ij}(m) = \sum_{l=1}^k P_{il}(r) P_{lj}(m-r), \quad (6)$$

где k — общее число состояний, которое вытекает из формулы полной вероятности, где в качестве гипотез фигурируют всевозможные промежуточные состояния.

Таким образом, для того чтобы найти матрицу перехода за m шагов, следует матрицу перехода за 1 шаг возвести в степень m .

Будем рассматривать систему S со следующими состояниями:

S_1 – начальное состояние системы и начала процесса;

S_2 – состояние системы и процесса (до получения требуемого уровня функциональных свойств покрытия);

S_3 – состояние системы и процесса (искомые функциональные свойства покрытия);

S_4 – состояние системы и процесса (функциональные свойства покрытия выше требуемого уровня).

На рис. 2 представлен граф состояний системы. В результате решения будет справедливым достижение системой состояния S_3 , то есть получение покрытия с требуемыми функциональными свойствами.

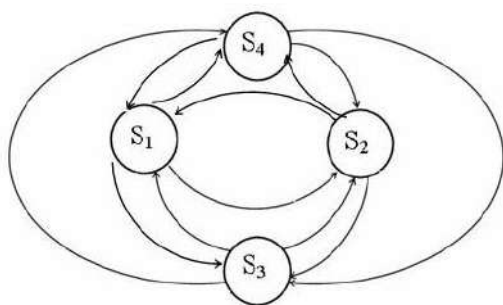


Рис. 2. Граф возможных состояний системы «изделие с покрытием»

Fig. 2. Graph of possible states of the “coated product” system

Используем расчет вероятности получения искоемых функциональных свойств покрытия (состояние S_3). Исходя из анализа графа состояний, литературных источников, риск-ориентированного подхода, составим матрицу перехода, для этого зададим начальное распределение вероятностей и рассчитаем состояние после первого, второго, третьего и четвертого шагов. Будем использовать табличный процессор MS-Excel. Результаты расчетов представлены в матричном виде:

1	Матрица перехода			
S_1	0	0	1	0
S_2	0,1	0,7	0,2	0
S_3	0	0,05	0,9	0,05
S_4	0,2	0	0,2	0,6

2	Матрица перехода за 2 шага			
S_1	0	0,05	0,9	0,05
S_2	0,07	0,5	0,42	0,01
S_3	0,015	0,08	0,83	0,075
S_4	0,12	0,01	0,5	0,37

3	Матрица перехода за 3 шага			
S_1	0,015	0,08	0,83	0,075
S_2	0,052	0,371	0,55	0,027
S_3	0,023	0,0975	0,793	0,0865
S_4	0,075	0,032	0,646	0,247

4	Матрица перехода за 4 шага			
S_1	0,0230	0,0975	0,7930	0,0865
S_2	0,0425	0,2872	0,6266	0,0437
S_3	0,0271	0,1079	0,7735	0,0916
S_4	0,0526	0,0547	0,7122	0,1805

Результаты расчета распределения вероятностей в начальном и последующих состояниях системы «изделие с покрытием» (см. рис. 2) представлены в табличной форме:

Начальное распределение			
1	0	0	0

После 1-го шага			
0	0	1	0

После 2-го шага			
0	0,05	0,9	0,05

После 3-го шага			
0,015	0,08	0,83	0,075

После 4-го шага			
0,023	0,0975	0,793	0,0865

Очевидно, что распределение вероятностей совпадает с первой строкой матриц. Так, в начальном состоянии система находилась в состоянии S_1 .

Переходим к отысканию стационарного распределения вероятности нахождения системы «изделие с покрытием» в различных состояниях (см. рис. 2), используя последовательное преобразование матриц:

Матрица перехода -1			
-1	0	1	0
0,1	-0,3	0,2	0
0	0,05	-0,1	0,05
0,2	0	0,2	-0,4

Матрица A			
-1	0	1	1
0,1	-0,3	0,2	1
0	0,05	-0,1	1
0,2	0	0,2	1

Матрица A обратная			
-0,5625	-0,2500	-1,5000	2,3125
0,1875	-3,2500	0,5000	2,5625
0,4063	-0,3750	-2,2500	2,2188
0,0313	0,1250	0,7500	0,0938

Стационарное распределение			
0,0313	0,125	0,75	0,0938

Полученное стационарное распределение не зависит от начального состояния системы, то есть в системе имеет место эргодический процесс. Случайный процесс будем называть эргодическим, если любая его статистическая характеристика равна соответ-

ствующей характеристике, полученной усреднением по времени одной-единственной реализации [24]. Все состояния рассматриваемой системы «изделие-покрытие» являются существенными и сообщающимися. Таким образом, в установившемся режиме вероятность получения искомым функциональных свойств покрытий будет составлять 0,75.

Для определения предельного стационарного режима мы должны получить достаточно длинную реализацию случайного процесса. Для этого будем использовать метод Монте-Карло [27]. В этом случае начальное состояние можно задать любым. Метод реализуется в соответствии со следующим правилом: событие, имеющее вероятность p , наступает в том случае, если случайное число γ оказывается меньше, чем p . Поэтому если предыдущим состоянием является S_1 , то в случае $\gamma < P_{11}$ система останется в этом состоянии; в противном случае произойдет переход в состояние S_2 и т.д. Если же предыдущим состоянием является S_2 , то в случае $\gamma < P_{21}$ произойдет переход в состояние S_1 и т.д.; в противном случае система останется в том же состоянии.

Моделирование осуществим с использованием MS-Excel. Рассмотрим реализацию случайного процесса на примере 500 моментов времени. Стационарное предельное распределение вероятностей состояний может быть оценено таким образом:

$$P_1 = \frac{T_1}{T}; P_2 = \frac{T_2}{T}; P_3 = \frac{T_3}{T}; P_4 = \frac{T_4}{T}. \quad (7)$$

Предельное стационарное распределение			
0,029	0,149	0,741	0,081

Вероятность нахождения системы «изделие с покрытием» в разных состояниях представлено на **рис. 3**.

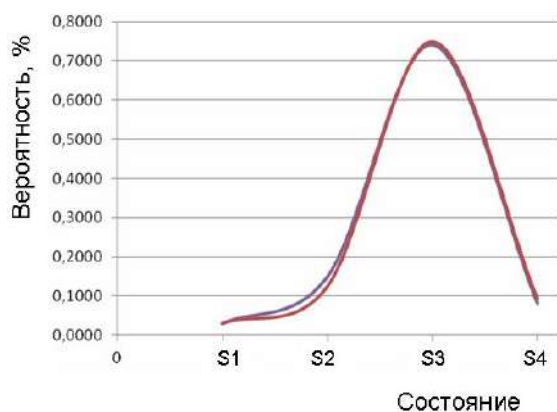


Рис. 3. Предельное стационарное (синий цвет) и стационарное распределение (красный цвет) вероятности нахождения системы «изделие с покрытием» в разных состояниях (см. **рис. 2**)

Fig. 3. The limiting stationary (blue) and stationary distribution (red) of the probability of finding the “coated product” system in different states (see Fig. 2)

Из полученных результатов видно, что полученные предельные оценки сходятся по вероятности к стационарному распределению. Таким образом, вероятность прогноза случайного вектора состояния функциональных свойств покрытия равна 0,741.

Заключение

Целью нанесения любого функционального покрытия является обеспечение надежной и безотказной работы изделия в определенных условиях эксплуатации. При этом следует учитывать, что изделие с покрытием следует рассматривать как единую иерархическую систему, состоящую из самого изделия, на которое наносится покрытие, и покрытие как таковое. Поскольку любой технологический процесс характеризуется наличием различных факторов, которые в конечном итоге определяют и влияют на формирование покрытия и его функциональные свойства, то прогнозирование вероятности получения требуемых свойств покрытия является важной теоретической задачей. Разработанный теоретический подход, основанный на использовании теории марковских процессов, позволяет с высокой долей достоверности оценить вероятность обеспечения функциональных свойств покрытий, что показано на примере получения покрытий из высокоэнтропийных соединений газотермическими методами.

Список источников

1. Гун Г.С., Чукин М.В. Оптимизация процессов технологического и эксплуатационного деформирования изделий с покрытиями. Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2006. 323 с.
2. Извеков Ю.А. Научные основы методологии оценки и повышения качества технических систем металлургического предприятия // Сборник трудов V Международной научно-технической конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖИВКОМ-2020)» в дистанционном формате. Москва: ИМАШ РАН им. А.А. Благоднарова, 2020. С. 118-119.
3. Izvekov Yu.A. Quantitative Evaluation Algorithm Technical System Reliability // Proceedings of the VI International Scientific Conference Fundamental Research and Innovative Technologies in Mechanical Engineering. Moscow: IMASH RAN, 2019, pp. 195-196.
4. Руссман И.Б. Моделирование и алгоритмизация слабоформализованных задач выбора наилучших вариантов системы. Воронеж: ВГУ, 1991. 168 с.
5. Гамбаров Г.М. Статистическое моделирование и прогнозирование. М.: Финансы и статистика, 1990. 383 с.
6. Брандт. Статистические методы анализа наблюдений. М.: Мир, 1975. 312 с.
7. Аоки М. Оптимизация стохастических систем. М.: Наука, 1971. 424 с.
8. Ермольев Ю.М. Методы стохастического программирования. М.: Наука, 1976. 256 с.

9. Основы применения стохастических дифференциальных уравнений для оценки качества конструкций / Извеков Ю.А., Полякова М.А., Светус К.О., Ильин И.Е. // Современные проблемы и перспективы развития науки, техники и образования: материалы IV Национальной научно-практической конференции. Магнитогорск, 2023. С. 172-174.
10. Тэрано Т., Асаи К., Сугено. М. Прикладные нечеткие системы. М.: Мир, 1993. 368 с.
11. Мелихов А.Н., Бернштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990. 272 с.
12. Novel high entropy intermetallic compounds: Synthesis and detonation spraying / Ostovari Moghaddam A., Abdollahzadeh A., Samodurova M., Shaburova N., Mikhailov D., Fereidonnejad R., Zhivulin V., Trofimov E. // *Intermetallics*. 2022, vol. 146, paper № 107591. DOI: 10.1016/j.intermet.2022.107591.
13. Microstructure and Wear Behavior of Al_{0.25}CoCrFeNiSi_{0.6} High-Entropy Alloy Coating Deposited on Stainless Steel by Detonation Spraying / Samoilova O., Shaburova N., Samodurova M., Pashkeev K., Ostovari Moghaddam A., Trofimov E. // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2023. DOI: 10.1007/s11666-023-01562-w.
14. High entropy intermetallic coatings fabricated by detonation spraying / Ostovari Moghaddam A., Samodurova M., Mikhailov D., Trofimov E. // *Materials Letters*. 2022, vol. 311, paper № 131560. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131560.
15. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys / Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. // *Materials Science and Engineering A – Structural Materials Properties, Microstructure and Processing*. July 2004, vol. 375-377, pp. 213-218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
16. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes / Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J., Shun T.-T., Tsau C.-H., Chang S.-Y. // *Advanced Engineering Materials*. 2004, vol. 6(5), pp. 299-303. DOI: 10.1002/adem.200300567/
17. High-Entropy energy materials in the age of Big Data: a critical guide to next-generation synthesis and applications / Wang Q., Velasco L., Breitung B., Presser V. // *Advanced Energy Materials*. 2021, 2102355. 18 pages. DOI: 10.1002/aenm.202102355/.
18. Tribological Performance of High-Entropy Coatings (HECs): A Review / Patel P., Roy A., Sharifi N., Stoyanov P., Chromik R., Moreau C. // *Materials*. 2022, vol. 15(10), paper № 3699. DOI: 10.3390/ma15103699/.
19. Sharma A. High entropy alloy coatings and technology // *Coatings*. 2021, vol. 11(4), paper № 372. DOI: 10.3390/coatings11040372.
20. A critical review on the high entropy material coatings: criteria for materials selection and coating procedure / Polyakova M., Ostovari Moghaddam A., Trofimova S., Samodurova M., Trofimov E. // *Engineering Research Express*. October 2024, vol. 6(4), 22 pages. DOI: 10.1088/2631-8695/ad8066
21. Smoluchowski M.V. Über brownische molekularebewegung unter einwirkung "außerer Kräfte und deren zusammenhang mit der verallgemeinerten diffusionsgleichung // *Annalen der Physik*. 1916, vol. 353, no. 24, pp. 1103–1112.
22. Рисс Ф., Секефальви-Надь Б. Лекции по функциональному анализу. М.: Мир, 1979. 585 с.
23. Морен К. Методы гильбертова пространства. М.: Мир, 1965. 570 с.
24. Рид М., Саймон Б. Методы современной математической физики. Т. 1. Функциональный анализ. М.: Мир, 1977. 357 с.
25. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2011. 464 с.
26. Свешников А.А. Прикладные методы теории марковских процессов: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2007. 192 с.
27. Соболев И.М. Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1968. 64 с.

References

1. Gun G.S., Chukin M.V. *Optimizaciya processov tekhnologicheskogo i ekspluatatsionnogo deformirovaniya izdelij s pokrytiyami* [Optimization of processes of technological and operational deformation of coated products]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2006, 323 p. (In Russ.)
2. Izvekov Yu.A. Scientific foundations of the methodology to assess and improve the quality of technical systems at metallurgical enterprise. *Sbornik trudov V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Zhivuchest i konstruksionnoe materialovedenie (ZhIVKOM-2020)» v distancionnom formate* [Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference "Vitality and Structural Materials Science (ZHIVKOM-2020)" in a remote format]. Moscow: IMASH RAN, 2020, pp. 118-119. (In Russ.)
3. Izvekov Yu.A. Quantitative Evaluation Algorithm Technical System Reliability. Proceedings of the VI International Scientific Conference Fundamental Research and Innovative Technologies in Mechanical Engineering. Moscow: IMASH RAN. 2019:195-196.
4. Russman I.B. *Modelirovanie i algoritimizaciya slaboformalizovannykh zadach vybora nailuchshih variantov sistemy* [Modeling and algorithmization of weakly formalized problems of selecting the best system options]. Voronezh: VGU, 1991, 168 p. (In Russ.)
5. Gambarov G.M. *Statisticheskoe modelirovanie i prognozirovaniye* [Statistical modeling and forecasting]. Moscow: Finance and Statistics, 1990, 383 p. (In Russ.)
6. Brandt. *Statisticheskie metody analiza nablyudeniy* [Statistical methods for analysis of observations]. Moscow: Mir, 1975, 312 p. (In Russ.)
7. Aoki M. *Optimizatsiya stohasticheskikh system* [Optimization of stochastic systems]. Moscow: Nauka, 1971, 424 p. (In Russ.)
8. Yermolyev Yu.M. *Metody stohasticheskogo programirovaniya* [Methods of stochastic programming]. Moscow: Nauka, 1976, 256 p. (In Russ.)

9. Izvekov Yu.A., Polyakova M.A., Svetus K.O., Ilyin I.E. Fundamentals of the application of stochastic differential equations for assessing the quality of structures. *Sovremennye problemy i perspektivy razvitiya nauki, tekhniki i obrazovaniya: Materialy IV Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern problems and prospects for the development of science, technology and education. Proceedings of the IV National Scientific and Practical Conference]. Magnitogorsk, 2023, pp. 172-174. (In Russ.)
10. Terano T., Asai K., Sugeno M. *Prikladnye nechetkie sistemy* [Applied fuzzy systems]. Moscow: Mir, 1993, 368 p. (In Russ.)
11. Melikhov A.N., Bernshtein L.S., Korovin S.Ya. *Situatsionnye sovetuyushchie sistemy s nechetkoy logikoy* [Situational advisory systems with fuzzy logic]. Moscow: Nauka, 1990, 272 p. (In Russ.)
12. Ostovari Moghaddam A., Abdollahzadeh A., Samodurova M., Shaburova N., Mikhailov D., Fereidonjad R., Zhivulin V., Trofimov E. Novel high entropy intermetallic compounds: Synthesis and detonation spraying. *Intermetallics*. 2022;146(107591). DOI: 10.1016/j.intermet.2022.107591.
13. Samoilova O., Shaburova N., Samodurova M., Pashkev K., Ostovari Moghaddam A., Trofimov E. Microstructure and Wear Behavior of Al_{0.25}CoCrFeNiSi_{0.6} High-Entropy Alloy Coating Deposited on Stainless Steel by Detonation Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2023. DOI: 10.1007/s11666-023-01562-w.
14. Ostovari Moghaddam A., Samodurova M., Mikhailov D., Trofimov E. High entropy intermetallic coatings fabricated by detonation spraying. *Materials Letters*. 2022;311(131560). DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131560.
15. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering A – Structural Materials Properties, Microstructure and Processing*. 2004;375-377:213-218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
16. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J., Shun T.-T., Tsau C.-H., Chang S.-Y. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. *Advanced Engineering Materials*. 2004;6(5):299-303. DOI: 10.1002/adem.200300567/
17. Wang Q., Velasco L., Breitung B., Presser V. High-Entropy energy materials in the age of Big Data: a critical guide to next-generation synthesis and applications. *Advanced Energy Materials*. 2021;(2102355). 18 p. DOI: 10.1002/aenm.202102355/.
18. Patel P., Roy A., Sharifi N., Stoyanov P., Chromik R., Moreau C. Tribological Performance of High-Entropy Coatings (HECs): A Review. *Materials*. 2022;15(10):3699. DOI: 10.3390/ma15103699/.
19. Sharma A. High entropy alloy coatings and technology. *Coatings*. 2021;11(4):372. DOI: 10.3390/coatings11040372.
20. Polyakova M., Ostovari Moghaddam A., Trofimova S., Samodurova M., Trofimov E. A critical review on the high entropy material coatings: criteria for materials selection and coating procedure. *Engineering Research Express*. 2024;6(4). 22 p. DOI: 10.1088/2631-8695/ad8066
21. Smoluchowski M.V. Über brownische molekularebewegung unter einwirkung "äußerer Kräfte und deren zusammenhang mit der verallgemeinerten diffusionsgleichung. *Annalen der Physik*. 1916;353(24):1103–1112.
22. Riss F., Sekelfalvi-Nad B. *Leksii po funktsionalnomu analizu* [Lectures on functional analysis]. Moscow: Mir, 1979, 585 p. (In Russ.)
23. Moren K. *Metody gilbertova prostranstva* [Hilbert space methods]. Moscow: Mir, 1965, 570 p. (In Russ.)
24. Rid M., Saimon B. *Metody sovremennoy matematicheskoy fiziki. Tom 1. Funktsionalniy analiz* [Methods of modern mathematical physics. Volume 1. Functional Analysis]. Moscow: Mir, 1977, 357 p. (In Russ.)
25. Sveshnikov A.A. *Prikladnye metody teorii sluchainykh funktsiy : uchebnoe posobie* [Applied methods of the theory of random functions : a textbook]. Saint Petersburg: Publishing House "Lan", 2011, 464 p. (In Russ.)
26. Sveshnikov A.A. *Prikladnye metody teorii markovskikh processov: uchebnoe posobie* [Applied methods of the theory of Markov processes: a textbook]. Saint Petersburg: Publishing House "Lan", 2007, 192 p. (In Russ.)
27. Sobol I.M. *Metod Monte-Karlo* [Monte-Carlo method]. Moscow: Nauka, 1968, 64 p. (In Russ.)

Поступила 17.02.2025; принята к публикации 19.02.2025; опубликована 28.03.2025
Submitted 17/02/2025; revised 19/02/2025; published 28/03/2025

Полякова Марина Андреевна – доктор технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: m.polyakova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-1597-8867

Извеков Юрий Анатольевич – доктор технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: yurij.izvekov@mail.ru. ORCID 0000-0002-1892-4055

Самодурова Марина Николаевна – доктор технических наук, профессор,
Южно-Уральский государственный университет (национальный университет), Челябинск, Россия.
Email: samodurovamn@susu.ru. ORCID 0000-0002-1505-1068

Трофимова Светлана Николаевна – кандидат технических наук, старший преподаватель,
Южно-Уральский государственный университет (национальный университет), Челябинск, Россия.
Email: sntrofimova@susu.ru

Шеметова Вероника Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: v.shemetova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-2135-3900

Ярушина Дарья Валерьевна – аспирант
Южно-Уральский государственный университет (национальный университет), Челябинск, Россия.

Marina A. Polyakova – DrSc (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: m.polyakova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-1597-8867

Yury A. Izvekov – DrSc (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: yurij.izvekov@mail.ru. ORCID 0000-0002-1892-4055

Marina N. Samodurova – DrSc (Eng.), Professor,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: samodurovamn@susu.ru. ORCID 0000-0002-1505-1068

Svetlana N. Trofimova – PhD (Eng.), Senior Lecturer,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: sntrofimova@susu.ru.

Veronika V. Shemetova – PhD (Physical and Mathematical Sciences), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: v.shemetova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-2135-3900

Darya V. Yarushina – Postgraduate Student,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 669.437+669.01/.09+004.942
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-158-169

БЛОЧНО-МОДУЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ ГУБЧАТЫХ ОСАДКОВ СВИНЦА ИЗ ЩЕЛОЧНЫХ РАСТВОРОВ

Зароченцев В.М.¹, Рутковский А.Л.¹, Болотаева И.И.^{1,2}, Ковалёва М.А.²

¹Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия

²Владикавказский филиал Финансового университета при Правительстве РФ, Владикавказ, Россия

Аннотация. В настоящее время остро стоит проблема комплексной переработки минерального сырья на металлургических заводах. В значительной мере это относится к промпродуктам с большим содержанием окисленного свинца (пыли, возгоны, кеки), которые образуются в свинцовом, цинковом, сталеплавильном и других производствах. Применение щелочной гидрометаллургической технологии для переработки окисленных свинецсодержащих материалов позволяет снизить расходы на их переработку и повысить степень извлечения ценных компонентов. Целью работы является разработка математической и блочно-модульной модели биполярного электроосаждения губчатых осадков свинца из щелочных растворов в установке проточного типа с последующим имитационным исследованием процесса на модели. Разработана установка для исследований, включающая проточную электролизную ячейку с двумя сетчатыми катодами и двумя плоскими анодами, потенциостат, дозатор, высокоомный милливольтметр, магнитную мешалку с подогревом и стабилизацией температуры и двумя хлорсеребряными электродами сравнения. Процесс электроосаждения свинцовой губки на разработанной установке проводился в режимах стабилизации катодного потенциала относительно потенциала хлорсеребряного электрода с лицевой стороны (потенциостатический режим) или стабилизации тока в ячейке (гальваностатический режим). Задание режимов осуществлялось с помощью потенциостата. Контроль потенциала тыльного слоя губки осуществлялся с помощью высокоомного милливольтметра. Проведены эксперименты, которые показали значительную разность потенциалов между наружным и внутренним слоем катодной губки. На основании обработки экспериментальных данных разработана принципиальная электрическая схема и получена математическая модель процесса. Создана блочно-модульная схема в Simulink, позволяющая проводить имитационное моделирование процесса. Результаты имитационного моделирования показывают адекватность модели и применимость ее для использования в информационно-управляющих системах свинцового производства.

Ключевые слова: математическая модель, электролизер, щелочные растворы, свинцовая губка, электролиз свинца, Simulink, блочно-модульное моделирование

© Зароченцев В.М., Рутковский А.Л., Болотаева И.И., Ковалёва М.А., 2025

Для цитирования

Блочное-модульное моделирование биполярного электроосаждения губчатых осадков свинца из щелочных растворов / Зароченцев В.М., Рутковский А.Л., Болотаева И.И., Ковалёва М.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 158-169. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-158-169>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

THE BLOCK-MODULAR MODELING OF BIPOLAR ELECTRODEPOSITION OF SPONGY LEAD PRECIPITATION FROM ALKALINE SOLUTIONS

Zarochentsev V.M.¹, Rutkovsky A.L.¹, Bolotaeva I.I.^{1,2}, Kovaleva M.A.²

¹North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

²Financial University under the Government of the Russian Federation, Vladikavkaz, Russia

Abstract. Currently, the problem of complex processing of mineral raw materials at metallurgical plants is acute. To a large extent, this applies to industrial products with a high content of oxidized lead (dust, fumes, cakes), which are formed in lead, zinc, steelmaking and other industries. The use of alkaline hydrometallurgical technology for the processing of oxidized lead-containing materials reduces the cost of their processing and increases the degree of extraction of valuable components. The aim of the work is to develop a mathematical and block-modular model of bipolar electrodeposition of spongy lead precipitate from alkaline solutions in a flow-type facility followed by a simulation study of the process on the model. A research facility has been developed that includes a flow-through electrolysis cell with two mesh cathodes and two flat anodes, a potentiostat, a dispenser, a high-resistance millivoltmeter, a magnetic stirrer with heating and temperature stabilization and two silver chloride reference electrodes. The process of electrodeposition of a lead sponge on the developed facility was carried out in the following modes: stabilization of the cathode potential relative to the potential of the silver chloride electrode on the front side (potentiostatic mode) or stabilization of the current in the cell (galvanostatic mode). The modes were set using a potentiostat. The potential of the back layer of the sponge was monitored using a high-resistance millivoltmeter. Experiments have been carried out that have shown a significant potential difference between the outer and inner layers of the cathode sponge. Based on the processing of experimental data, an electrical circuit was developed and a mathematical model of the process was obtained. A block-modular scheme has been created in Simulink, which allows for simulation modeling of the process. The simulation results show the adequacy of the model and its applicability for its use in information management systems of lead production.

Keywords: mathematical model, electrolyzer, alkaline solutions, lead sponge, lead electrolysis, Simulink, block-modular modeling

For citation

Zarochentsev V.M., Rutkovsky A.L., Bolotaeva I.I., Kovaleva M.A. The Block-Modular Modeling of Bipolar Electrodeposition of Spongy Lead Precipitation from Alkaline Solutions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 158-169. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-158-169>

Введение

В настоящее время остро стоит проблема комплексной переработки минерального сырья на металлургических заводах. В значительной мере это относится к промпродуктам с большим содержанием окисленного свинца (пыли, возгоны, кеки), которые образуются в свинцовом, цинковом, сталеплавильном и других производствах [1]. Обычно эти материалы направляются на переработку пирометаллургическими способами совместно с сульфидными свинцовыми концентратами [2]. Однако при такой переработке существенно снижаются технико-экономические показатели свинцового производства и теряются ценные компоненты, содержащиеся в этих промпродуктах. Применение щелочной гидрометаллургической технологии для переработки окисленных свинецсодержащих материалов позволяет снизить расходы на их переработку и повысить степень извлечения ценных компонентов.

Щелочные электролизеры успешно используются в промышленности [3, 4] для электрохимического

аккумулирования энергии, а также для электроосаждения свинца и его диоксида [5, 6]. Известны исследования особенностей осаждения свинца из щелочных электролитов [7–9], которые показывают актуальность этого направления переработки свинецсодержащих материалов.

Объектом исследования является процесс получения губчатых осадков свинца из щелочных растворов, полученных после выщелачивания окисленных свинецсодержащих материалов. Цель исследования – разработка математической модели осаждения свинца на проточном катоде с учетом обнаруженного эффекта разделения потенциалов между лицевым и тыльным слоем губки.

Получение свинца и цинка из растворов NaOH является перспективной технологией для переработки пылей и других окисленных материалов в силу хороших экологических показателей, дешевых реагентов, возможности очищать от тяжелых металлов бедные растворы и высокой чистоты получаемых осадков.

Существенно ограничивает возможность применения указанных способов [10] то обстоятельство,

что в условиях промышленного электролиза происходит разрастание губки в стороны, ограниченные боковыми стенками, дном ванны и уровнем электролита.

При наращивании губчатого осадка происходит перекрытие этим осадком всего поперечного сечения ванны. Поэтому оптимальным сечением электролита, через которое осуществляется доставка ионов свинца к внешней поверхности губки в условиях предельного тока диффузии, является поперечное сечение электролизной ванны. Именно это сечение определяет величину предельного тока диффузии для губчатого осадка при ограничении его разрастания в стороны. Соответственно, и рабочая плотность тока в условиях интенсивного электролиза будет определяться не площадью катода, а поперечным сечением ванны, которое

заполняется губкой. Это приводит к снижению рабочей плотности тока при реализации указанных способов в промышленных условиях. Введение диафрагмы позволяет разделить катодит и анолит и предотвратить попадание катодного осадка на анод. Подобные электролизеры известны в промышленности [11–13].

Разработка установки для электролиза и проведение экспериментов

Описанный способ электролиза был защищен авторским свидетельством на изобретение [14]. Схема экспериментальной установки для исследования процессов, протекающих при непрерывном проточном электролизе щелочных свинецсодержащих растворов, приведена на рис. 1.

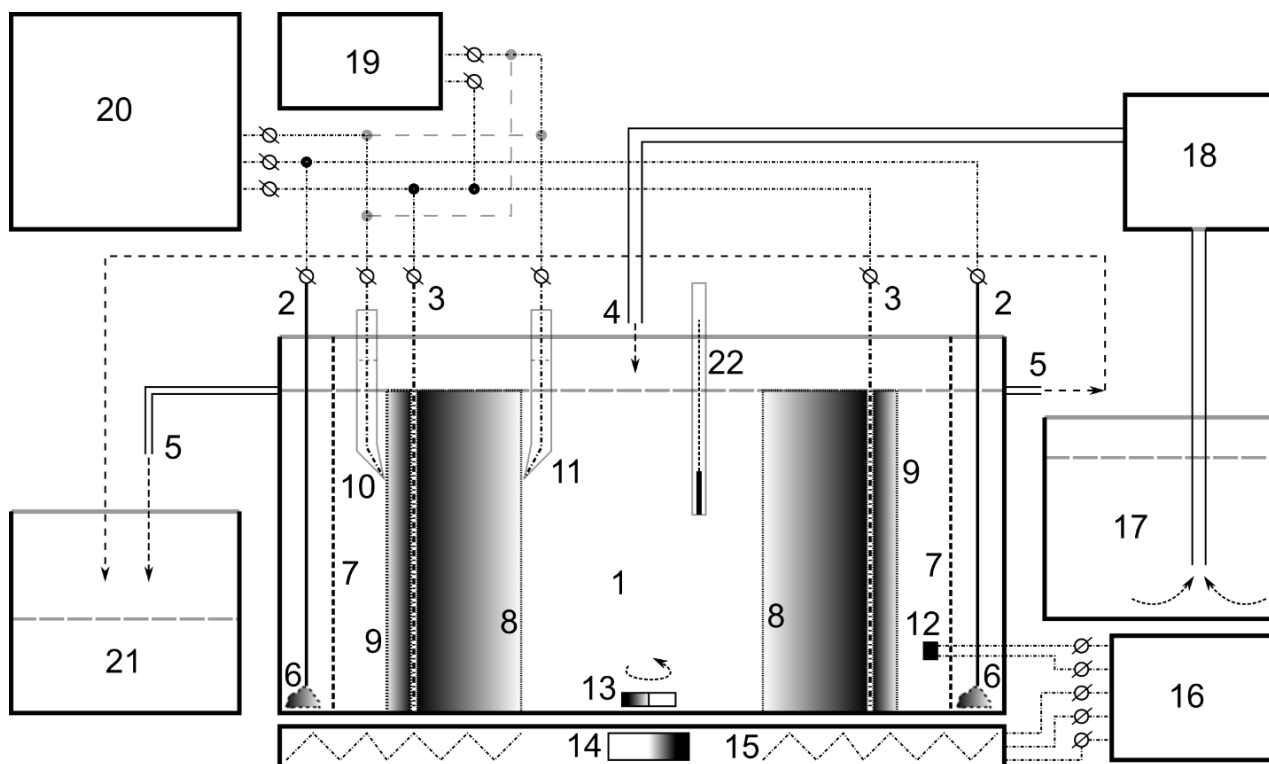


Рис. 1. Экспериментальная установка для электролиза с фильтрующим слоем катодной губки:

1 – ячейка с электролитом; 2 – аноды; 3 – сетчатые катоды; 4 – питающий раствор; 5 – отработанный электролит; 6 – осадок диоксида свинца; 7 – катодная корзина (сетка из диэлектрика); 8 – тыльный слой губки; 9 – лицевой слой губки; 10, 11 – хлорсеребряные электроды; 12 – датчик температуры; 13 – магнитная мешалка; 14 – электродвигатель с магнитом; 15 – нагревательный элемент; 16 – система регулирования температуры и скорости перемешивания; 17 – ёмкость с исходным раствором; 18 – дозатор; 19 – высокоомный милливольтметр; 20 – система стабилизации потенциала катода или силы тока в ячейке; 21 – ёмкость для сбора отработанного электролита; 22 – контрольный термометр

Fig. 1. Experimental facility for electrolysis with a filter layer of cathode sponge: 1 is cell with electrolyte; 2 is anodes; 3 is mesh cathodes; 4 is feeding solution; 5 is spent electrolyte; 6 is lead dioxide precipitate; 7 is cathode basket (dielectric mesh); 8 is back layer of the sponge; 9 is front layer of the sponge; 10, 11 are silver chloride electrodes; 12 is temperature sensor; 13 is magnetic stirrer; 14 is electric motor with magnet; 15 is heating element; 16 is temperature and stirring speed control system; 17 is container with the initial solution; 18 is dispenser; 19 is high-resistance millivoltmeter; 20 is system for stabilizing the cathode potential or current strength in the cell; 21 is container for collecting spent electrolyte; 22 is control thermometer

В прямоугольную ячейку для электролиза 1 устанавливаются сплошные металлические аноды 2 и сетчатые металлические катоды 3. Катодное и анодное пространство разделяется диэлектрической сеткой 7. Исходный раствор 4 поступает в ячейку через трубку из дозатора 18, который засасывает необходимое количество раствора из ёмкости 17. Раствор протекает через катодную губку на лицевой 8 и тыльной 9 сторонах сетчатого катода, после чего попадает в анодное пространство и сливается через отверстия 5 в ёмкость для отработанного электролита 21. Контроль потенциала катодной губки с тыльной и лицевой стороны осуществляется с помощью хлорсеребряных электродов 10. Контроль и поддержание температуры в ячейке осуществляется с помощью контрольного термометра 11 и системы управления 16, которая автоматически поддерживает заданную температуру с помощью нагревательного элемента 15 и датчика температуры 12. Интенсивность перемешивания изменяется с помощью электродвигателя с магнитом, дистанционно вращающего магнитную мешалку 13. Скорость вращения электродвигателя 14 задается в системе управления 16.

Процесс электроосаждения свинцовой губки на разработанной установке проводился в режимах стабилизации катодного потенциала относительно потенциала хлорсеребряного электрода с лицевой стороны (потенциостатический режим) или стабилизации тока в ячейке (гальваностатический режим). Задание режимов осуществлялось с помощью установки автоматической стабилизации 20 на основе потенциостата П-5848. Контроль потенциала тыльного слоя губки осуществлялся с помощью высокоомного милливольтметра 19 на основе рН-метра.

Катоды 3 представляют собой проволочную стальную сетку с ячейкой 2×2 мм и толщиной проволоки 0,5 мм, перекрывающую сечение электролизной ячейки. Анодами 2 являлись стальные пластины, занимающие около 90% поперечного сечения ячейки.

Во время проведения экспериментов на катоде происходило осаждение губчатого осадка свинца как со стороны анода 9 (лицевой слой), так и в межкатодном пространстве 10 (тыльный слой). А на аноде происходило выделение кислорода и диоксида свинца 6. При сильном обеднении проходящего электролита по свинцу до 1 г/л и менее на лицевом слое губки преимущественно выделялся водород или губчатый металлический цинк, если окисленные соединения цинка присутствовали в растворе в большом количестве. Плотность тока в процессе электролиза изменялась и составляла от 200 до 600 А/м² в поперечном сечении ванны между катодом и анодом.

В таблице приведены следующие показатели процесса электроосаждения свинцовой губки: φ_F –

потенциал на лицевой поверхности катода относительно электрода сравнения, В; v_s – скорость подачи электролита на единицу поверхности катода в час, л/м²·ч; Pb_{out} – концентрация свинца в отработанном электролите, г/л; η_F – выход по току свинца на лицевой стороне катода; η_U – выход по току свинца на тыльной стороне катода; G_U/G_F – отношение масс свинца осажденных на лицевой и тыльной сторонах катода.

Таблица. Показатели процесса электроосаждения свинца в фильтрующем слое катодной губки

Table. Indicators of lead electrodeposition process in the filter layer of the cathode sponge

φ_F , В	v_s , л/м ² ·ч	Pb_{out} , г/л	η_F , %	η_U , %	G_U/G_F
1,0	41,6	0,77	4,8	89,6	18,67
1,2	39,9	0,46	2,4	96,9	40,38
1,4	36,6	0,27	5,0	85,3	17,06

Проведенные исследования, подробно описанные в работе [15], показали, что осаждение металлической губки происходит по внешним и внутренним сторонам катодного осадка, при этом наблюдалась значительная разность потенциалов между внутренним и внешним слоями губки.

На рис. 2 показано, как изменяется разность потенциалов между обеими сторонами катода во времени в потенциостатическом режиме. Определяющим фактором этого процесса является рост концентрации свинца с тыльной и уменьшение ее с лицевой стороны катода.

В начале электролиза эти потенциалы равны между собой, и затем происходит перекрытие сечения сетчатого катода осаждающейся металлической губкой, после чего тыльная 8 и лицевая 9 сторона катода приобретали разность потенциалов и начинали работать в разных режимах электроосаждения. Тыльный (внутренний) слой катодной губки 8 нарастал более равномерно, формируя цельный пористый осадок, нарастающий внутрь пространства между катодами с обоих электродов 3. Лицевой слой губки 9 нарастал не так однородно, как тыльный, и на его поверхности наблюдалось выделение пузырьков водорода и отрыв небольших частиц и фрагментов губчатого осадка, осаждающихся на дно электролизера.

Соотношение массы осажденных осадков с лицевой и тыльной стороны катода (см. таблицу) показывает, что на тыльной стороне выделяется практически только свинец, с высоким выходом по току, приближающимся к 100% для той доли электрического тока, которая поступает к тыльному слою губки. А на лицевой стороне катода выход по току свинца невысокий, так как на этой стороне происходит выделение водорода вследствие низкого значения катодного потенциала относительно тыльной стороны катода.

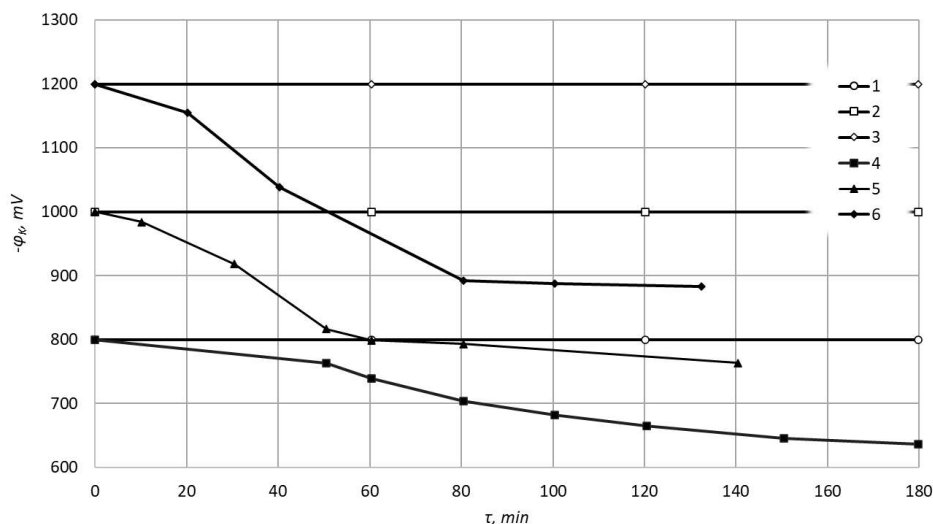


Рис. 2. Потенциал на тыльной стороне (линии 4, 5, 6) катода при стабилизации потенциала на лицевой стороне (линии 1, 2, 3): линии 1, 4 – $\varphi_{KF} = 800$ мВ, $\nu = 2,35$ мл/мин; линии 2, 5 – $\varphi_{KF} = 1000$ мВ, $\nu = 2,5$ мл/мин; линии 3, 6 – $\varphi_{KF} = 1200$ мВ, $\nu = 2,2$ мл/мин

Fig. 2. Potential on the back side (lines 4, 5, 6) of the cathode while the potential on the front side (lines 1, 2, 3) is stabilized: lines 1, 4 are $\varphi_{KF} = 800$ mV, $\nu = 2.35$ ml/min; lines 2, 5 are $\varphi_{KF} = 1000$ mV, $\nu = 2.5$ ml/min; lines 3, 6 are $\varphi_{KF} = 1200$ mV, $\nu = 2.2$ ml/min

Математическое описание механизма процесса

На основании проведенного исследования была разработана принципиальная схема механизма процесса проточного биполярного электролиза щелочных растворов с получением свинцовой губки, протекающего в разработанной установке, которая показана на рис. 3. Этот механизм включает в себя закономерности электрохимических взаимодействий [16,17], распределения электроэнергии, массопереноса в потоке жидкости [18].

Электрический ток I_E в электролизной ванне формируется за счет подаваемого от внешнего источника напряжения между анодом и катодом U_E . На аноде электрический ток проходит через сопротивление пассивирующего слоя, состоящего в основном из

диоксида свинца R_{AP} , и затем преодолевает перенапряжение электрохимических реакций U_{AL} : в результате суммирования всех анодных перенапряжений формируется анодный потенциал в растворе у поверхности электрода:

$$\varphi_{AL} = \varphi_A + U_{AL} + R_{AP}I_E, \quad (1)$$

где φ_{AL} – потенциал вблизи поверхности анода относительно нормального водородного электрода, В; φ_A – подведенный к аноду потенциал, В; U_{AL} – перенапряжение электрохимических реакций на аноде, В; R_{AP} – сопротивление пассивирующего слоя на аноде, Ом; I_E – ток, протекающий через анод, А.

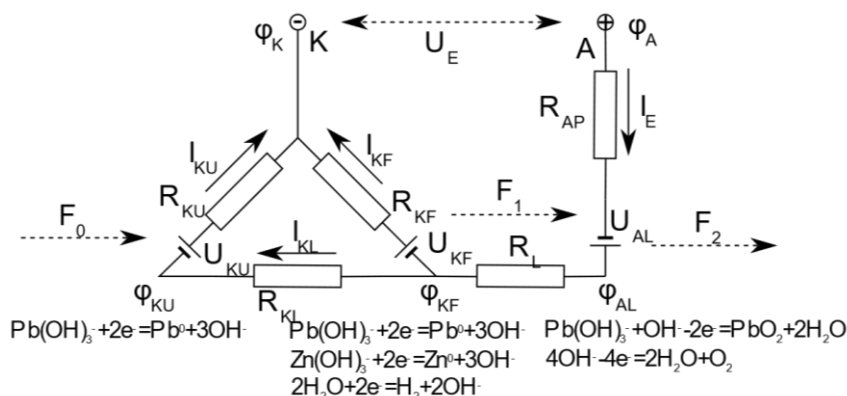
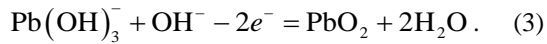
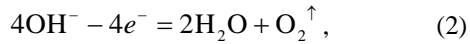


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема механизма процесса проточного биполярного электролиза щелочных растворов с получением свинцовой губки

Fig. 3. Schematic diagram of the mechanism of flow bipolar electrolysis of alkaline solutions with the production of lead sponge

При этом на аноде протекают реакции выделения кислорода и диоксида свинца:



Электродные потенциалы реакций (2) и (3) равны между собой. Они описываются следующими уравнениями [19, 17]:

$$\varphi_{\text{AL}} = \varphi_{\text{O}_2} + r_{\text{O}_2}^A \cdot \ln \left(1 - \frac{j_{\text{O}_2}^A}{j_{\text{D}_{\text{O}_2}}^A} \right); \quad (4)$$

$$\varphi_{\text{AL}} = \varphi_{\text{PbO}_2} + k_{\text{Pb}(\text{OH})_3^-}^A \cdot \ln \left(a_{\text{Pb}(\text{OH})_3^-}^A \right) + r_{\text{PbO}_2}^A \cdot \ln \left(1 - \frac{j_{\text{PbO}_2}^A}{j_{\text{D}_{\text{PbO}_2}}^A} \right), \quad (5)$$

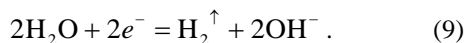
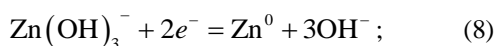
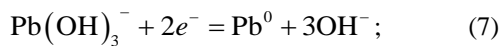
где φ_{O_2} и φ_{PbO_2} – потенциалы выделения кислорода и диоксида свинца на поверхности анода, мВ; $k_{\text{Pb}(\text{OH})_3^-}^A$ – коэффициент концентрационной поляризации; $a_{\text{Pb}(\text{OH})_3^-}^A$ – активность ионов свинца в растворе; $r_{\text{O}_2}^A$ и $r_{\text{PbO}_2}^A$ – коэффициенты диффузионной поляризации, А/м²; $j_{\text{O}_2}^A$ и $j_{\text{PbO}_2}^A$ – плотности анодного тока; $j_{\text{D}_{\text{O}_2}}^A$ и $j_{\text{D}_{\text{PbO}_2}}^A$ – кажущаяся предельная плотность тока диффузии соответствующих ионов, А/м².

В уравнениях (4) и (5) первые слагаемые зависят от ионообменных реакций на поверхности анода, третьи слагаемые являются концентрационной поляризацией ионов, четвертое слагаемое представляет собой диффузионную поляризацию анодных реакций.

Протекание тока через электролит создает пере-напряжение электролита между катодом и анодом:

$$U_L = I_E R_L. \quad (6)$$

На лицевой стороне сетчатого катода, обращенной к аноду, происходит выделение свинца, водорода, а также цинка при наличии его ионов в растворе:



Реакция (8) протекает при наличии в растворе ионов цинка. В проведенных исследованиях отмечено осаждение цинковой губки совместно со свинцовой с

лицевой стороны катода, если в растворе содержалась растворенная окись цинка.

На лицевой стороне катода при этом образуется губчатый осадок, а электрохимические реакции протекают в поверхностном слое губки со стороны анода. Потенциал катода с лицевой стороны описывается следующими уравнениями:

$$\varphi_{\text{KF}} = \varphi_{\text{Pb}} + k_{\text{Pb}(\text{OH})_3^-}^F \cdot \ln \left(a_{\text{Pb}(\text{OH})_3^-}^F \right) + r_{\text{Pb}}^F \cdot \ln \left(1 - \frac{j_{\text{Pb}}^F}{j_{\text{D}_{\text{Pb}}}^F} \right); \quad (10)$$

$$\varphi_{\text{KF}} = \varphi_{\text{Zn}} + k_{\text{Zn}(\text{OH})_3^-}^F \cdot \ln \left(a_{\text{Zn}(\text{OH})_3^-}^F \right) + r_{\text{Zn}}^F \cdot \ln \left(1 - \frac{j_{\text{Zn}}^F}{j_{\text{D}_{\text{Zn}}}^F} \right), \quad (11)$$

где φ_{Pb} и φ_{Zn} – потенциалы выделения металлического свинца и цинка на поверхности катодной губки, мВ; $k_{\text{Pb}(\text{OH})_3^-}^F$ и $k_{\text{Zn}(\text{OH})_3^-}^F$ – коэффициенты концентрационной поляризации; $a_{\text{Pb}(\text{OH})_3^-}^F$ и $a_{\text{Zn}(\text{OH})_3^-}^F$ – активности соответствующих ионов; r_{Pb}^F и r_{Zn}^F – коэффициенты диффузионной поляризации; j_{Pb}^F и j_{Zn}^F – плотность катодного тока соответствующих ионов, А/м²; $j_{\text{D}_{\text{Pb}}}^F$ и $j_{\text{D}_{\text{Zn}}}^F$ – кажущаяся предельная плотность катодного тока диффузии соответствующих ионов, А/м².

Выделение водорода на катоде происходит только на лицевой стороне по реакции (9) и может быть описано уравнением без учета концентрационной поляризации:

$$\varphi_{\text{KF}} = \varphi_{\text{H}_2} + r_{\text{H}_2}^F \cdot \ln \left(1 - \frac{j_{\text{H}_2}^F}{j_{\text{D}_{\text{H}_2}}^F} \right), \quad (12)$$

где φ_{H_2} – электродный потенциалы выделения водорода на поверхности катодной губки; $r_{\text{H}_2}^F$ – коэффициент диффузионной поляризации; $j_{\text{H}_2}^F$ – плотность катодного тока выделения водорода, А/м²; $j_{\text{D}_{\text{H}_2}}^F$ – кажущаяся предельная плотность тока диффузии, А/м².

Электролит движется сквозь губку и сетчатый катод в направлении анода, при этом входящий поток F_0 обогащён соединениями свинца, которые осаждаются в поверхностном слое губки с тыльной стороны катода. Выходящий поток с лицевой стороны катода обеднен соединениями свинца, следовательно, потенциал лицевой стороны катода ниже, чем потенциал тыльной стороны:

$$\varphi_{\text{KU}} = \varphi_{\text{KF}} + R_{\text{KL}} I_{\text{KL}}. \quad (13)$$

Сопротивление R_{KL} зависит от расстояния между внешним и внутренним слоем нарастающей губки, сечения электролизера, а также является функцией состава и температуры раствора по уравнению, описанному в литературе [20]:

$$\chi = 0,852t + 0,3612[\text{NaOH}] - 0,1036[\text{Pb}] + 0,0055t[\text{NaOH}] - 0,00171[\text{NaOH}]^2 - 2,37; \quad (14)$$

$$R_{KL} = \frac{\Delta_{KL}}{\chi \cdot S_K}, \quad (15)$$

где $[\text{NaOH}]$ – концентрация гидроксида натрия в растворе, г/л; $[\text{Pb}]$ – концентрация свинца в растворе, г/л; t – температура раствора, °C; χ – электропроводимость раствора, Ом/м; Δ_{KL} – расстояние между лицевым и тыльным внешними слоями губки, М; S_K – площадь поперечного сечения губки, м².

На тыльной стороне катода при высокой концентрации свинца в растворе и высоком потенциале осаждения выделяется только чистая свинцовая губка, без выделения примесей (Zn) и водорода. Потенциал тыльной стороны свинцовой губки выражается уравнением

$$\varphi_{KU} = \varphi_{\text{Pb}} + k_{\text{Pb}(\text{OH})_3}^U \cdot \ln \left(a_{\text{Pb}(\text{OH})_3}^U \right) + r_{\text{Pb}}^U \cdot \ln \left(1 - \frac{j_{\text{Pb}}^U}{j_{D_{\text{Pb}}}^U} \right), \quad (16)$$

где $k_{\text{Pb}(\text{OH})_3}^U$ – коэффициент концентрационной поляризации; $a_{\text{Pb}(\text{OH})_3}^U$ – активность гидратированных ионов свинца; r_{Pb}^U – коэффициент диффузионной поляризации; j_{Pb}^U – плотность катодного тока, А/м²; $j_{D_{\text{Pb}}}^U$ – кажущаяся предельная плотность катодного тока диффузии, А/м².

В уравнениях электродных потенциалов, приведенных выше, коэффициенты концентрационного и диффузионного потенциала, согласно уравнению Нернста [16], выражаются уравнениями

$$k_x^y = \alpha_x^y \frac{RT}{Z_x F}; \quad (17)$$

$$r_x^y = \beta_x^y \frac{RT}{Z_x F}, \quad (18)$$

где x – соответствующий ион; y – соответствующий электрод или поверхность; R – универсальная газовая постоянная; T – температура, К; Z_x – число заряда иона x ; F – число Фарадея; α_x^y и β_x^y – поправочные коэффициенты.

Электродные потенциалы выделения ионов выражаются уравнением

$$\varphi_x = \varphi_x^0 + \Delta\varphi_x, \quad (19)$$

где φ_x^0 – стандартные электродные потенциалы соответствующих ионов x ; $\Delta\varphi_x$ – поправка электродного потенциала на неучтенные процессы, протекающие на поверхности электрода.

Подведенный к катоду потенциал связан с потенциалами на тыльной и лицевой сторонах катода соотношениями

$$\varphi_{KF} = \varphi_K + U_{KF} + R_{KF} I_{KF}; \quad (20)$$

$$\varphi_{KU} = \varphi_K + U_{KU} + R_{KU} I_{KU}. \quad (21)$$

Осаждение губки на обеих сторонах катода подчиняется закону Фарадея:

$$\frac{dm_{\text{Pb}}^F}{d\tau} = q_{\text{Pb}} j_{\text{Pb}}^F S_K; \quad (22)$$

$$\frac{dm_{\text{Pb}}^U}{d\tau} = q_{\text{Pb}} j_{\text{Pb}}^U S_K, \quad (23)$$

где S_K – поперечное сечение катодной губки (электролизной ванны), м²; q_{Pb} – электрохимический эквивалент выделения свинца, кг/(А·с).

Блочно-модульное моделирование биполярного электролиза

Для исследования металлургических процессов в настоящее время широко используются информационные технологии, позволяющие создавать системы имитационного моделирования, применять нейронные сети и алгоритмы искусственного интеллекта.

Среди программных средств, обладающих широким функционалом для решения этих задач, наиболее удобным является пакет Matlab с приложением Simulink [21, 22]. В периодической литературе описано большое количество применений этого пакета для моделирования и исследования металлургических процессов [23–25]. Поэтому для исследования описанного выше процесса биполярного электролиза был выбран Simulink, с помощью которого была разработана блочно-модульная имитационная модель, приведенная на **рис. 4**.

Модель решает систему уравнений (10)–(20) с помощью итерационного определения силы тока I_{KU} в блоке *Algebraic Constraint*, уравнивая правую и левую части уравнения (13). Настраиваемыми параметрами модели являются коэффициенты активности ионов, кажущиеся предельные токи диффузии на поверхностных слоях катодов и плотность осаждающейся металлической губки.

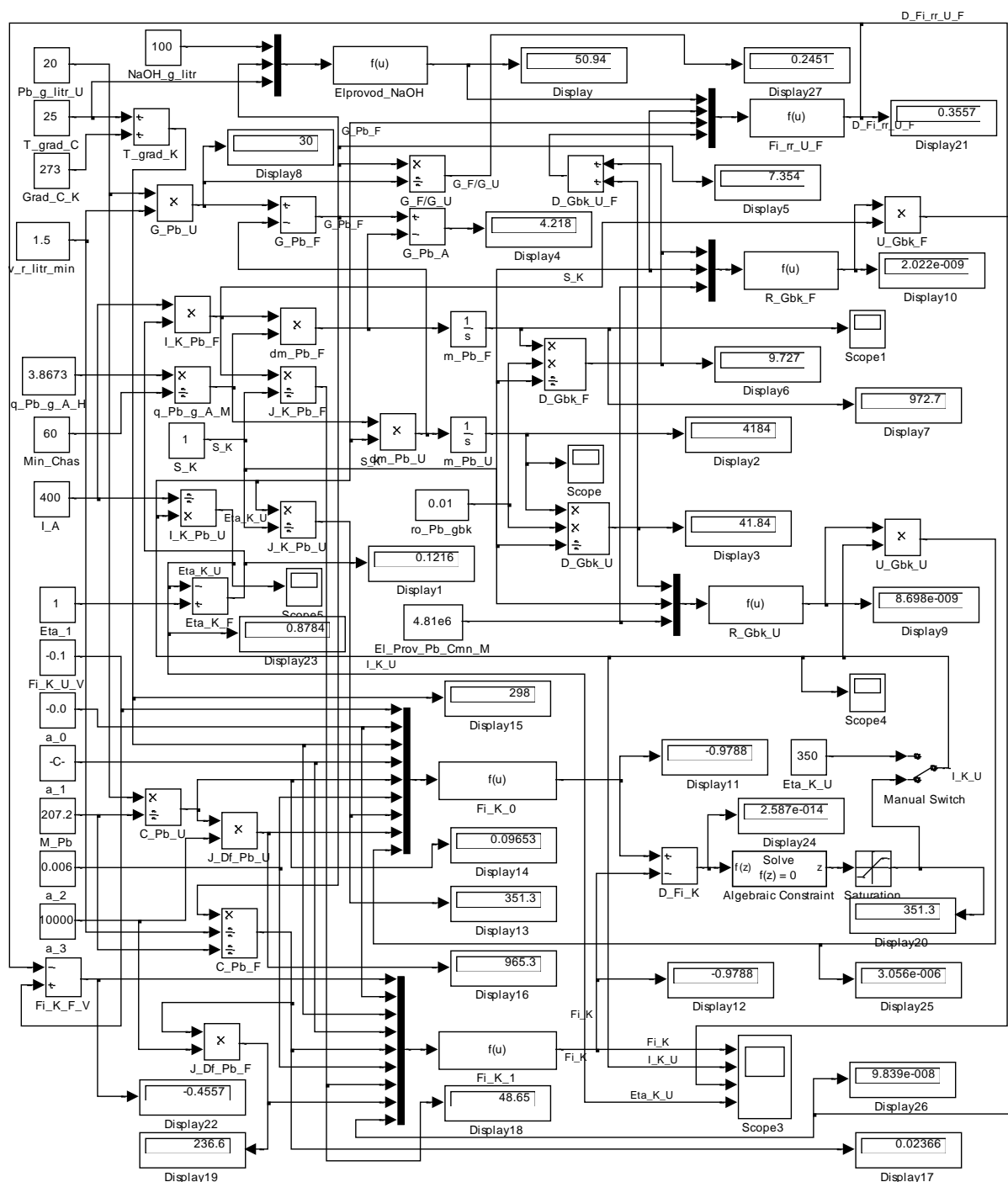


Рис. 4. Блочно-модульная схема биполярного электролитического осаждения свинцовой губки из щелочных водных растворов

Fig. 4. Block-modular scheme of bipolar electrolytic deposition of lead sponge from alkaline aqueous solutions

В левой части схемы на рис. 4 находятся блоки входных параметров модели: $NaOH_g_litr$ – концентрация NaOH, задается в диапазоне 50–150 г/л; $Pb_g_litr_U$ – концентрация Pb во входящем растворе, задается в диапазоне 10–40 г/л; T_grad_C – температура процесса, задается в диапазоне 15–45°C; $v_r_litr_min$ – скорость подачи раствора, задается в диапазоне 0,5–2 л/мин; I_A – плотность тока на попе-

речное сечение ванны, задается в диапазоне 200–600 А/м². В остальных блоках задаются константы и формулы пересчета параметров к виду, удобному для применения в модели.

В блоке $Elprovod_NaOH$ рассчитывается электропроводность раствора электролита в пространстве между лицевым и тыльным слоем катодной губки по уравнению (14). Потенциал катода с тыльной сторо-

ны φ_{KU} рассчитывается в блоке Fi_K_0 по уравнению (16). Потенциал катода с лицевой стороны рассчитывается в блоке Fi_K_1 по уравнению (10), к которому также добавляется перепад электрического потенциала в слое губки, рассчитываемый по выражению $R_{KL}I_{KL}$ в блоке $Fi_rr_U_F$.

Количество осажденного осадка на лицевой и тыльной стороне катода рассчитывался без учета выделения водорода и цинка интегрированием уравнений (19) и (20) в блоках m_Pb_F и m_Pb_U соответственно. Выход по току на тыльной и лицевой стороне катода рассчитывался по формулам

$$\eta_{Pb_{KU}} = \frac{100 \cdot m_{Pb_{KU}}}{m_{Pb_{KU}} + m_{Pb_{KF}}}, \quad (24)$$

$$\eta_{Pb_{KF}} = 100 - \eta_{Pb_{KU}}. \quad (25)$$

Разработанная модель позволяет рассчитывать показатели осаждения губки на катоде в течение заданного времени процесса и отображать результаты

на графиках и в виде массивов данных в памяти компьютера с помощью блоков *Score*.

Решение разработанной модели приведено на рис. 5. На графиках приведены показатели процесса нарастания губки с лицевой и тыльной стороны в гальваностатическом режиме с постоянной средней плотностью тока 400 А/м^2 при трех разных скоростях подачи раствора: 1,3, 1,4, 1,5 л/мин.

На кривых рис. 5, а показано значение потенциала катода в зависимости от времени проведения электролиза. При этом наблюдается понижение потенциала в результате обеднения проходящего через губку раствора. А повышение скорости потока электролита, наоборот, приводит к повышению потенциала в результате обогащения свинцом протекающего электролита.

На рис. 5, б приведены графики зависимости плотности тока на тыльной стороне катода от времени электролиза. Видно, что плотность тока повышается в зависимости от времени электролиза, в связи с повышением потенциала на тыльном слое губки и снижением на лицевом.

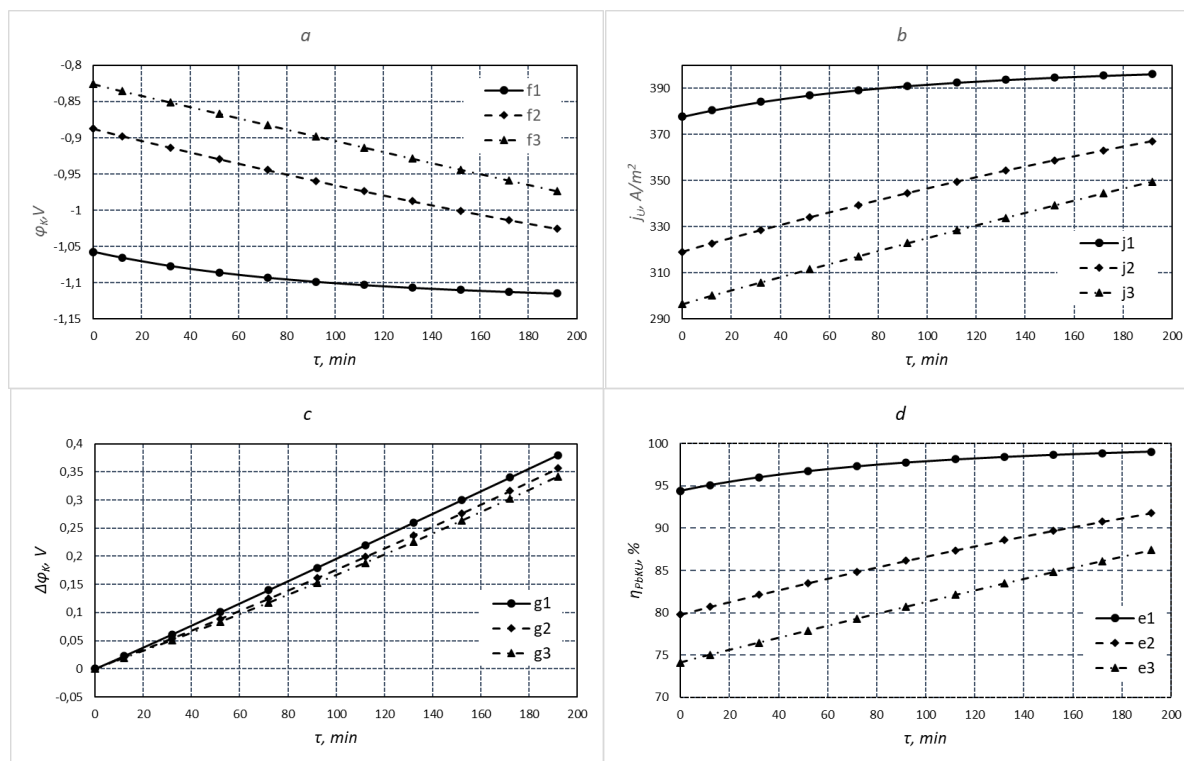


Рис. 5. Показатели биполярного электролиза при постоянной силе тока $I = 400 \text{ А}$, площади катода 1 м^2 и разной скорости подачи раствора: а – потенциал катода, В; б – плотность тока на тыльной стороне катода j_U , А/м^2 ; в – разность лицевого и тыльного потенциала катода, В; г – выход по току свинца на тыльной стороне катода $\eta_{Pb_{KU}}$, %; линии f1, j1, g1, e1 – 1,3 л/мин; линии f2, j2, g2, e2 – 1,4 л/мин; линии f3, j3, g3, e3 – 1,5 л/мин

Fig. 5. Indicators of bipolar electrolysis at constant current $I = 400 \text{ А}$, cathode area 1 м^2 and different solution flow rates: а is cathode potential, V; б is current density on the back side of the cathode j_U , А/м^2 ; в is the difference between the front and back potential of the cathode, V; г is current output of lead on the back side of the cathode $\eta_{Pb_{KU}}$, %; lines f1, j1, g1, e1 are 1.3 l/min; lines f2, j2, g2, e2 are 1.4 l/min; lines f3, j3, g3, e3 are 1.5 l/min

Повышение плотности тока на тыльной стороне катода при снижении скорости протока электролита происходит в результате более сильного разделения потенциала между тыльной и лицевой стороной катода, как это показано на **рис. 5, в**. Аналогично повышение выхода по току на тыльной стороне катода, приведенное на **рис. 5, г**, обусловлено теми же факторами.

Выводы

1. Проведено исследование биполярного электроосаждения губчатых осадков свинца из щелочных растворов на установке проточного типа и проведены эксперименты.

2. Разработана принципиальная электрическая схема и получена математическая модель процесса.

3. Создана блочно-модульная схема в Simulink, позволяющая проводить имитационное моделирование процесса.

4. Результаты имитационного моделирования показывают адекватность модели и применимость ее для использования в информационно-управляющих системах свинцового производства.

Список источников

1. Извлечение свинца и его соединений из лома аккумуляторных батарей методом десульфатации каустической содой / А.В. Лешова, Б.А. Спиридонов, В.А. Небольсин, А.Ю. Воробьев, В.П. Горшунова // Вестник ВГТУ. 2012. Т. 8, № 7-2. С. 29-31.
2. Зайцев В.Я., Маргулис Е.В. Металлургия свинца и цинка. М.: Металлургия, 1985. 263 с.
3. Щелочной электролиз воды для систем электрохимического аккумулирования энергии / В.Н. Кулешов, Н.В. Кулешов, С.В. Курочкин, А.А. Гаврилюк, С.В. Тютрина // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 5 (часть 1). С. 94-99.
4. Водно-щелочные электролизеры / Ш.Б. Шамухаммедов, Б.А. Сапаров, Г.Б. Абаева, М.А. Аннагулыев // Вестник науки и образования. 2022. № 11(131). С. 14-16.
5. Электроэкстракция свинца из свинцово-трилонатного раствора / О.С. Анисимова, В.А. Сергеев, С.В. Мамяченков, С.В. Карелов, Ю.Ф. Сергеева // Известия вузов. Цветная металлургия. 2013. № 1. С. 17 – 21.
6. Ахмадова Г.Ф., Гасанова Ф.Г., Алиев З.М. Регенерация свинца из отработанных аккумуляторов с использованием гидроксидно-гидротартратного электролита // Вестник ДГТУ. Технические науки. 2005. № 11. С. 143-146.
7. Антонов А.В., Михайленко В.Г. Исследование стабильности щелочного комплексного электролита для электроосаждения диоксида свинца // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. № 12(19).
8. Исследование электрохимических свойств щелочного электролита / М.Б. Лещинский, Г.И. Лещинская, В.Р. Загацкий, Т.Р. Никулин // Известия КГТУ. 2017. № 47. С. 159-166.
9. Михайленко В.Г., Антонов А.В. Исследование процесса электроосаждения диоксида свинца из щелочных электролитов // Гальванотехника и обработка поверхности. 2014. Т. 22, № 2. С. 29-35.
10. Пат. SU 1475985 АС СССР. Способ выделения свинца / Е. В. Маргулис, Н. В. Ходов, В. М. Зароченцев, П. Е. Маргулис, Э. А. Арчинова, Р. Н. Ярёмченко; заявитель и патентообладатель Северо-Кавказский горно-металлургический институт. №4302606/31-02; заявл. 09.09.1987. Опубл. 30.04.1989. Бюл. № 16.
11. Синтез и исследование электродно-диафрагменных блоков для щелочного электролиза воды / В.Н. Кулешов, Н.В. Кулешов, С.В. Курочкин, О.Ю. Григорьева // Электрохимия. 2022. Т. 58, № 6. С. 253-260.
12. Варенцов В.К. Применение электрохимических процессов и реакторов с трехмерными электродами для решения экологических проблем гальванотехники // Журнал экологической химии. 1993. № 4. С. 335-341.
13. Кулешов В.Н., Кулешов Н.В., Курочкин С.В. Высокоэффективные электроды для щелочного электролиза воды // Журнал прикладной химии. 2020. Т. 93, № 8. С. 1112-1117.
14. Пат. SU 1592399 АС СССР. Способ извлечения свинца / В.М. Зароченцев, Е.В. Маргулис; заявитель и патентообладатель Северо-Кавказский горно-металлургический институт. №4373904/31-02; заявл. 01.02.1988. Опубл. 15.09.1990. Бюл. № 34.
15. Биполярное электроосаждение губчатых осадков свинца из щелочных растворов на проточном сетчатом катоде / В.М. Зароченцев, А.Л. Рутковский, И.И. Болотаева, М.А. Ковалева // Цветные металлы. 2021. № 12. С. 30-35.
16. Феттер К. Электрохимическая кинетика: пер. с нем. / под ред. член-корр. АН СССР Я.М. Колотыркина. М.: Химия, 1967. 856 с.
17. Багоцкий В. С. Основы электрохимии. М.: Химия, 1988. 400 с.
18. Ньюмен Д. Электрохимические системы. М.: Мир, 1977. 464 с.
19. Баймаков Ю.В., Журин А.И. Электролиз в гидрометаллургии. 2-е изд. М.: Металлургия, 1977. 338 с.
20. Зароченцев В.М. Электропроводность щелочных свинцовых электролитов как функция состава и температуры // Известия вузов: Цветная металлургия. 1991. № 1. С. 123-124.
21. Дьяконов В.П., Круглов В.В. MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики. М.: Солон-пресс, 2006. 456 с.
22. Coetzee J.W., Deist H.E. A dynamic CIP simulation using Matlab Simulink // Computational analysis in hydrometallurgy: 35th annual hydrometallurgy meeting, Calgary, Alberta, Canada., August 21-24, 2005.
23. Corina M.D., Popa G.N., Iagar A. Mathematical Modeling and Simulation in Matlab/Simulink of Processes from Iron Ore Sintering Plants // Wseas transactions on systems. 2009, vol. 8, no. 1, pp. 34-43.

24. Simulation of a Hydrometallurgical Leaching Reactor modeled as a DAE system / M. Duenas Diez, G. Ausland, M. Fjeld, B. Lie // Modeling, Identification and Control (MIC). 2002, vol. 23, no. 4, pp. 2-28.
25. Development of a Dynamic Population Balance Plant Simulator for Mineral Processing Circuits / F. Khoshnam, M.R. Khalesi, A. K. Darban, M. J. Zarei // Int. J. Min. & Geo-Eng. 2015, vol. 49, no. 1, pp. 143-153.

References

1. Leshova A.V., Spiridonov B.A., Nebolsin V.A., Vorobyov A.Yu., Gorshunova V.P. Extraction of lead and its compounds from scrap batteries using caustic soda desulfation. *Vestnik VGTU* [VSTU Bulletin], 2012;8(7-2):29-31. (In Russ.)
2. Zaitsev V.Ya., Margulis E.V. *Metallurgiya svintsy i tsinka* [Metallurgy of lead and zinc]. Moscow: Metallurgy, 1985, 263 p. (In Russ.)
3. Kuleshov V.N., Kuleshov N.V., Kurochkin S.V., Gavriluk A.A., Tyutrina S.V.. Alkaline electrolysis of water for electrochemical energy storage systems. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high-tech technologies], 2022;(5(1)):94-99. (In Russ.)
4. Shamuhammedov Sh.B., Saparov B.A., Abaeva G.B., Annagulyev M.A. Water-alkaline electrolyzers. *Vestnik nauki i obrazovaniya* [Bulletin of science and education], 2022;(11(131)):14-16. (In Russ.)
5. Anisimova O.S., Sergeev V.A., Mamyachenkov S.B., Karelov S.B., Sergeeva Yu.F. Electroextraction of lead from lead-trilonate solution. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [News of Universities. Non-ferrous metallurgy], 2013;(1):17 – 21. (In Russ.)
6. Akhmadova G.F., Gasanova F.G., Aliev Z.M. Regeneration of lead from used batteries using hydroxide-hydrotartrate electrolyte. *Vestnik DGTU. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of DSTU. Technical Sciences], 2005;(11):143-146. (In Russ.)
7. Antonov A.V., Mikhailenko V.G. Study of the stability of an alkaline complex electrolyte for the electrodeposition of lead dioxide. *Mezhdunarodniy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International scientific research journal], 2013;(12(19)). (In Russ.)
8. Leshchinsky M.B., Leshchinskaya G.I., Zagatsky V.R., Nikulin T.R. Study of the electrochemical properties of alkaline electrolyte. *Izvestiya KGTU* [News of KSTU], 2017;(47):159-166. (In Russ.)
9. Mikhailenko V.G., Antonov A.V. Study of the process of electrodeposition of lead dioxide from alkaline electrolytes. *Galvanotekhnika i obrabotka poverhnosti* [Electroplating and surface treatment], 2014;22(2):29-35. (In Russ.)
10. Margulis E.V., Khodov N.V., Zarochentsev V.M., Margulis P.E., Archinova E.A., Yaremenko R.N. *Sposob vydeleniya svintsy* [Method of lead isolation]. Patent USSR, no. SU 1475985, 1989.
11. Kuleshov V.N., Kuleshov N.V., Kurochkin S.V., Grigorieva O.Yu. Synthesis and study of electrode-diaphragm blocks for alkaline electrolysis of water. *Elektrokhimiya* [Electrochemistry], 2022;58(6):253-260. (In Russ.)
12. Varentsov V.K. Application of electrochemical processes and reactors with three-dimensional electrodes to solve environmental problems of electroplating. *Zhurnal ekologicheskoy khimii* [Journal of Environmental Chemistry], 1993;(4):335-341. (In Russ.)
13. Kuleshov V.N., Kuleshov N.V., Kurochkin S.V. Highly efficient electrodes for alkaline electrolysis of water. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Journal of Applied Chemistry], 2020;93(8):1112-1117. (In Russ.)
14. Zarochentsev V.M., Margulis E.V. *Sposob izvlecheniya svintsy* [Lead extraction method]. Patent USSR, no. 1592399, 1990. (In Russ.)
15. Zarochentsev V.M., Rutkovsky A.L., Bolotaeva I.I., Kovaleva M.A. Bipolar electrodeposition of spongy lead precipitations from alkaline solutions on a flow mesh cathode. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals], 2021;(12):30-35. (In Russ.)
16. Fetter K. *Elektrokhimicheskaya kinetika* [Electrochemical kinetics]. Moscow: Chemistry, 1967, 856 p. (In Russ.)
17. Bagotsky V.S. *Osnovy elektrokhemii* [Fundamentals of electrochemistry]. Moscow: Chemistry, 1988, 400 p. (In Russ.)
18. Newman D. *Elektrokhimicheskie sistemy* [Electrochemical systems]. Moscow: World, 1977, 464 p. (In Russ.)
19. Baymakov Yu.V., Zhurin A.I. *Elektroliz v gidrometallurgii* [Electrolysis in hydrometallurgy]. Moscow: Metallurgy, 1977, 338 p. (In Russ.)
20. Zarochentsev V.M. Electrical conductivity of alkaline lead electrolytes as a function of composition and temperature. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [News of universities: Non-ferrous metallurgy], 1991;(1):123-124. (In Russ.)
21. Dyakonov V.P., Kruglov V.V. *MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Instrumenty iskusstvennogo intellekta i bioinformatiki* [MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Artificial intelligence and bioinformatics tools]. Moscow: Solon-press, 2006, 456 p. (In Russ.)
22. Coetzee J.W., Deist H.E. A dynamic CIP simulation using Matlab Simulink. Computational analysis in hydrometallurgy : 35th annual hydrometallurgy meeting, Calgary, Alberta, Canada., August 21-24, 2005.
23. Corina M.D., Popa G.N., Iagar A. Mathematical Modeling and Simulation in Matlab/Simulink of Processes from Iron Ore Sintering Plants. *Wseas transactions on systems*. 2009;8(1):34-43.
24. Duenas Diez M., Ausland G., Fjeld M., Lie B. Simulation of a Hydrometallurgical Leaching Reactor modeled as a DAE system. Modeling, Identification and Control (MIC). 2002;23(4):2-28.
25. Khoshnam F., Khalesi M.R., Darban A.K., Zarei M.J. Development of a Dynamic Population Balance Plant Simulator for Mineral Processing Circuits. *Int. J. Min. & Geo-Eng*. 2015;49(1):143-153.

Поступила 15.07.2024; принята к публикации 05.10.2024; опубликована 28.03.2025
Submitted 15/07/2024; revised 05/10/2024; published 28/03/2025

Зароченцев Владимир Михайлович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий и систем, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия.
Email: vlazarm@gmail.com. ORCID 0009-0006-8380-6158

Рутковский Александр Леонидович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлургии цветных металлов и автоматизации металлургических процессов, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия.
Email: rutkowski@mail.ru

Болотаева Индира Исламовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий и систем, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия;
доцент кафедры информатики и математики, Владикавказский филиал Финансового университета при Правительстве РФ, Владикавказ, Россия.
Email: iibolotaeva@mail.ru

Ковалева Мария Александровна – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой корпоративных инфокоммуникационных систем, Владикавказский филиал Финансового университета при Правительстве РФ, Владикавказ, Россия.
Email: mary_kovaleva@list.ru

Vladimir M. Zarochentsev – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technologies and Systems, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia.
Email: vlazarm@gmail.com. ORCID 0009-0006-8380-6158

Alexander L. Rutkovsky – DrSc (Eng.), Professor, Professor of the Department of Metallurgy of Non-ferrous Metals and Automation of Metallurgical Processes, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia.
Email: rutkowski@mail.ru

Indira I. Bolotaeva – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technologies and Systems, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia; Associate Professor, of the Department of Corporate Information and Communication Systems, Financial University under the Government of the Russian Federation, Vladikavkaz, Russia.
Email: iibolotaeva@mail.ru

Maria A. Kovaleva – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Corporate Information and Communication Systems, Financial University under the Government of the Russian Federation, Vladikavkaz, Russia.
Email: mary_kovaleva@list.ru

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 691.7
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-170-177



МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ САМОЗАКЛИНИВАЮЩЕЙСЯ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ УСЕЧЕННЫХ КУБОВ

Пивоварова К.Г., Песина С.А., Белов А.Я., Пивоваров Ф.В., Могильных А.Е.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Одной из стратегий достижения высоких механических характеристик при проектировании материалов является разработка самозаклинивающихся структур. Самозаклинивающиеся структуры представляют собой сборки взаимосвязанных строительных блоков, которые удерживаются вместе исключительно за счет контакта и трения на границах блоков и, таким образом, не требуют каких-либо соединительных элементов. Эта особенность делает их энергопоглощающими, устойчивыми к распространению трещин, универсальными и пригодными для повторного использования. Особенный практический интерес представляет разработка многослойных самозаклинивающихся конструкций. Предложена сборная многослойная конструкция из усеченных кубов, предназначенная для использования в качестве деталей оборудования и элементов строительства. **Цель работы.** Целью настоящей работы является изучение механического поведения многослойной самозаклинивающейся конструкции из усеченных кубов, ее структурной устойчивости и характеристик энергопоглощения. **Используемые методы.** С помощью разработанной конечно-элементной 3D-модели изучены механические характеристики самозаклинивающейся структуры из стали Х18Н9Т. **Новизна.** В исследовании предлагается новая самозаклинивающаяся конструкция из усеченных кубов. **Результат.** Проведено параметрическое исследование влияния коэффициента трения на реакцию сборки при квазистатическом нагружении трехслойной самозаклинивающейся структуры из усеченных кубов. Построены диаграммы квазистатического нагружения сборки при различных значениях коэффициента трения. Исследована структура сборки и распределение напряжений Мизеса на различных этапах деформации. Получены зависимости пиковой нагрузки и поглощаемой энергии от коэффициента трения. **Практическая значимость.** Результаты исследования позволяют проектировать энергопоглощающие материалы для различных строительных конструкций, в том числе берегозащитных сооружений, а также повышения виброустойчивости несущих колонн.

Ключевые слова: самозаклинивающиеся структуры, топологически взаимосвязанные материалы, деформация, моделирование, метод конечных элементов, жесткость, сталь

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-20073, <https://rscf.ru/project/22-19-20073/> и финансовой поддержки Челябинской области.

© Пивоварова К.Г., Песина С.А., Белов А.Я., Пивоваров Ф.В., Могильных А.Е., 2025

Для цитирования

Моделирование квазистатического нагружения многослойной самозаклинивающейся структуры на основе усеченных кубов / Пивоварова К.Г., Песина С.А., Белов А.Я., Пивоваров Ф.В., Могильных А.Е. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 170-177. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-170-177>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

SIMULATION OF QUASI-STATIC LOADING OF A MULTILAYER SELF- INTERLOCKING STRUCTURE BASED ON TRUNCATED CUBES

Pivovarova K.G., Pesina S.A., Belov A.Ya., Pivovarov F.V., Mogilnykh A.E.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). One of the strategies for achieving high mechanical performance in materials design is the development of self-locking structures. Self-locking structures are assemblies of interlocking building blocks that are held together solely by contact and friction at the block boundaries and thus do not require any connecting elements. This feature makes them energy-absorbing, crack-resistant, versatile and recyclable. Of particular practical interest is the development of multilayer self- locking structures. A prefabricated multilayer structure made of truncated cubes is proposed, intended for use as equipment parts and construction elements. **Objectives.** The purpose of this work is to study the mechanical behavior of a multilayer self-locking structure made of truncated cubes, its structural stability and energy absorption characteristics. **Methods Applied.** Using the developed 3D finite element model, the mechanical characteristics of a self-locking structure made of H18N9T steel were studied. **Originality.** The study proposes a new self-locking structure made of truncated cubes. **Result.** A parametric study of the influence of the friction coefficient on the assembly response under quasi-static loading of a three-layer self-locking structure of truncated cubes was carried out. Diagrams of quasi-static loading of the assembly were designed for various values of the friction coefficient. The structure of the assembly and the distribution of Mises stresses at various stages of deformation were studied. The dependences of the peak load and absorbed energy on the friction coefficient were obtained. **Practical Relevance.** The results of the study make it possible to design energy-absorbing materials for various building structures, including bank protection structures, as well as increasing the vibration resistance of load-bearing columns.

Keywords: self-locking structures, topologically interlocked materials, deformation, modeling, finite element method, rigidity, steel

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 22-19-20073, <https://rscf.ru/project/22-19-20073/> and financial support of the Chelyabinsk region.

For citation

Pivovarova K.G., Pesina S.A., Belov A.Ya., Pivovarov F.V., Mogilnykh A.E. Simulation of Quasi-Static Loading of a Multilayer Self- Interlocking Structure Based on Truncated Cubes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 170-177. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-170-177>

Введение

Постоянно ужесточающиеся требования машиностроительной, строительной и других отраслей промышленности заставляют инженеров-материаловедов искать новые методы улучшения характеристик конструкционных материалов [1]. Одной из стратегий достижения высоких физико-механических свойств при проектировании материалов является применение самозаклинивающихся структур [2, 3]. Самозаклинивающиеся структуры – это сборки несвязанных блоков, структурная целостность которых достигается за счет взаимосвязанной геометрии блоков, а также за счет контактных и фрикционных взаимодействий, которые развиваются на их границах [4]. Эти структуры представляют собой сборки, состоящие из кубов, тетраэдров, октаэдров и других объемных тел.

Особенностью самозаклинивающихся структур является многофункциональность, при которой материал, помимо выполнения основных требований к механическим свойствам, также обеспечивает дополнительные функциональные свойства, такие как сопротивление усталости, износостойкость, теплозащита, поглощение

энергии или акустическое демпфирование [5]. Материалы на основе самозаклинивающихся структур применяются в авиакосмической отрасли [6], для изготовления берегозащитных сооружений [7], повышения виброустойчивости несущих колонн [8] и т.д.

Особенный интерес представляет создание многослойных самозаклинивающихся конструкций. Соединение между отдельными слоями можно обеспечить, используя сочетание слоев взаимосвязанных элементов с непрерывными монолитными подложками. Примером такого сочетания является гибридная структура из топологически самозацепленных металлических кубов с гибкой полимерной подложкой [9]. Недостатком такой структуры является малая жесткость, связанная с отсутствием самозаклинивания блоков с эластичной подложкой.

Другим способом построения многослойной конструкции является использование усеченных платоновых тел [9-12]. В [13] предложена многослойная конструкция, состоящая из кубов и полукубов. Однако такая конструкция не обеспечивает самозаклинивание блоков в трех ортогональных плоскостях, что приводит к недостаточной жесткости.

Практический интерес представляет разработка конструкции из блоков, самозаклинивающихся в трех ортогональных плоскостях, обеспечивающей высокую сопротивляемость к разрушению и ее работоспособность при нагрузках в различных условиях.

Проектирование самозаклинивающихся структур из усеченных кубов

В настоящем исследовании рассмотрена сборная многослойная конструкция, предназначенная для использования в качестве деталей оборудования и элементов строительства [14]. Конструкция состоит из двух или более слоев самозаклинивающихся металлических блоков, установленных на пластину-основание рамы. Каждый блок имеет форму многогранника, полученного из куба путем скашивания всех его граней на одинаковый угол, равный $3-25^\circ$ (рис. 1). Выполнять угол, превышающий 25° , нецелесообразно, поскольку будет вырождаться кубическая структура, при этом теряется «выпуклость» блока. Выполнять угол менее 3° также нецелесообразно, что связано со сложностью изготовления блоков и погрешностью измерения малого угла.

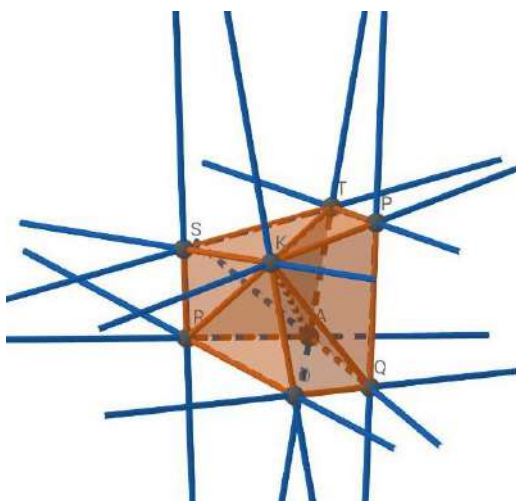


Рис. 1. Плоскости скашивания граней куба
Fig. 1. Bevel planes for cube faces

При построении структуры используются две геометрические формы элементов, выполненные зеркально друг другу (рис. 2). В каждом слое блоки различной геометрии уложены в шахматном порядке как по горизонтали, так и по вертикали (рис. 3). В случае если в слое четное число блоков, количество зеркальных блоков составляет половину от всего количества блоков.

Геометрия элементов позволяет создать полностью взаимосвязанную многослойную сборку, в которой все элементы кинематически ограничены в трех ортогональных направлениях как внутри слоев, так и между ними (рис. 4). Контактующие грани блоков параллельны друг другу, что обеспечивает большую площадь контакта.



Рис. 2. Два блока конструкции, выполненные зеркально друг другу

Fig. 2. Two construction blocks made mirror images of each other



Рис. 3. Принцип расположения (сборки) блоков в слое

Fig. 3. The principle of arrangement (assembly) of blocks in a layer

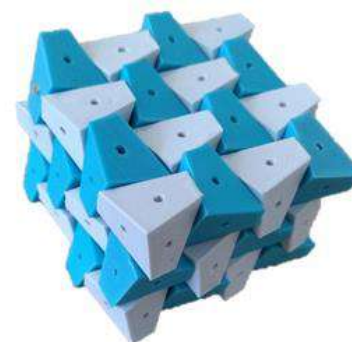


Рис. 4. Общий вид самозаклинивающейся структуры из скошенных кубов

Fig. 4. General view of a self-locking structure made of beveled cubes

Конструкция является немонолитной и имеет сегментированную структуру, состоящую из отдельных блоков определенной формы, ориентированных по отношению друг к другу в шахматном порядке. Благодаря «мозаичности» конструкции обеспечивается равномерное распределение по всей площади поверхности нагрузки, прилагаемой в процессе эксплуатации. Таким образом, существенно увеличивается сопротивляемость разрушению сборки. Конструкция не теряет работоспособности при нагрузках даже в случае разрушения части блоков.

Для создания конструкции предварительно изготавливается металлическая рама с основанием. В раму поочередно устанавливаются металлические блоки в форме скошенных кубов и идентичные им блоки, выполненные в зеркальном исполнении. Блоки могут быть выполнены на 3D-принтере по металлу.

Преимуществом предлагаемой конструкции из самозацепленных структур является невосприимчивость к локальным повреждениям. Конструкция сохраняет свою целостность, пока не будет разрушено около 30% блоков. Самозацепленные блоки конструкции также блокируют развитие магистральных трещин, которые прерываются на поверхностях раздела между соседними блоками.

Таким образом, благодаря самозаклиниванию отдельных блоков, в результате сборки формируется объемная самозаклинивающаяся структура, позволяющая перераспределить напряжения по всему мозаичному объему конструкции и повысить ее жесткость.

Целью настоящей работы является изучение механического поведения самозаклинивающейся конструкции из усеченных кубов, ее структурной устойчивости и характеристик энергопоглощения. С помощью разработанной конечно-элементной 3D-модели изучаются механические характеристики новой структуры, а также проводится параметрическое исследование для изучения эффектов трения на границе раздела.

Методология моделирования

Конечно-элементная 3D-модель сборки из усеченных кубов реализована в программном комплексе SIMULIA/Abaqus (рис. 5). Модель сборки создана из 147-ми усеченных кубов в виде прямоугольного параллелепипеда $7 \times 7 \times 3$. Наибольшая длина ребра куба составляет 15 мм. Каждый усеченный кубический блок ограничен соседними блоками, предотвращающими движение в любом направлении. Единичные блоки были дискретизированы с использованием 64-х элементов кубической формы размером 2 мм. Размер элемента был определен посредством анализа сходимости сетки, в ходе которого было обнаружено, что влияние дальнейшего измельчения сетки на механический отклик незначительно.

Усеченные кубы взаимодействовали друг с другом посредством трения и жесткого контакта. Согласно граничным условиям, боковые грани крайних блоков жестко фиксировались в пространстве.

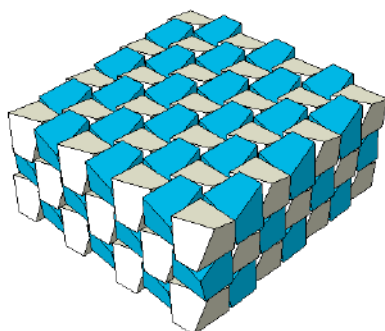


Рис. 5. Модель трехслойной самозаклинивающейся структуры из усеченных кубов

Fig. 5. Model of a three-layer self-locking structure made of truncated cubes

Для моделирования квазистатического нагружения была построена модель, представленная на рис. 6. Для приложения нагрузки использовался индентор с наконечником полусферической формы диаметром 20 мм. Индентор, смоделированный как жесткое тело массой 0,5 кг, взаимодействовал с центром сборки. Исследование проводили при скорости взаимодействия 50 мм/с. Контакт поверхностей образца и индентора определили как взаимодействие поверхность-поверхность с коэффициентом трения 0,2 и жестким контактом. Сопротивление сборки приводило к возникновению силы реакции, которая регистрировалась в контрольном узле индентора.

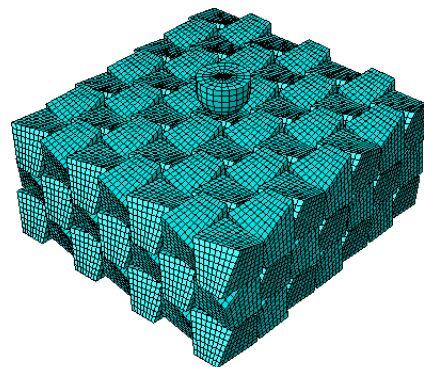


Рис. 6. Конечно-элементная модель трехслойной самозаклинивающейся структуры из усеченных кубов для численного испытания с приложением квазистатической нагрузки

Fig. 6. Finite element model of a three-layer self-locking structure of truncated cubes for numerical testing with the application of a quasi-static load

В качестве материалов для элементов сборки была выбрана сталь X18H9T, предназначенная для изготовления деталей оборудования, работающего в агрессивных средах. Для расчета упрочнения материалов в результате пластического деформирования использовали известную кривую упрочнения [15], согласно которой предел текучести можно определить по формуле

$$\sigma_{0,2} = 406 + 24\varepsilon^{0,91}, \quad (1)$$

где ε – относительное обжатие, %.

Вычисления выполнялись с явным кодом (Abaqus/Explicit). В качестве решателя был выбран Abaqus/Explicit, который способен предоставить конвергентное решение для сильно нелинейных систем со многими сложными взаимодействиями поверхностей при переходных нагрузках.

Результаты моделирования

Одним из основных параметров самозаклинивающейся структуры, определяющих реакцию конструкции на нагружение и механизм ее разрушения,

является коэффициент трения между элементами. Для определения влияния коэффициента трения между блоками на силу реакции и поглощаемую энергию проведено параметрическое исследование. Коэффициент трения варьировался в диапазоне от 0,2 до 0,4.

На **рис. 7** изображены диаграммы квазистатического нагружения сборки из стали X18H9T при различных значениях коэффициента трения. Все кривые имеют одинаковую колоколообразную форму и характеризуются начальным линейным упругим откликом, пиковой нагрузкой и режимом разупрочнения, при котором нагрузка непрерывно падает до нуля.

Кривые упругой деформации состоят из двух участков. При небольших значениях перемещения нагрузка растет по линейной зависимости. После смещения около 5 мм жесткость конструкции снижается до 50 % от начальной, при этом чем меньше коэффициент трения, тем сильнее снижается жесткость. Такое поведение кривой деформации можно объяснить тем, что при определенной нагрузке блоки начинают скользить между собой, что уменьшает площадь контакта и, соответственно, силу трения.

Нагрузка достигает максимального значения при перемещении 12 мм и сохраняется до перемещения

20 мм. При дальнейшем движении индентора нагрузка плавно снижается. Окончательное падение нагрузки наступает при перемещении 60 мм.

На **рис. 8** приведены графики зависимости пиковой нагрузки и поглощаемой энергии от коэффициента трения между элементами сборки. Из графиков можно сделать вывод о том, что пиковая нагрузка и поглощаемая энергия линейно зависят от коэффициента трения. Увеличение коэффициента трения между блоками с 0,2 до 0,4 повышает значение пиковой нагрузки на 30%, что улучшает несущую способность сборки. На **рис. 9, 10** приведено исследование структуры сборки и распределения напряжений Мизеса на различных этапах деформации. Локальная концентрация напряжений наблюдается в центре сборки. При осуществлении давления на центр сборки начинается процесс распределения напряжений во всех близлежащих компонентах структуры. Внешняя нагрузка течет от центрального элемента, к которому приложена нагрузка, к боковым элементам.

При смещении инструмента на 20 мм начинается процесс выталкивания нижнего центрального элемента из сборки, что соответствует началу падения нагрузки на диаграмме квазистатического нагружения.

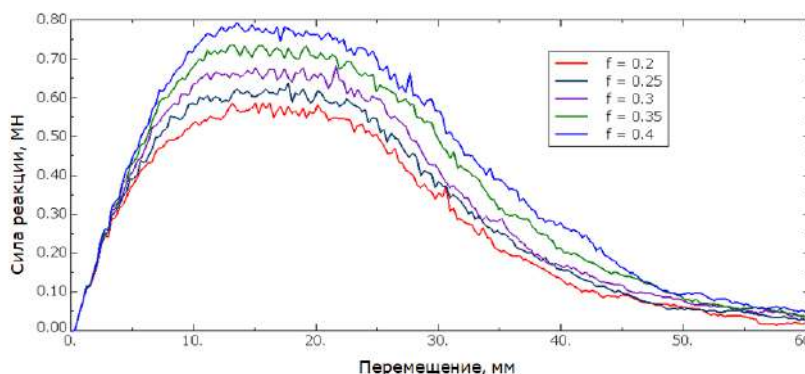


Рис. 7. Диаграммы квазистатического нагружения сборки из стали X18H9T при различных значениях коэффициента трения между элементами сборки

Fig. 7. Diagrams of quasi-static loading of an assembly made of steel H18N9T at various values of the coefficient of friction between the elements of the assembly

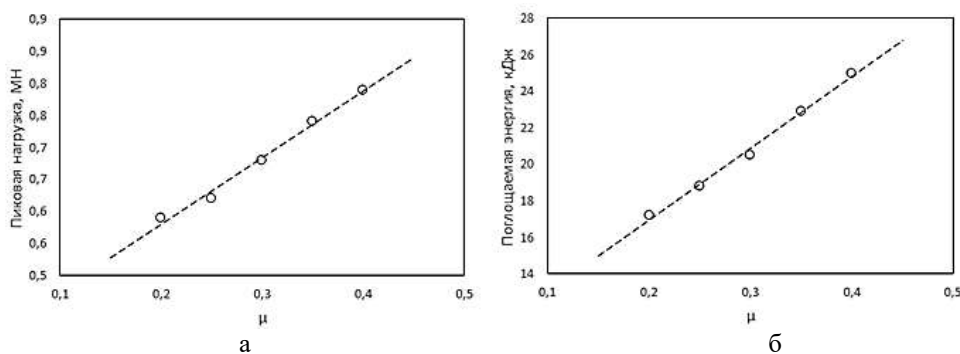


Рис. 8. Зависимость пиковой нагрузки (а) и поглощаемой энергии (б) сборки из стали X18H9T от коэффициента трения между элементами сборки

Fig. 8. Dependence of the peak load (a) and absorbed energy (b) of an assembly made of steel H18N9T on the coefficient of friction between the elements of the assembly

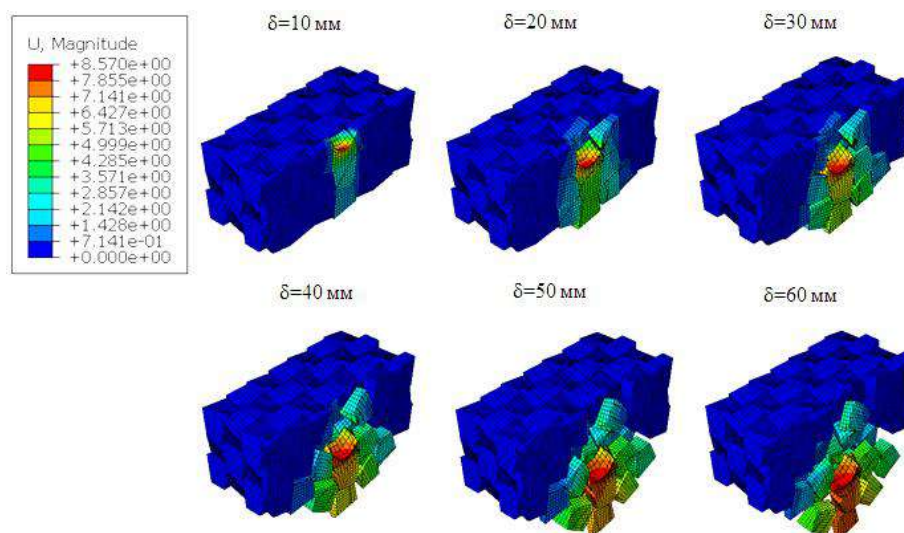


Рис. 9. Распределение деформаций (мм) в сборке из стали Х18Н9Т при различных значениях перемещения индентора δ (вид в разрезе)

Fig. 9. Distribution of strains (mm) in an assembly made of steel H18N9T at different values of indenter displacement δ (sectional view)

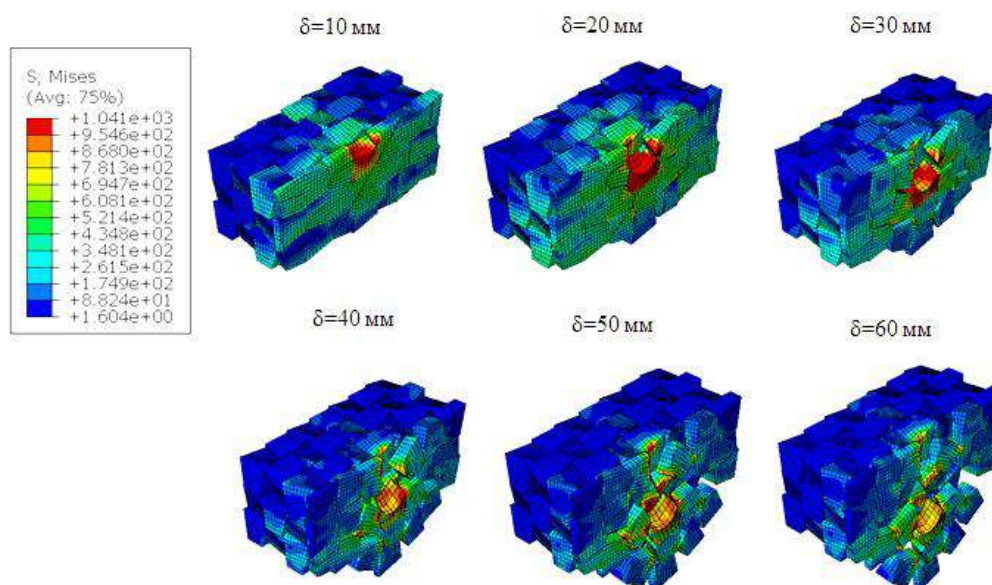


Рис. 10. Распределение напряжений Мизеса (N/mm^2) в сборке из стали Х18Н9Т при различных значениях перемещения индентора δ (вид в разрезе)

Fig. 10. Distribution of Mises stresses (N/mm^2) in an assembly made of steel H18N9T at different values of indenter displacement δ (sectional view)

При критическом смещении 50 мм центральные блоки полностью теряют контакт и выталкиваются наружу. Остальная часть сборки остается практически неповрежденной. Пластической деформации в основном подвергается верхний центральный элемент, находящийся в соприкосновении с инструментом. Поэтому сборка может быть восстановлена путем замены только одного или нескольких элементов. Таким образом, новая конструкция позволяет создавать системы, устойчивые к повреждениям и обладающие возможностями множественного воздействия.

Заключение

В исследовании представлен новый вид многослойной самозаклинивающейся структуры, собранной из усеченных кубов. Разработана конечно-элементная 3D-модель новой структуры для исследования ее механических характеристик путем приложения квазистатической нагрузки.

Проведено параметрическое исследование влияния коэффициента трения на реакцию сборки при динамическом нагружении трехслойной самозаклинивающейся структуры из усеченных кубов. Рас-

смотрена зависимость диаграммы квазистатического нагружения и параметров реакции конструкции (пиковая нагрузка и поглощаемая энергия) от коэффициента трения в диапазоне 0,2–0,4.

Основные выводы исследования:

1. Кривые упругой деформации состоят из двух участков. При небольших значениях перемещения нагрузка растет по линейной зависимости. После смещения около 5 мм жесткость сборки снижается до 50% от начальной, при этом чем меньше коэффициент трения, тем сильнее снижается жесткость.

2. Пиковая нагрузка и поглощаемая энергия линейно зависят от коэффициента трения между элементами сборки. Увеличение коэффициента трения между блоками с 0,2 до 0,4 повышает значение пиковой нагрузки на 30 %, что улучшает несущую способность сборки.

3. Разрушение сборки происходит за счет выталкивания центральных элементов, при этом остальная часть сборки остается практически неповрежденной. Сборка может быть восстановлена путем замены только одного или нескольких элементов. Таким образом, новая конструкция позволяет создавать системы, устойчивые к повреждениям и обладающие возможностями множественного воздействия.

Список источников

1. Estrin Y., Krishnamurthy V.R., Akleman E. Design of architected materials based on topological and geometrical interlocking // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021, no. 15, pp. 1165–1178.
2. Применение самозаклинивающихся структур: демонстрация концепции на основе КЭ-моделирования / Д.В. Константинов, С.В. Матвеев, А.М. Песин и др. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2023. Т. 21. № 1. С. 93–99. DOI:10.18503/19952732-2023-21-1-93-99
3. Моделирование процесса изгиба сталеалюминиевого композита с волнообразной границей раздела / К.Г. Пивоварова, С.В. Матвеев, С.А. Песина и др. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*, 2023. Т. 21. № 4. С. 138–145.
4. Scaling, saturation, and upper bounds in the failure of topologically interlocked structures / Feldfogel S., Karapiperis K., Andrade J., Kammer D.S. // *International Journal of Solids and Structures*. 2023, no. 269, 112228.
5. Transverse loading of cellular topologically interlocked materials / Khandelwal S., Siegmund T., Cipra R.J., Bolton J.S. // *International Journal of Solids and Structures*. 2012, no. 49(18), pp. 2394–2403.
6. Synergistic strengthening in interlocking metasurfaces / Young B., Bolmin O., Boyce B., Noell P. // *Materials & Design*. 2023, no. 227, 111798.
7. Пириайнен В.Ю., Эстрин Ю.З. Топологическое самозаклинивание как принцип инженерного дизайна при строительстве морских и прибрежных сооружений // *Записки Горного института*. 2017. Т. 226. С. 480–486.
8. Римшин В. И., Кришан А. Л., Астафьева М. А. Самозаклинивающиеся элементы в трубобетонных колоннах //

Academia. Архитектура и строительство. 2023. № 3. С. 140–148.

9. Estrin Y., Dyskin A. V., Pasternak E. Topological interlocking as a material design concept // *Materials Science and Engineering*. 2011, vol. 31, no. 6, pp. 1189–1194.
10. Toughness by segmentation: Fabrication, testing and micromechanics of architected ceramic panels for impact applications / Mirkhalaf M., Sunesara A., Ashrafib B., Barthelat F. // *International Journal of Solids and Structures*. 2019, no. 158, pp. 52–65.
11. Accelerated design of architected ceramics with tunable thermal resistance via a hybrid machine learning and finite element approach / Fatehi E., Sarvestani H.Y., Ashrafi B., Akbarzadeh A.H. // *Materials & Design*. 2021, no. 210, 110056.
12. Kim D.Y., Siegmund T. Mechanics and design of topologically interlocked irregular quadrilateral tessellations // *Materials & Design*. 2021, no. 212, 110155.
13. Пат. 2798518 Российская Федерация, МПК E04B 1/00 B32B 3/00. Многослойная конструкция для использования в качестве деталей оборудования и строительных элементов / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, Н.М. Локотунина, К.Г. Пивоварова, Д.Л. Певницкий, Д.В. Константинов, С.В. Пыхтунова, Ю.В. Короткова, И.А. Песин, Л.В. Носов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; заявл. 14.12.2022; опубл. 23.06.2023.
14. Пат. 2813412 Российская Федерация, МПК B32B 3/00 E04B 1/00. Сборная многослойная конструкция для использования в качестве деталей оборудования и элементов строительства / А.Я. Белов, К.Г. Пивоварова, Н.М. Локотунина, Д.Л. Певницкий, Ф.К. Нилов, С.С. Полозков, А.А. Шамсутдинов, Д.А. Завадский, Д.И. Сорокина, А.В. Сайгак, В.В. Воробьев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; заявл. 08.12.2023; опубл. 12.02.2024.
15. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1973. 224 с.

References

1. Estrin Y., Krishnamurthy V.R., Akleman E. Design of architected materials based on topological and geometrical interlocking. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:1165–1178.
2. Konstantinov D.V., Matveev S.V., Pesin A.M., Korchunov A.G., Pivovarov K.G. Application of Interlocking Structures: FEM-Based Concept Demonstration. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2023;21(1):93–99. (In Russ.) DOI:10.18503/1995-2732-2023-21-1-93-99
3. Pivovarov K.G., Matveev S.V., Pesina S.A., Kozhemyakina A.E., Pustovoitova O.V., Fedoseev S.A. Simulation of the bending process of a steel-aluminum composite with a wave-shaped interface. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2023;21(4):138–145. (In Russ.)
4. Feldfogel S., Karapiperis K., Andrade J., Kammer D.S. Scaling, saturation, and upper bounds in the failure of topologically interlocked structures. *International Journal of Solids and Structures*. 2023;269:112228.

5. Khandelwal S., Siegmund T., Cipra R.J., Bolton J.S. Transverse loading of cellular topologically interlocked materials. *International Journal of Solids and Structures*. 2012;49(18):2394-2403.
6. Young B., Bolmin O., Boyce B., Noell P. Synergistic strengthening in interlocking metasurfaces. *Materials & Design*. 2023;227:111798.
7. Piirainen V.Yu., Estrin Yu.Z. Topological self-locking as an engineering design principle in the construction of offshore and coastal structures. *Zapiski Gornogo institute* [Notes of the Mining Institute], 2017;226:480-486. (In Russ.)
8. Rimshin V.I., Krishan A.L., Astafieva M.A. Self-locking elements in pipe-concrete columns. *Academia. Arkhitektura i stroitelstvo* [Academia. Architecture and construction], 2023;3:140-148. (In Russ.)
9. Estrin Y., Dyskin A. V., Pasternak E. Topological interlocking as a material design concept. *Materials Science and Engineering*. 2011;31(6):1189-1194.
10. Mirkhalaf M., Sunesara A., Ashraf B., Barthelat F. Toughness by segmentation: Fabrication, testing and micromechanics of architected ceramic panels for impact applications. *International Journal of Solids and Structures*. 2019;158:52-65.
11. Fatehi E., Sarvestani H. Y., Ashrafi B., Akbarzadeh A. H. Accelerated design of architected ceramics with tunable thermal resistance via a hybrid machine learning and finite element approach. *Materials & Design*. 2021;210:110056.
12. Kim D.Y., Siegmund T. Mechanics and design of topologically interlocked irregular quadrilateral tessellations. *Materials & Design*. 2021;212:110155.
13. Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Lokotunina N.M., Pivovarova K.G., Konstantinov D.V., Pykhtunova S.V., Korotkova Iu.V., Pesin I.A., Nosov L.V. *Mnogoslozhnaya konstruktsiya dlya ispolzovaniya v kachestve detaley oborudovaniya i stroitelnykh elementov* [Multilayer structure for use as equipment parts and building elements]. Patent RF, no. 2798518, 2023.
14. Belov A.Ya., Pivovarova K.G., Lokotunina N.M., Pevnitskii D.L., Nilov F.K., Polozkov S.S., Shamsutdinov A.A., Zavadskii D.A., Sorokina D.I., Saigak A.V., Vorobev D.D. *Sbornaya mnogoslozhnaya konstruktsiya dlya ispolzovaniya v kachestve detaley oborudovaniya i elementov stroitelstva* [Prefabricated multilayer structure for use as equipment parts and construction elements]. Patent RF, no. 2813412, 2024.
15. Tretyakov A.V., Zyuzin V.I. *Mekhanicheskie svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniem* [Mechanical properties of metals and alloys during pressure treatment]. Moscow: Metallurgy, 1973, 224 p. (In Russ.)

Поступила 24.06.2024; принята к публикации 14.08.2024; опубликована 28.03.2025
Submitted 24/06/2024; revised 14/08/2024; published 28/03/2025

Пивоварова Ксения Григорьевна – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: k.pivovarova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-9961-4074

Песина Светлана Андреевна – доктор филологических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: pesina@magtu.ru.

Белов Алексей Яковлевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: kanelster@gmail.com. ORCID 0000-0002-1371-7479

Пивоваров Федор Валерьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: piwo.f@yandex.ru.

Могильных Анна Евгеньевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: kozhemiakina.a@yandex.ru.

Kseniya G. Pivovarova – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: k.pivovarova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-9961-4074

Svetlana A. Pesina – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: pesina@magtu.ru.

Alexey Ya. Belov – DrSc (Eng.), Chief Researcher,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: kanelster@gmail.com. ORCID 0000-0002-1371-7479

Fedor V. Pivovarov – PhD (Eng.), Senior Researcher,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: piwo.f@yandex.ru.

Anna E. Mogilnykh – PhD (Eng.), Senior Researcher,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: kozhemiakina.a@yandex.ru.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 662.951.23
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-178-189



АДАПТИВНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ЗАПАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА КОКСОВОМ ГАЗЕ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Телешев М.И.^{1,2}, Саушин И.И.^{1,2,3}, Гольцман А.Е.³, Хуснутдинова Э.М.⁴, Хамидуллина Г.Р.⁴,
Фахреева Д.Р.⁴

¹ ООО «НПП „ПРОМА“», Казань, Россия

² ООО «Завод горелочного оборудования и автоматики „ПРОМА“», Казань, Россия

³ ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

⁴ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Аннотация. Надежность работы запального устройства горелочного оборудования является важным параметром работы тепловых энергетических установок. Согласно ГОСТ Р 52229-2004 основным видом топлива запальных горелок является природный или сжиженный газ. Однако для металлургических производств актуальным является использование коксового газа в условиях небольшого присоединительного давления. Целью данной работы был процесс адаптации серийного запального устройства, работающего на природном газе и удовлетворяющего ГОСТ Р 52229-2004, к работе на коксовом газе. Высокое объемное содержание водорода в составе коксового газа приводит к существенным отличиям по величинам динамического напора потока и теплотворной способности горючей смеси по сравнению с природным газом, что в условиях небольшого присоединительного давления становится критичным для серийных запальных устройств. В данной работе предложена новая конструкция запального устройства с двумя эквивалентными газовыми трубками. По результатам численного моделирования цифровых двойников запальных горелок с одной и двумя газовыми трубками показано сходство параметров горения и общей структуры факелов на центральной оси при сжигании коксового газа в условиях присоединительного давления 15 кПа и номинальной тепловой мощности устройства 120 кВт. Однако использование конструкции с двумя газовыми трубками позволяет разместить в стволе горелки высоковольтную свечу зажигания без увеличения внешнего диаметра ствола горелки, наличие которой повышает общую надежность работы устройства и металлургической печи в целом. Предложенная конструкция также имеет преимущество по тепловому напряжению стальных элементов оголовка ствола горелки, что продлевает срок эксплуатации устройства.

Ключевые слова: запальное устройство, коксовый газ, численное моделирование, металлургия, горение

Работа выполнена при финансовой поддержке ФИЦ КазНЦ РАН (проект № FMEG-2024-0004) и ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

© Телешев М.И., Саушин И.И., Гольцман А.Е., Хуснутдинова Э.М., Хамидуллина Г.Р., Фахреева Д.Р., 2025

Для цитирования

Адаптивность и надежность работы запальных устройств на коксовом газе для металлургических производств / Телешев М.И., Саушин И.И., Гольцман А.Е., Хуснутдинова Э.М., Хамидуллина Г.Р., Фахреева Д.Р. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 178-189. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-178-189>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ADAPTABILITY AND RELIABILITY OF IGNITION DEVICE OPERATION ON COKE-OVEN GAS FOR METALLURGICAL PRODUCTION

Teleshev M.I.^{1,2}, Saushin I.I.^{1,2,3}, Goltsman A.E.³, Khusnutdinova E.M.⁴, Khamidullina G.R.⁴, Fakhreeva D.R.⁴

¹LLC NPP PROMA, Kazan, Russia

²LLC PROMA Combustion Equipment and Automation Plant, Kazan, Russia

³Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia

⁴Kazan Federal University, Kazan, Russia

Abstract. Important parameter of the operation of thermal power system is reliability of the ignition device of the combustion equipment. According to GOST R 52229-2004, the main type of fuel for ignition burners is natural or liquefied gas. However, for metallurgical production, the use of coke-oven gas under conditions of low connection pressure is relevant. The present paper has been aimed to the process of adapting a serial ignition device operating on natural gas and satisfying GOST R 52229-2004 to operation on coke-oven gas. High volumetric hydrogen content in the coke-oven gas leads to significant differences in the values of the dynamic flow pressure and the calorific effect of the combustible mixture compared to natural gas; this fact becomes critical for serial ignition devices under conditions of low connection pressure. New design of an ignition device with two equivalent gas tubes has been proposed. Digital twins of ignition burners with one and two gas tubes have been studied numerically; the similarity of the combustion parameters and of the general structure of torches on the central axis when burning coke gas at 15 kPa of a connection pressure and at 120 kW of a nominal thermal power of the device has been shown. However, the use of the unit with two gas tubes allows placing a high-voltage spark plug in the burner barrel without increasing the external diameter of it; the presence of plug increases the overall reliability of the device and the metallurgical furnace as a whole. The proposed unit also has an advantage in thermal stress of the steel elements of the burner barrel head, which extends the service life of the device.

Keywords: ignition device, coke-oven gas, numerical simulation, metallurgy, combustion

The work was carried out with the financial support of the Federal Research Center Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (project No. FMEG-2024-0004) and the FSAEI HE Kazan Federal University

For citation

Teleshev M.I., Saushin I.I., Goltsman A.E., Khusnutdinova E.M., Khamidullina G.R., Fakhreeva D.R. Adaptability and Reliability of Ignition Device Operation on Coke-Oven Gas for Metallurgical Production. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 178-189. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-178-189>

Введение

Коксовый газ является одним из основных источников тепловой энергии для металлургических предприятий, который получают при выработке кокса из каменного угля. Большая объемная доля водорода в коксовом газе по сравнению с природным газом приводит к существенным отличиям их физических характеристик, что обязательно учитывается при проектировании индустриальной горелки. Однако, помимо самой горелки, важным элементом энергетической установки является запальное устройство. Запальные устройства имеют две основные функции – это дистанционный розжиг основного горелочного устройства энергоустановки и контроль наличия пламени [1]. Сложившаяся современная общемировая тенденция к снижению допустимого уровня содержания оксидов азота (NOx) и углерода (CO) в дымовых газах энергоустановок привела к существенно непропорциональному расходу финансовых вложений в разработку новых конструкций промышленных горелок

и запальных устройств для них. В результате во многих моделях запально-зажигательных (ЗЗУ) и запально-сигнализирующих (ЗСУ) устройств используются устаревшие технологии и конструкции. Поэтому надежность работы самой современной и технологичной промышленной горелки может быть существенно ухудшена стабильностью выполнения запальным устройством своих функций [2].

Классическая конструкция газовой части запальной горелки с предварительным смешиванием (рис. 1) состоит из ствола 1, в который помещена одна или две газовые трубки (вспомогательная 1 и основная 2) с расходными сменными газовыми соплами. Также в стволе размещены центральный 3 и контрольный 4 электроды соответственно для поджига и контроля наличия пламени. Проточное сечение между этими элементами, ограниченное стенкой ствола горелки, используется для подачи воздуха к срезу расходного сопла. Расход топливного газа обеспечивается за счет присоединительного давления и регулируется диаметрами горл расходных сопел. Расход

воздуха может быть обеспечен величиной присоединительного давления, разрежением в топке энергоустановки и/или за счет действия эжектирующих сил при расширении топливного газа на выходе из сопла.

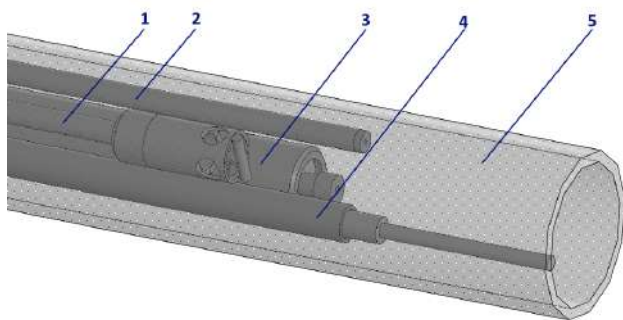


Рис. 1. Оголовок запально-защищенного устройства ЗСУ-ПИ-Exd производства ООО «НПП „ПРОМА“», Россия: 1 – вспомогательная газовая трубка с расходным соплом; 2 – основная газовая трубка с расходным соплом; 3 – электрод розжига с керамической изоляцией; 4 – электрод розжига; 5 – ствол

Fig. 1. The head of the ignition-protected device ZSU-PI-Exd manufactured by LLC NPP Proma, Russia: 1 is auxiliary gas tube with a flow nozzle; 2 is main gas tube with a flow nozzle; 3 is ignition electrode with ceramic insulation; 4 is ignition electrode; 5 is barrel

В отличие от промышленных горелок для повышения стабильности горения и снижения влияния внешних факторов воспламенение горючей смеси в запальной горелке происходит внутри ствола на расстоянии нескольких калибров до выходного сечения горелки, наконечник которой имеет исполнение из специальной жаропрочной стали [2]. Благодаря этому некоторые конструкции пилотных горелок имеют стабильную работу даже при обдуве выходного сечения инертным газом или воздухом со скоростью до 66 м/с. Максимальная тепловая мощность и минимальная длина факела и другие конструктивные характеристики запальных устройств регламентированы соответствующими стандартами [3-5].

Большинство конструкций запальных горелок рассчитаны для работы на промышленных объектах, подключенных к магистралям природного газа среднего давления. Согласно ГОСТ Р 52229 [3], основными видами топлив для запальной горелки являются природный газ по ГОСТ 5542 [6] или сжиженный газ по ГОСТ 20448 [7]. Однако для объектов металлургической отрасли существует острая потребность сжигания коксового газа собственного производства с относительно низким давлением присоединения 5-10 кПа, что также допустимо по [3], если данное топливо является основным для тепловой установки. Горелки, предназначенные для работы на природном газе, и

вся газовая система в целом обычно могут хорошо работать на смеси природного газа с водородом с объемной долей последнего не более 15-20% [8-11], в то время как в коксовом газе объемная доля водорода составляет примерно 50%. Наличие в составе смеси самого легкого газа – водорода заметно снижает её плотность, поэтому выполнение условия по сохранению тепловой мощности горелки приводит к увеличению гидравлических потерь в газовых трубках [8]. Эти гидравлические потери в зависимости от длины и диаметра газовых труб могут быть соизмеримы или даже больше величины присоединительного давления, что, очевидно, делает невозможным работу горелки. Поэтому в большинстве подобных случаев требуется увеличение внутренних диаметров газовых труб, которые, во-первых, конструктивно должны поместиться в ствол горелки, а во-вторых, оставить достаточно межтрубного пространства для расхода воздуха. Помимо этого, добавление водорода в топливную смесь увеличивает скорость и температуру пламени, увеличивает диапазон воспламеняемости, снижает яркость пламени и меняет другие факторы процесса горения [12-14].

Единственный показатель горения, который не несет негативного влияния с увеличением объемной доли водорода – это концентрация вредных веществ в дымовых газах. В зависимости от типа горелки, добавление объемной доли водорода до 30% снижает концентрацию NOx в дымовых газах примерно на 20% и незначительно увеличивает концентрацию CO [11]. Учитывая динамику изменения параметров (теплотворная способность, число Воббе, плотность, стехиометрический коэффициент) смеси природного газа с водородом при увеличении объемной концентрации водорода [15], можно ожидать схожее изменение экологических параметров и для коксового газа, где объемная доля водорода составляет порядка 50%.

В данной статье на примере запально-сигнализирующего устройства ЗСУ-ПИ-Exd (производства ООО «НПП „ПРОМА“», Россия) [3] представлена оценка возможности адаптации ЗСУ, работающего на природном газе, для работы на коксовом газе при низком присоединительном давлении с целью минимизации конструкторских изменений устройства. Результатом проведенного исследования стала принципиально новая конструкция запального устройства с двумя идентичными основными газовыми трубками, которая, как оказалось, имеет ряд преимуществ перед аналогами по диаметру и температурному состоянию ствола горелки.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования был взят состав коксового газа, который используется на одном из крупнейших металлургических заводов России (табл. 1). На основе состава коксового газа были рассчитаны его физические характеристики, необходимые для расчета запального устройства (табл. 2) [16, 17].

Таблица 1. Химический состав коксового газа
Table 1. Chemical composition of coke-oven gas

Компонент	Обозначение	Единица измерения	Водород	Метан	Этан	Оксид углерода
Химическая формула	-	-	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	CO
Молярная масса	M	г/моль	2	16	30	28
Объемная доля*	M_V	%	51	34	5	10
Теплотворная способность	H_i	кВт·ч/м ³	3,527	11,055	19,42	3,52
Плотность при н.у.	$\rho_{н.у.}$	кг/м ³	0,09	0,717	1,26	1,14
Объемный стехиометрический коэффициент	α_V	м ³ /м ³	2,4	9,5	15	2,38
Показатель адиабаты	k		1,4	1,33	1,33	1,33

*Объемные доли округлены до целых значений, из состава топливного газа были исключены компоненты с объемной долей менее 1%.

Таблица 2. Физические характеристики рассматриваемого коксового газа
Table 2. Physical characteristics of the coke-oven gas

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение
Теплотворная способность	H_i	кВт·ч/м ³	6,88
Плотность при н.у.	$\rho_{т.н.у.}$	кг/м ³	0,45
Показатель адиабаты	k		1,38
Объемный стехиометрический коэффициент	α_V	м ³ /м ³	5,44

Были рассмотрены две конструкции запальных устройств с эквивалентной тепловой мощностью (рис. 2): пилотная горелка Hegwein ZGO 120 (Durag Group, Германия) и запальная пилотная горелка ЗСУ-ПИ-Exd (НПП «ПРОМА», Россия). Из сравнения технических характеристик устройств (табл. 3) видно, что при эквивалентных величинах тепловой мощности и диаметров стволов горелки величины присоединительного давления и суммарной площади поперечных сечений газовых трубок отличаются у запальников в несколько раз (рис. 3). Третьим принципиальным отличием является способ розжига пламени. Использование в ЗСУ-ПИ-Exd высоковольтной свечи зажигания является более надежным и эффективным техническим решением по сравнению с запальным электродом. Однако высоковольтная свеча зажигания занимает больше пространства в стволе горелки (см. рис. 3).

Обеспечение эквивалентной номинальной тепловой мощности в условиях разного присоединительного давления газа имеет прямую связь с диаметрами горла сопла и газовых трубок. Горло сопла обеспечивает необходимый расход газа в условиях действующего перепада давления до и после него. Статическое давление газа перед соплом, очевидно, меньше присоединительного давления газа к горелке вследствие наличия гидравлических потерь в газовых трубках. Особенно это становится заметным для длинностовольных горелок. Поэтому возможность сохранения тепловой мощности горелки в условиях снижения присоединительного давления обеспечивается не только увеличением диаметра горла сопла, важным является сохранение динамического напора топливного газа за счет увеличения диаметра газовых трубок.



Рис. 2. Запальные горелки: 1 – Hegwein ZGO 120 производства Durag Group, Германия; 2 – ЗСУ-ПИ-Exd производства ООО «НПП „ПРОМА“», Россия

Fig. 2. Ignition burners: 1 is Hegwein ZGO 120 manufactured by Durag Group, Germany; 2 is ZSU-PI-Exd manufactured by LLC NPP PROMA, Russia

Таблица 3. Сравнение заявленных характеристик Hegwein ZGO 120 и ЗСУ-ПИ-Exd
Table 3. Comparison of the declared characteristics of Hegwein ZGO 120 and ZSU-PI-Exd

Изделие	Единица измерения	Hegwein ZGO 120	ЗСУ-ПИ-Exd	ЗСУ-ПИ-Exd модифицированная
Номинальная тепловая мощность	кВт	120	120	120
Длина факела	мм	600	800	
Диаметр ствола	мм	48	45	45
Суммарная площадь сечений газовых трубок	мм ²	93,6	25,1	99,5
Присоединительное давление газа	кПа	5–15	3–100	5–15
Температура эксплуатации	°С	От -40 до +60	От -60 до +80	
Контроль погасания пламени		Ионизационный датчик		
Розжиг		Запальный электрод	Высоковольтная свеча зажигания	
Тип топлива		Природный газ, сжиженный углеводородный газ, коксовый газ, технологический газ	Природный газ, сжиженный углеводородный газ	Природный газ, сжиженный углеводородный газ, коксовый газ, технологический газ

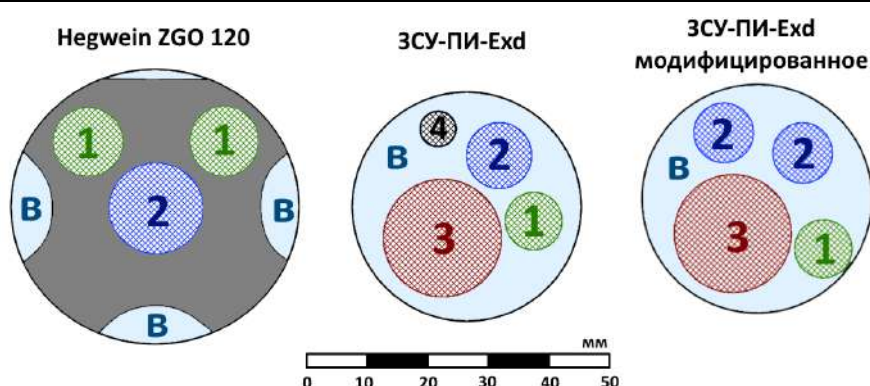


Рис. 3. Распределение площади поперечного сечения запальных горелок: 1 – электрод с керамикой; 2 – основная газовая трубка; 3 – высоковольтная свеча зажигания; 4 – вспомогательная газовая трубка; «В» – проточное сечение для воздуха
Fig. 3. Distribution of the cross-sectional area of the ignition burners: 1 is electrode with ceramics; 2 is main gas tube; 3 is high-voltage spark plug; 4 is auxiliary gas tube; "B" is flow section for air

Для обеспечения тепловой мощности 120 кВт при величине присоединительного давления коксового газа 15 кПа в горелке ЗСУ-ПИ-Exd площадь сечений газовых трубок должна быть увеличена в 3–4 раза. Однако наличие высоковольтной свечи зажигания не позволит разместить газовую трубку требуемого диаметра без увеличения диаметра ствола горелки. Одним из технических решений является использование схемы с двумя эквивалентными газовыми трубками (вместо основной и вспомогательной (см. рис. 3)), суммарная поперечная площадь сечений которых обеспечит приемлемый уровень гидравлических потерь. При этом, в отличие от Hegwein ZGO 120, горелка будет иметь более технически эффективный способ розжига с помощью высоковольтной свечи зажигания.

На основе расчетов гидравлических потерь Δp и необходимого диаметра отверстия d^* горла сопла при докритическом режиме истечения по классическим гидродинамическим соотношениям (1) и (2) [18, 19] для ЗСУ-ПИ-Exd было выбрано конструктивное ис-

полнение с двумя газовыми трубками с суммарной площадью поперечного сечения 99 мм².

$$\Delta p = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,64)^2} \frac{l}{d} \frac{\rho V^2}{2}, \quad (1)$$

$$d^* = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{G}{\mu} \sqrt{\frac{2kP_1\rho_1}{k-1} \left(\left\{ \frac{P_2}{P_1} \right\}^{\frac{2}{k}} - \left\{ \frac{P_2}{P_1} \right\}^{\frac{k+1}{k}} \right)} \right]^{0.5}, \quad (2)$$

где l – длина прямого участка трубы круглого сечения диаметра d ; V – среднерасходная скорость газа; ρ – плотность газа; $Re = Vd/\nu$ – число Рейнольдса; ν – кинематическая вязкость; G – массовый расход газа; P – давление; k – показатель адиабаты; μ – коэффициент расхода; индексы 1 и 2 – параметры среды до и после отверстия.

На первом этапе исследования были подготовлены цифровые двойники изделий Hegwein ZGO 120 и

модифицированной горелки ЗСУ-ПИ-Exd, работа которых была математически смоделирована в пакете ANSYS Fluent в псевдостационарной постановке. Движение неразрывной сплошной среды описывалось уравнениями сохранения импульса, энергии и компонентов смеси с общим видом

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\Phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S_\Phi, \quad (3)$$

где Φ – зависимые переменные; Γ – коэффициент переноса переменной Φ ; u – скорость среды; ρ – плотность среды; S_Φ – источниковый член уравнения движения переменной Φ .

Для моделирования турбулентности использовалась изотропная модель k - ε Standart. Процесс горения коксового газа (см. табл. 1) рассчитывался по модели без предварительного смешивания (non premixed combustion model), где термохимическое состояние сплошной среды связано с сохраняющейся скалярной величиной, известной как фракция смеси f . Взаимодействие турбулентности и химии учитывается с предполагаемой формой, являющейся β -функцией плотности вероятности (PDF). Доля смеси может быть выражена через атомную массовую долю:

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,O}}{Z_{i,T} - Z_{i,O}}, \quad (4)$$

где Z_i – массовая доля элемента i , нижние индексы: O – значение на входе окислителя; T – значение на входе топлива.

При условии равенства коэффициентов диффузии (когда турбулентная конвекция подавляет молекулярную диффузию) уравнения можно свести к единому осредненному по Фавру (осредненному по плотности) уравнению для фракции смеси:

$$\frac{\partial(\rho \bar{f})}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u} \bar{f}) = \nabla \left(\left[\frac{\kappa}{c_p} + \frac{\mu_T}{\sigma_T} \right] \nabla \bar{f} \right), \quad (5)$$

где κ – ламинарная теплопроводность смеси; c_p – удельная теплоемкость смеси; σ_T – число Прандтля; μ_T – турбулентная вязкость.

Для замыкания системы и связи химических реакций с турбулентностью также решается уравнение для дисперсии фракции смеси:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \overline{f'^2})}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u} \overline{f'^2}) = \nabla \left(\left[\frac{\kappa}{c_p} + \frac{\mu_T}{\sigma_T} \right] \nabla \overline{f'^2} \right) + \\ + C_\varepsilon \mu_T (\nabla \bar{f})^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{f'^2}, \quad f' = f - \bar{f}, \end{aligned} \quad (6)$$

где C_d и C_ε – константы; ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности; k – кинетическая энергия турбулентности.

Тандем модели турбулентности k - ε Standart с моделью горения без предварительного смешивания для сжигания коксового газа и родственных смесей также использовался в недавней работе [20], где результаты расчетов были признаны удовлетворительными. По этой причине отдельных тестов математической постановки задачи по расчету горения коксового газа в данном исследовании не проводилось. Для моделирования излучения была выбрана диффузионная модель P-1, которая благодаря допущению об изотропности поля излучения является более экономичной. Наименование P-1 обусловлено тем, что поток энергии излучения пропорционален градиенту плотности энергии излучения. Как показывает практика, неопределенность результатов расчета излучения моделью P-1 является приемлемой для факельных установок.

Для связи давления и скорости использовалась схема Coupled. В пространственной дискретизации для членов конвекции во всех уравнениях переноса использовалась противопоточная схема второго порядка. Для дискретизации давления использовался метод PRESTO!. Абсолютные критерии сходимости для всех параметров невязок были ограничены величиной 10^{-4} , за исключением уравнений энергии и P-1, где параметры невязок были ограничены величиной 10^{-6} .

На рис. 4 изображена расчетная модель, включающая полный проточный тракт коксового газа и воздуха в стволе горелки длиной 2300 мм от места присоединения до выхода в цилиндрическую топку длиной 1500 мм и диаметром 300 мм. Расход коксового газа обеспечивался за счет перепада присоединительного давления (15 кПа) и давления на выходе из топки (0 кПа). Расход воздуха обеспечивался за счет перепада присоединительного давления (15 кПа) и давления на выходе из топки (0 кПа). В первом приближении расчетные области были разделены на 2 миллиона вычислительных доменов тетраэдральной формы. Проверка сеточной сходимости была выполнена постепенным увеличением масштаба разбиения зоны горения и смешивания компонентов до тех пор, пока графики температуры на центральной продольной оси топочной камеры имели расхождение более 3%. Окончательное количество расчетных доменов в моделях составило порядка 3,5 миллионов. В процессе расчета также выполнялась адаптация пристеночных расчетных доменов по параметру y^+ в соответствии с требованиями выбранной модели турбулентности k - ε .

Для оценки температурного состояния элементов горелки, находящихся в зоне воздействия температур, в расчет также были добавлены твердотельные тела, которые имели сопряженный тип сеточного разбиения с областями движения сжимаемой среды.

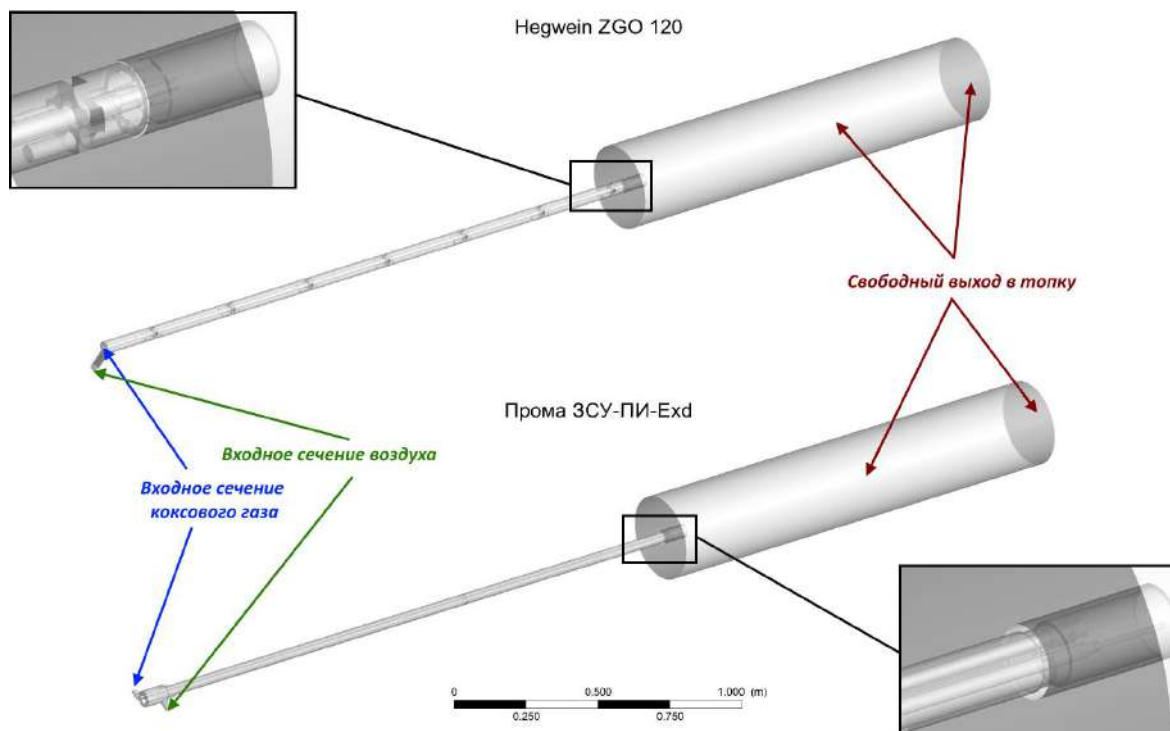


Рис. 4. Расчетные области для численного моделирования
Fig. 4. Computational domains for numerical simulation

Полученные результаты и их обсуждение

В табл. 4 и на рис. 5 представлены сопоставления результатов численного моделирования цифровых двойников рассмотренных горелок. Номинальная тепловая мощность горелки ЗСУ-ПИ-Exd по результатам расчетов оказалась незначительно меньше 120 кВт по причине неучтенных потерь давления в проточном тракте при теоретической оценке. Очевидно, что при необходимости довести значение тепловой мощности до 120 кВт можно за счет небольшой корректировки диаметра горла сопла. С другой стороны, следует помнить о непостоянстве состава коксового газа и его теплотворной способности, поэтому полученное отклонение в 3% является условным и допустимым. Вторым важным параметром запальной или пилотной горелки является длина факела, а в контексте данного исследования – влияние подачи топлива

через две (ЗСУ-ПИ-Exd) газовые трубки вместо одной (Hegwein ZGO 120).

Номинальную длину факела можно оценить как расстояние от выходного сечения горелки до точки, где концентрация диоксида углерода (CO_2) понизится до уровня 95% от достигнутого максимального значения. Полученные по результатам численного моделирования оценки концентрации диоксида углерода (CO_2) на центральной продольной оси сопел горелок показывают (см. рис. 5), что техническое решение, примененное в устройстве горелки ЗСУ-ПИ-Exd, не оказывает существенного влияния на длину факела. При подаче коксового газа из двух сопел длина факела становится короче лишь на 8%, по сравнению с вариантом подачи из одного сопла. Укорачивание факела ожидаемо сопровождается увеличением его диаметра. Это всё наглядно видно и на сопоставлении температурных полей в топке (рис. 6).

Таблица 4. Сравнение расчетных характеристик горелок Hegwein ZGO 120 и ЗСУ-ПИ-Exd при работе на коксовом газе

Table 4. Comparison of the calculated characteristics of the Hegwein ZGO 120 and ZSU-PI-Exd burners when operating on coke gas

Характеристики	Единица измерения	Hegwein ZGO 120	ЗСУ-ПИ-Exd модифицированная
Номинальная тепловая мощность	кВт	121	116
Длина факела	мм	655	590/605*
Внешний диаметр ствола	мм	50	45
Суммарная площадь сечений газовых трубок	мм ²	93,6	99,5
Присоединительное давление газа	кПа	15	15

*Длина факела на центральной оси одного из двух сопел / длина объединенного факела от двух сопел.

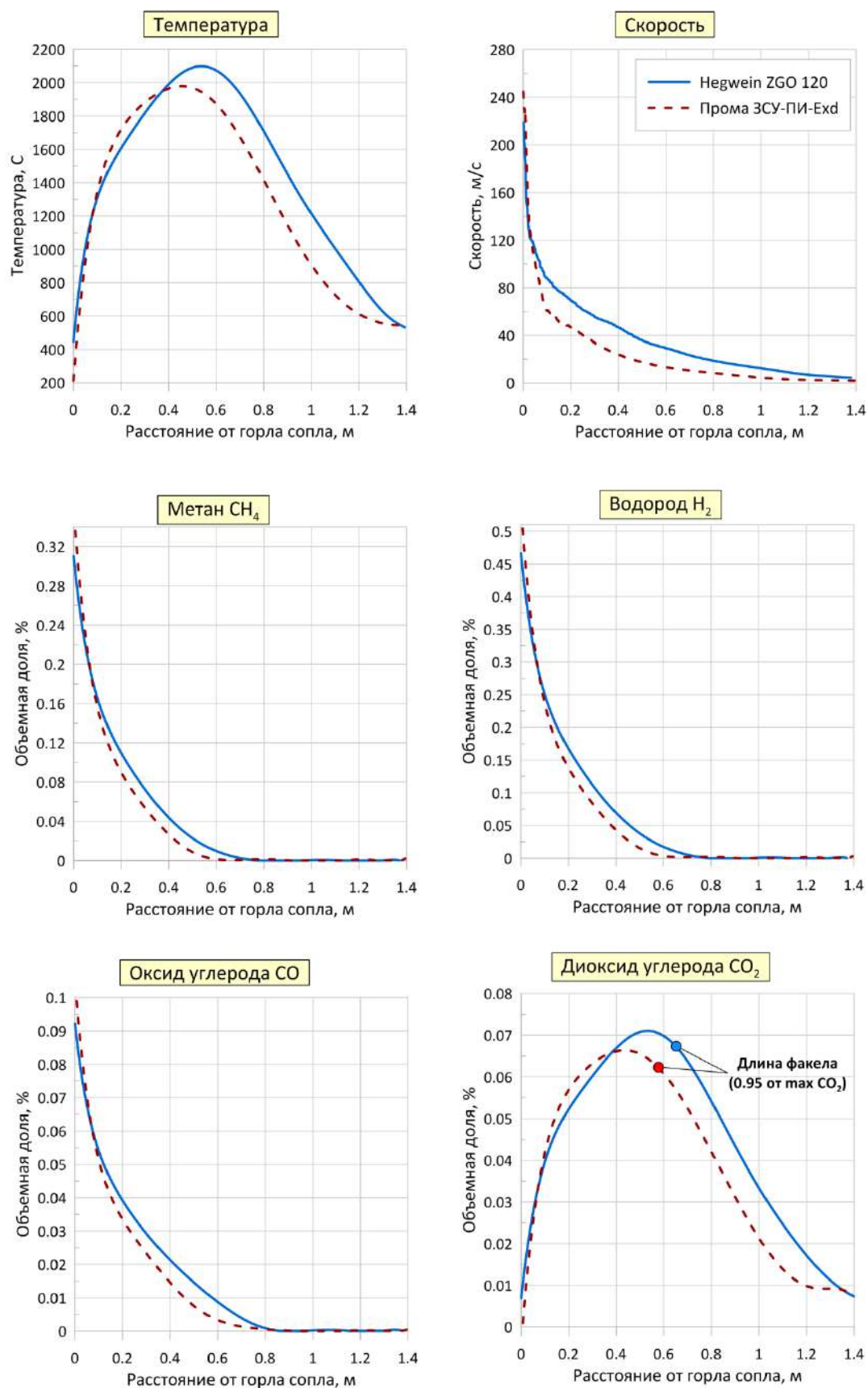


Рис. 5. Параметры на центральной продольной оси сопел горелок
Fig. 5. Parameters on the central longitudinal axis of the burner nozzles

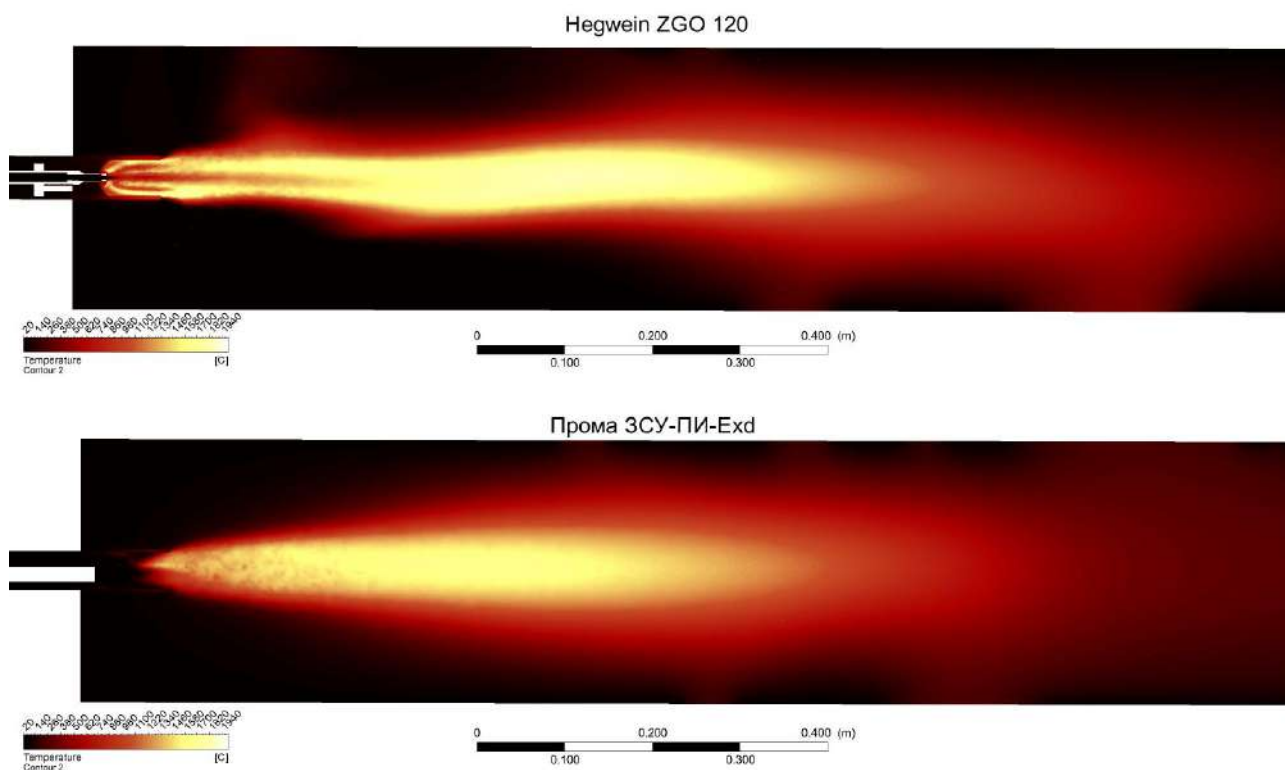


Рис. 6. Поля температуры горения коксового газа
Fig. 6. Temperature field of coke-oven gas combustion

Графики распределения объемной доли метана (CH_4) и водорода (H_2) показывают полное сгорание топливного газа для обеих конструкций горелки (см. рис. 5). Единственным явным недостатком формирования факела из двух источников является более интенсивная скорость торможения струи, что ухудшает стабилизацию факела при боковом обдуве внешним источником. Сокращение длины стабильного участка факела от воздействия внешних факторов можно оценить величиной порядка 200 мм.

Наиболее важным результатом исследования является сопоставление температурных полей сжимаемых и твердотельных сред. Известно, что увеличение источников подачи топливного газа при сохранении тепловой мощности способствует улучшению перемешивания с воздухом и снижению локальных температурных экстремумов. Главным образом, эта техника используется для повышения класса экологичности горелочного устройства – снижения концентрации оксидов азота (NO_x) в дымовых газах, механизм образования которых имеет прямую связь с температурой. В горелке ЗСУ-ПИ-Exd с двумя источниками подачи топливного газа максимальная температура в факеле оказалась примерно на 100°C меньше (см. рис. 5). В сравнении с основной горелкой, уровень выбросов NO_x в запальной или пилотной горелке почти на порядок меньше, поэтому в данной работе

мы дополнительно не оценивали этот параметр как второстепенный в масштабах всей энергетической установки.

Распределение температуры на начальном участке центральной оси факела (порядка 80 мм) в пределах внутреннего пространства наконечника ствола для обоих горелочных устройств является эквивалентным (см. рис. 5). Температурное состояние стальных стенок оголовков ЗСУ-ПИ-Exd и Hegwein ZGO 120 порядка 700°C (рис. 7) удовлетворяет требованиям [API 537]. Однако температурное состояние оголовка Hegwein ZGO 120 оказалось более напряженным. Область высоких температур оголовка ствола Hegwein ZGO 120 соответствует расположению электродов, наличие которых приводит к неравномерности профиля скорости и сопутствующего охлаждения стенки оголовка вниз по потоку. Это также видно и на рис. 3: проточные отверстия «В» для воздуха у Hegwein ZGO 120 расположены вдалеке от электродов «1». У стенок оголовка ЗСУ-ПИ-Exd также наблюдается неравномерный нагрев стенки оголовка, но причиной этому является уже вынужденное неконцентрическое расположение газовых сопел, вблизи которых и наблюдается область максимальных температур стенки оголовка. Но, с другой стороны, такая конструкция обеспечивает более равномерное распределение охлаждающего потока воздуха в сечении (см. рис. 3) и лучшее охлаждение стенки оголовка.

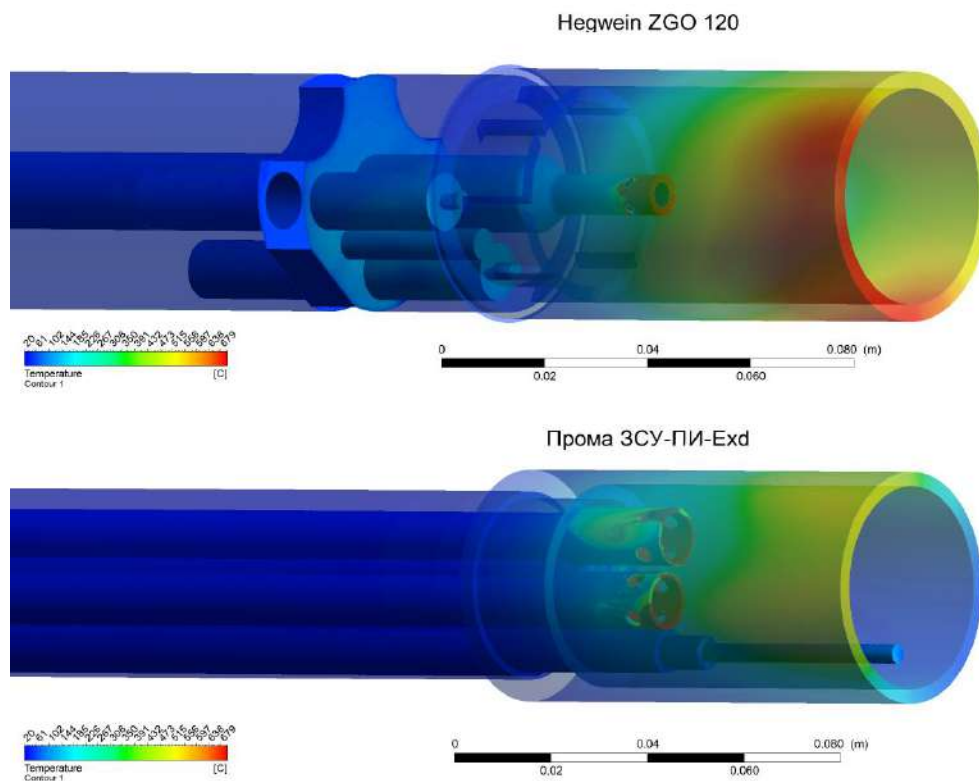


Рис. 7. Температурное состояние стальных деталей
Fig. 7. Temperature condition of steel parts

Закключение

В данной работе впервые подробно рассмотрен процесс адаптации запальной горелки ЗСУ-ПИ-Exd, соответствующей ГОСТ Р 52229-2004, к работе на коксовом газе в условиях низкого присоединительного давления. В условиях сохранения величины внешнего диаметра ствола горелки была предложена новая конструкция запальной горелки ЗСУ-ПИ-Exd с двумя эквивалентными газовыми трубками. Данное исполнение позволило сохранить в составе горелки высоковольтную свечу зажигания (см. **рис. 3**), что является существенным преимуществом перед аналогичными изделиями данного класса и повышает общую надежность работы устройства. Сопоставление результатов численного моделирования цифровых двойников изделий с одной газовой трубкой (Hegwein ZGO 120) и с двумя газовыми трубками (ЗСУ-ПИ-Exd) показали схожие параметры горения факела на центральной оси (см. **рис. 5**). При этом благодаря более равномерному профилю скорости в оголовке ствола температурная напряженность стальных элементов горелки ЗСУ-ПИ-Exd оказалась ниже, чем у рассмотренного аналога.

Список источников

1. Baukal Jr C. E. (ed.). The John Zink Hamworthy combustion handbook: Volume 3-Applications. New York: CRC press, 2012. 454 p.
2. Parker J., Guerra R. Advanced pilot technology: Ignition, flame detection and re-ignition // Process Safety Progress. 1996, vol. 15, no. 4, pp. 227-229. DOI:10.1002/prs.680150409.
3. ГОСТ Р 52229-2004. Устройства запально-защищенные. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2004. 15 с.
4. API 537. Flare Details for Petroleum, Petrochemical, and Natural Gas Industries, Third Edition, Includes Addendum Washington: American Petroleum Institute, 2020. 195 p.
5. ISO 25457. Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Flare details for general refinery and petrochemical service. Geneva: ISO copyright office, 2008. 128 p.
6. ГОСТ 5542-2022. Газ природный промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 18 с.
7. ГОСТ 20448-2018. Газы углеводородные сжиженные топливные для коммунально-бытового потребления. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2018. 15 с.
8. Aniello A. et al. Hydrogen substitution of natural-gas in premixed burners and implications for blow-off and flashback limits // International Journal of Hydrogen Energy. 2022, vol. 47, no. 77, pp. 33067-33081. DOI:10.1016/j.ijhydene.2022.07.066.
9. Safe Operation of Natural Gas Appliances Fuelled with Hydrogen & Natural Gas Mixtures (Progress Obtained in the NaturalHy-Project) / De Vries H., Florisson O., Tiekstra G.C. // International Conference on Hydrogen Safety. Derby: IGEN House, 2007. Pp. 1-12.

10. Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: a review of key issues / Melaina M. W., Antonia O., Penev M. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2013. 131 c.
11. Impact of hydrogen/natural gas blends on partially premixed combustion equipment: NOx emission and operational performance / Glanville P., Fridlyand A., Sutherland B. et al. // *Energies*. 2022, vol. 15, no.5, pp. 1706. DOI:10.3390/en15051706.
12. Impact of Hydrogen Admixture on Combustion Processes—Part II: Practice / Schaffert J., Leicher J., Burmeister F. et al. Berlin: THyGA, 2020. 75 p.
13. Implications of Increased Renewable Natural Gas on Appliance Emissions and Stability / McDonell V.G. Zhao Y., Choudhury S. et al. California: Energy Commission, 2020. 101 p.
14. Appliance and equipment performance with hydrogen-enriched natural gases / Suchovsky C.J., Ericksen L., Williams T.A. et al. // Canadian Standards Association, Toronto: ON, 2021. 56 p.
15. Compressed Natural Gas Vehicle Fuel Surv CRC Project No. PC-2-12 / George D.L., Poemer N.W., Ridens B.L. et al. San Antonio: Southwest Research Institute. 2014. 194 p.
16. Engineering ToolBox. URL: <https://www.engineeringtoolbox.com> (дата обращения: 28.07.2024)
17. Thermodynamic Properties and Gas Mixtures. Thermodynamics, Gas Dynamics, and Combustion / Foust III H.C. Cham: Springer International Publishing, 2021. Pp. 125-148.
18. Idelchik I.E. Flow resistance: a design guide for engineers. New York: Routledge, 2017. 416 p. DOI: 10.1201/9780203755754.
19. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
20. Bose D., Kumar I., Hens A. Enhancing fuel-air mixing in COG-BOG non-premixed combustion: A CFD analysis with different turbulent models // *Journal of the Indian Chemical Society*. 2024, vol. 101, no. 9, 101222. DOI: 10.1016/j.jics.2024.101222.
6. State standard GOST 5542-2022. Natural gas for industrial and municipal purposes. Technical conditions. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2022. 18 p. (In Russ.)
7. State standard GOST 20448-2018. Liquefied hydrocarbon gases for domestic and public consumption. Technical conditions. Moscow: Standards Publishing House, 2018. 15 p. (In Russ.)
8. Aniello A. et al. Hydrogen substitution of natural-gas in premixed burners and implications for blow-off and flashback limits. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(77):33067-33081. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.07.066
9. De Vries H., Florisson O., Tiekstra G.C. Safe Operation of Natural Gas Appliances Fuelled with Hydrogen & Natural Gas Mixtures (Progress Obtained in the Naturalhy-Project). International Conference on Hydrogen Safety. Derby: IGEM House, 2007, pp. 1-12.
10. Melaina M. W., Antonia O., Penev M. Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: a review of key issues. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2013. 131 p.
11. Glanville P., Fridlyand A., Sutherland B. et al. Impact of hydrogen/natural gas blends on partially premixed combustion equipment: NOx emission and operational performance. *Energies*. 2022;15(5):1706. DOI: 10.3390/en15051706.
12. Schaffert J., Leicher J., Burmeister F. et al. Impact of Hydrogen Admixture on Combustion Processes—Part II: Practice. Berlin: THyGA, 2020. 75 p.
13. McDonell V.G. Zhao Y., Choudhury S. et al. Implications of Increased Renewable Natural Gas on Appliance Emissions and Stability. California: Energy Commission, 2020. 101 p.
14. Suchovsky C.J., Ericksen L., Williams T.A. et al. Appliance and equipment performance with hydrogen-enriched natural gases. Canadian Standards Association, Toronto: ON, 2021. 56 p.
15. George D.L., Poemer N.W., Ridens B.L. et al. Compressed Natural Gas Vehicle Fuel Surv CRC Project No. PC-2-12. San Antonio: Southwest Research Institute. 2014. 194 p.

References

1. Baukal Jr C. E. (ed.). The John Zink Hamworthy combustion handbook: Volume 3-Applications. New York: CRC press, 2012. 454 p.
2. Parker J., Guerra R. Advanced pilot technology: Ignition, flame detection and re-ignition. *Process Safety Progress*. 1996;15(4):227-229. DOI:10.1002/prs.680150409
3. State standard GOST P 52229-2004. Ignition-protected devices. General specifications. Moscow: Standards Publishing House, 2004. 15 p. (In Russ.)
4. API 537. Flare Details for Petroleum, Petrochemical, and Natural Gas Industries, Third Edition, Includes Addendum Washington: American Petroleum Institute, 2020. 195 p.
5. ISO 25457. Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Flare details for general refinery and petrochemical service. Geneva: ISO copyright office, 2008. 128 p.
16. Engineering ToolBox. Available at: <https://www.engineeringtoolbox.com> (Accessed July 28, 2024)
17. Foust III H.C. Thermodynamic Properties and Gas Mixtures. Thermodynamics, Gas Dynamics, and Combustion. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 125-148.
18. Idelchik I.E. Flow resistance: a design guide for engineers. New York: Routledge, 2017. 416 p. DOI: 10.1201/9780203755754
19. Loitsyansky L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza: ucheb. dlya vuzov* [Mechanics of liquids and gases: textbook]. Moscow: Drofa, 2003. 840 p. (In Russ.)
20. Bose D., Kumar I., Hens A. Enhancing fuel-air mixing in COG-BOG non-premixed combustion: A CFD analysis with different turbulent models. *Journal of the Indian Chemical Society*. 2024;101(9):101222. DOI: 10.1016/j.jics.2024.101222.

Поступила 19.08.2024; принята к публикации 12.12.2024; опубликована 28.03.2025
Submitted 19/08/2024; revised 12/12/2024; published 28/03/2025

Телешев Михаил Игоревич – заместитель директора по производству, ООО «НПП „ПРОМА“», ООО «Завод горелочного оборудования и автоматики „ПРОМА“», Казань, Россия.
Email: teleshev@promav.ru.

Саушин Илья Ирекович – кандидат технических наук, заместитель директора по науке, ООО «НПП „ПРОМА“», ООО «Завод горелочного оборудования и автоматики „ПРОМА“», старший научный сотрудник, ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия.
Email: saushin@promav.ru. ORCID 0000-0003-4958-1507

Гольцман Анна Евгеньевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия.
Email: an116ya@mail.ru. ORCID 0000-0001-6015-670X

Хуснутдинова Эльвира Мусавировна – кандидат технических наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия.
Email: rr-088@mail.ru. ORCID 0000-0002-9496-5318

Хамидуллина Гульнара Рафкатовна – доктор экономических наук, профессор, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия.
Email: gulnarah@list.ru. ORCID 0000-0001-9781-4841

Фахреева Диляра Рамилевна – кандидат педагогических наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия.
Email: diliara17_91@mail.ru

Mikhail I. Teleshev – Deputy Director for Production, LLC NPP PROMA, Kazan, Russia;
LLC PROMA Combustion Equipment and Automation Plant, Kazan, Russia.
Email: teleshev@promav.ru

Ilya I. Saushin – PhD (Eng.), Deputy Director for Science, Senior Researcher LLC NPP PROMA, Kazan, Russia;
LLC PROMA Combustion Equipment and Automation Plant, Kazan, Russia;
Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia.
Email: saushin@promav.ru. ORCID 0000-0003-4958-1507

Anna E. Goltsman – PhD (Eng.), Senior Researcher, Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia.
Email: an116ya@mail.ru. ORCID 0000-0001-6015-670X

Elvira M. Khusnutdinova – PhD (Eng.), Associate Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russia.
Email: rr-088@mail.ru. ORCID 0000-0002-9496-5318

Gulnara R. Khamidullina – DrSc (Econ.), Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russia.
Email: gulnarah@list.ru. ORCID 0000-0001-9781-4841

Dilyara R. Fakhreeva – PhD, Associate Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russia.
Email: diliara17_91@mail.ru

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ

ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 332.1+330.4
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-190-200



ПРОСТРАНСТВЕННАЯ АВТОКОРРЕЛЯЦИЯ ЦЕН: ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К ВЫБОРУ ВЕСОВОЙ МАТРИЦЫ И УРОВНЮ АГРЕГИРОВАНИЯ ДАННЫХ

Тимирьянова В.М., Красносельская Д.Х., Прудников В.Б., Гирфутдинова А.Ф.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Аннотация. В условиях единого экономического пространства страны периодически поднимаются вопросы региональной вариации цен, выравнивания темпов роста цен и достижения пространственного равновесия. Актуальность их решения возрастает в условиях внешних шоков, определяющих изменение курсов валют, разрушение каналов поставок, изменение структуры добавленной стоимости и т.д. В целях прогнозирования регионального изменения цен с развитием информационных технологий исследователи все чаще обращают внимание на новые источники данных. Фискальные данные становятся одним из источников информации, генерирующих потоки географически структурированных данных и, следовательно, хорошо подходят для такой цели. Появление таких данных позволяет строить более сложные прогнозные модели, а рост числа учитываемых наблюдений способствует росту их статистической значимости. Целью работы является определение чувствительности оценок пространственной автокорреляции цен к выбору весовой матрицы и уровню агрегирования данных. Исследование проведено на данных сервиса онлайн-аналитики розничных продаж в РФ (<https://продажи.рф>), формирующих базу данных на основе чеков, регистрируемых оператором фискальных данных «Первый ОФД». Набор содержит ежедневные данные о регистрируемой цене лекарственных средств, применяемых при кашле и простудных заболеваниях (3 бренда), за период с 1 января 2021 года по 31 декабря 2023 года. Установлено, что уровень агрегации данных (в виде дневных, недельных или месячных значений) оказывает влияние на возможность интерпретации полученных результатов, а выбор той или иной матрицы весов – на силу выявляемой пространственной зависимости. Выделенные зависимости представляют интерес для широкого круга лиц, занимающихся вопросами пространственных измерений, а также проблемами регионального ценообразования.

Ключевые слова: цена реализации, пространственная автокорреляция, региональная дифференциация, уровень агрегации, матрица весов

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-28-00774, <https://rscf.ru/project/24-28-00774/>

© Тимирьянова В.М., Красносельская Д.Х., Прудников В.Б., Гирфутдинова А.Ф., 2025

Для цитирования

Пространственная автокорреляция цен: чувствительность к выбору весовой матрицы и уровню агрегирования данных / Тимирьянова В.М., Красносельская Д.Х., Прудников В.Б., Гирфутдинова А.Ф. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 190-200. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-190-200>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

SPATIAL PRICES' AUTOCORRELATION: SENSITIVITY TO THE WEIGHTING MATRIX CHOICE AND LEVEL OF DATA AGGREGATION

Timiryanova V.M., Krasnoselskaya D.Kh., Prudnikov V.B., Girkutdinova A.F.

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Abstract. Matters of regional price variations, equalization of price growth rates and achieving spatial equilibrium are rising periodically within the single economic space of the country. The relevance of their solution increases in the context of external shocks that determine changes in exchange rates, destruction of supply channels, changes in the structure of added value, etc. With the development of information technology, researchers are increasingly paying attention to new sources of data to predict regional price changes. Fiscal data are becoming one of the information sources generating streams of geographically structured data and, therefore, they are well suited for this purpose. The emergence of such data makes it possible to build more complex forecast models while the increase in the number of observations contributes to the improvement in their statistical significance. The purpose of the work is to determine the sensitivity of spatial autocorrelation prices' estimates to the choice of a weighting matrix and the level of data aggregation. The study was conducted on data from the online analytics service for retail sales in the Russian Federation (<https://prodazhi.rf>), which forms a database based on receipts registered by the fiscal data operator "1-OFD". The dataset contains daily recorded price data for cough and cold medicines (3 brands) and embraces the period from January 1, 2021 to December 31, 2023. It is established that the level of data aggregation (in the form of daily, weekly or monthly values) influences the ability to interpret the results obtained whereas the choice of a particular weight matrix affects the strength of the spatial dependence. The identified dependencies are of interest to a wide range of people involved in issues of spatial measurements as well as problems of regional pricing.

Keywords: sales price, spatial autocorrelation, regional differentiation, level of aggregation, weight matrix

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 24-28-00774, <https://rscf.ru/project/24-28-00774/>

For citation

Timiryanova V.M., Krasnoselskaya D.Kh., Prudnikov V.B., Girkutdinova A.F. Spatial Prices' Autocorrelation: Sensitivity to the Weighting Matrix Choice and Level of Data Aggregation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 190-200. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-190-200>

Введение

Цена – фундаментальная экономическая категория, в которой пересекаются как частные вопросы ценообразования, потребительского поведения, так и общие вопросы рыночного равновесия и устойчивости развития экономики. Широкий круг факторов влияет на ее изменение, среди которых все чаще рассматривается пространственный. Согласно первому закону географии В. Тоблера (Tobler, 1970), «...все влияет на все, но то, что ближе, влияет сильнее» [1]. Действительно, обращение товаров и услуг ограничено географическими, логистическими, административными факторами. В связи с этим для моделирования цен представляется целесообразным учитывать пространственный характер рынка.

Вопросы пространственного развития в разрезе отдельных аспектов получили широкое освещение в трудах российских исследователей [2–7]. Непосредственно оценка пространственной зависимости в исследовании цен различных товаров, а также общих индексов цен выполнялась как зарубежными [8–11], так и отечественными учеными [12–16]. В анализе цен широкое распространение получили следующие мето-

ды пространственной эконометрики: глобальный и локальный индексы Морана и Гири [8–11, 14, 16–18], модели географически взвешенной регрессии [19], пространственные модели на панельных данных [13, 15, 20]. Эти исследования показывают наличие пространственной зависимости цен, но преимущественно проводятся на данных высокого уровня агрегации как по периодам, так и группам товаров. При этом нераскрытым остается вопрос подбора весовой матрицы, учитывающей особенности процесса пространственного изменения цен. В то же время использование в анализе географически структурированных высокочастотных данных (например, с детализацией в день/неделю, в разрезе видов и брендов товаров) способствует выявлению закономерностей, которые на месячных или годовых данных выделить сложно.

Цель проведенного исследования заключалась в выявлении чувствительности оценок пространственной автокорреляции цен лекарственных средств (на примере популярных лекарств «Доктор Мом», «Коделак», «Ренгалин») к выбору весовой матрицы и уровня агрегирования данных о ценах. В отличие от ранее проведенных исследований, в данной работе используются микроданные (ежедневные данные о

регистрируемой цене лекарственных средств), что позволяет делать анализ, учитывая рыночные реакции во всем их многообразии, внося вклад в существующий эмпирический задел исследований пространственного ценообразования.

Методы исследования и данные

Идеи выравнивания и пространственного равновесия цен появились достаточно давно [21]. Однако оценка пространственной автокорреляции цен стала возможна только с развитием соответствующих инструментов пространственной эконометрики. В настоящее время наиболее часто используемым показателем, позволяющим оценивать пространственную автокорреляцию, является глобальный индекс Морана [8-11, 13, 14, 16, 18]:

$$MoranI = \frac{N}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}, \quad (1)$$

где N – число регионов; \bar{x} – среднее значение показателя; x – анализируемый показатель; w_{ij} – матрица пространственных весов для регионов i и j .

Данный индекс измеряет тесноту связи между исходным показателем и пространственно взвешенным [13], фактически устанавливая то, являются ли значения показателей соседних территорий подобными. Недостатком данного инструмента является то, что в целом выявляемое подобие может быть следствием сопоставимости рыночных процессов, приводящих к установлению одинаковой равновесной цены в регионах, а не результатом механизма пространственного выравнивания [14, 16]. Глобальный индекс Морана является одним из наиболее простых способов проверки наличия пространственных зависимостей и его расчет часто предшествует проведению пространственного эконометрического моделирования.

Важным вопросом в оценке пространственной автокорреляции является подбор матрицы весов. В идеале такая матрица должна максимально отражать реальные социально-экономические связи между территориями. Поскольку это достаточно сложная теоретическая задача, сам процесс выбора весовой матрицы остается дискуссионным [22-25]. Разные матрицы фактически отражают различные гипотезы о характере пространственного взаимодействия объектов наблюдения. При этом отмечается, что если результаты, полученные при использовании различных матриц, сопоставимы, то можно с большей уверенностью говорить о наличии пространственных эффектов в исследуемой области [23].

Процесс построения пространственной матрицы, по сути, сводится к формализации следующих процедур: определение круга «соседей» и придание каждой связи веса. Это два разных этапа, и методы, применяемые на каждом из них, можно комбинировать [23]. В текущей работе тестировалось несколько вариантов матриц.

В первую очередь была построена наиболее часто используемая и самая простая матрица соседства первого порядка, сформированная по методу «королевы» («queen») [26]. При ее построении учитывалось соседство по смежности, то есть по наличию хотя бы одной точки общей границы между территориями:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j \text{ граничит с } i, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (2)$$

Так как технически это выполняется на основе координат границ территорий, то острова или удаленные территории автоматически определяются как территории, не имеющие соседства. Поэтому на основе данных об имеющихся водных и железнодорожных путях сообщения между такими территориями нами были дополнительно введены связи между Республикой Крым и Краснодарским краем, Сахалинской областью и Приморским, Хабаровским краями, Калининградской областью и Смоленской областью, г. Санкт-Петербургом.

Далее были определены веса с учетом различных правил. Бинарная матрица соседства первого порядка (Матрица 1) предполагает, что все веса одинаковые: 1 – если регионы являются соседними, 0 – если регионы не являются соседними по отношению друг к другу. Взвешенная матрица соседства первого порядка (Матрица 2) отличается от предыдущей тем, что ее значения нормированы построчно:

$$w_{ij}^{norm} = w_{ij} / \sum_j w_{ij}. \quad (3)$$

Такая нормализация обеспечивает сопоставимость результатов оценки с другими исследованиями, позволяя удерживать значение глобального индекса Морана в диапазоне $[-1; 1]$ [27].

Далее были построены несколько матриц, в которых учитывалась смежность первого порядка, а веса определялись на основе евклидовых расстояний между центроидами территорий:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 / d_{ij}^E, & \text{если } j \text{ граничит с } i, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (4)$$

$$d_{ij}^E = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (5)$$

где x , y – координаты (широта, долгота) центроидов наблюдений.

Данная матрица оценивает расстояние по прямой и не учитывает особенности местности, наличие реальных возможностей для автомобильного, железнодорожного или водного сообщения, что часто отмечается как недостаток [28]. Матрица 4 формировалась путем нормирования построчно Матрицы 3.

Еще один подход, используемый при оценке весов (Kernel smoothing), предполагает при их расчете учитывать функцию ядра (например, квадратичную функцию Епачникова, биквадратную функцию, гауссовский случайный процесс и т.д.). Его появление

обосновывается необходимостью учета затухания тесноты связи объектов наблюдения с увеличением расстояния между ними. В данном исследовании применялась функция, описывающая гауссовский случайный процесс (Матрица 5):

$$w_{ij} = \begin{cases} (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{(d_{ij} / \max(d_{ij}))^2}{2}\right), & \text{если } j \text{ граничит с } i, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (6)$$

Матрица 6 формировалась путем нормирования построчно Матрицы 5.

Так как во многих исследованиях подчеркивается важность учета реальных расстояний, в работе также была построена матрица, учитывающая расстояние между административными центрами регионов с учетом их соседства первого порядка (Матрица 7). За основу данной матрицы была взята матрица кратчайших расстояний между административными центрами российских регионов, предложенная Абрамовым А., Глущенко К. [29], которая была дополнена сведениями о расстоянии между Республикой Крым и

Краснодарским краем с учетом построенного моста, а также учитывала изменение административных центров Республики Ингушетия, Московской и Ленинградской областей. Матрица 8 формировалась путем нормирования построчно Матрицы 7.

В работе также протестированы весовые матрицы, построенные по правилу k -ближайших соседей:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } d_{ij} < d_i(k), \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (7)$$

где $d_i(k)$ – наименьшее расстояние k -го порядка для территории i с ее соседями.

В качестве k рассматривались 3 и 5 ближайших соседа (Матрицы 9 и 10 соответственно). Метод k -ближайших соседей рассматривается как общее решение проблемы сильной вариации размеров территорий [22]. В отличие от матрицы, построенной по правилу «королевы», такая матрица не является симметричной, то есть возможны ситуации, при которых территория j является соседом для территории i , но обратное неверно (рис. 1).

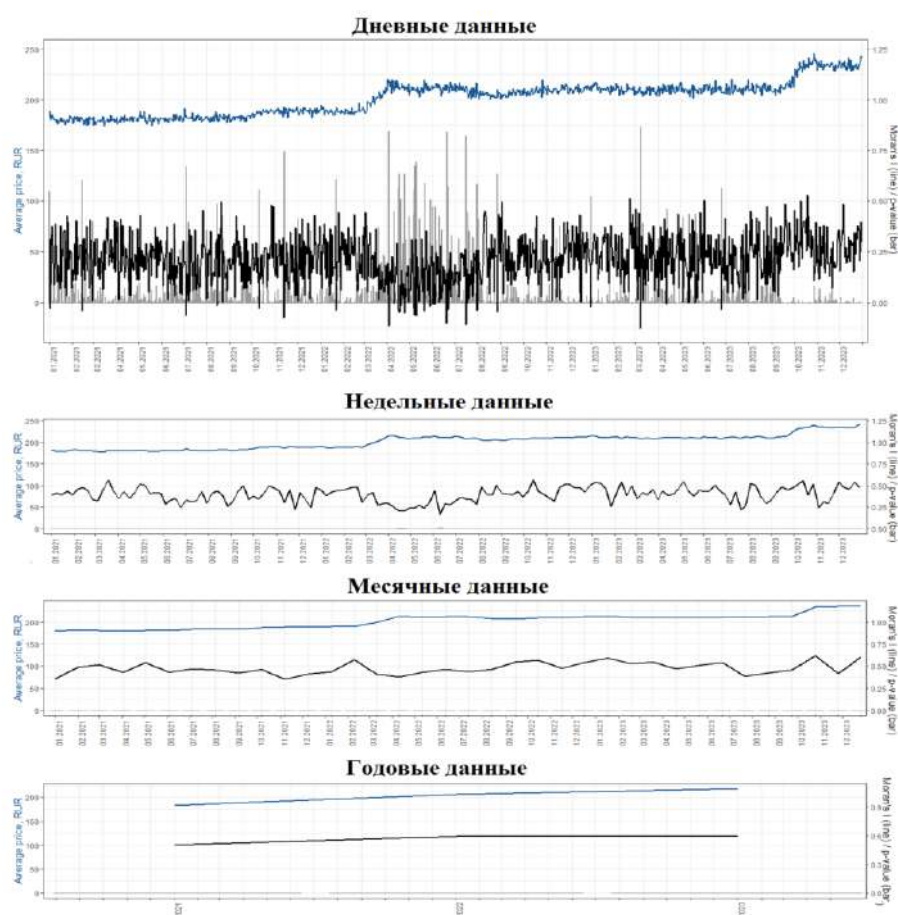


Рис. 1. Глобальный индекс Морана цен на «Доктор Мом» на данных различной агрегации: верхняя линия – среднерегionalная цена; нижняя линия – глобальный индекс Морана; столбцы – p-value

Fig. 1. Global Moran's index of prices for "Doctor Mom" based on data from various aggregations: the top line is the average regional price; bottom line is global Moran's index; columns are p-values

В условиях перехода на первичные данные о ценах становятся заметны точечные всплески цен на отдельных территориях или в определенные периоды времени, ранее не заметные на агрегированных данных. С одной стороны, они могут рассматриваться как шум или выбросы, однако это реальные данные, отражающие реальные рыночные процессы (например, дни распродаж, реакции на внешние шоки изменения курса валют, пандемии и т.д.). Их важность состоит в том, что в ряде случаев исследовательская задача может сводиться именно к предсказанию таких реакций рынка [30]. На текущий момент пространственная автокорреляция недостаточно исследована на микроданных и необходимо проведение сравнительного анализа результатов оценок, полученных на данных различной агрегации.

Для целей анализа в настоящем исследовании сравнивались оценки, полученные на данных дневных цен в разрезе регионов, которые агрегировались до недельных, месячных, годовых путем вычисления простой арифметической средней.

Источником информации для анализа являлась платформа «продажи.рф», предоставляющая сервис онлайн-аналитики розничных продаж в РФ. На платформе размещена база данных о ценах достаточно широкого круга товаров, реализуемых на территории Российской Федерации в дневной детализации за период с 1 января 2021 года. Платформа предоставляет возможность анализировать данные цен в разрезе не только групп, но и отдельных брендов товаров. Такая детализация стала возможна в результате обработки чеков, регистрируемых оператором фискальных данных «Первый ОФД», в соответствии с Законом 54-ФЗ «О применении контрольно-кассовой техники при осуществлении расчетов в Российской Федерации». Тестируемый в рамках текущего исследования набор содержит ежедневные данные о регистрируемой цене популярных лекарственных средств, применяемых при кашле и простудных заболеваниях, трех брендов за период с 1 января 2021 года по 31 декабря 2023 года. Оценка вариации цен за весь рассматриваемый период представлена в табл. 1.

Таблица 1. Описательная статистика анализируемых лекарственных средств

Table 1. Descriptive statistics of the analyzed drugs

Наименование	Цена реализации, руб.				Стандартное отклонение
	Минимальная	Максимальная	Средняя	Медиана	
«Доктор Мом»	75	380	201,7	198,4	31,0
«Коделак»	117,5	452	248,0	245,1	35,5
«Ренгалин»	158,3	450	284,3	282,9	35,5

Использование данных фискального оператора с высокой степенью детализации данных во времени, пространстве и товарной номенклатуре предоставляет

широкие возможности для анализа рынка во всех его проявлениях. В то же время необходимо отметить наличие ряда ограничений, повлиявших на проведенное исследование.

Во-первых, анализируемые данные не отражают весь объем продаж выбранных лекарственных средств, поскольку доля «Первого ОФД» в обработке фискальных данных по разным оценкам составляет около 12-13% рынка [31].

Во-вторых, имеющиеся данные о ценах отражают зарегистрированную цену фактической реализации (то есть могут включать персональные скидки, бонусы, купоны и прочие дисконты, иногда приводящие к регистрации практически нулевой цены товара). Для снижения эффекта воздействия данного ограничения авторами была проведена очистка данных от выбросов методом «3σ» (то есть были удалены значения цен, не входящих в интервал «среднее значение минус 3σ; среднее значение плюс 3σ»).

В-третьих, данные не содержат информацию о дозировке (весе/объеме) единицы продаваемого товара, что также может приводить к искажению информации: под одной товарной позицией регистрируются фактически различные товары. Частично данное ограничение также смягчается проведенной нами очисткой данных от выбросов. В этой связи следует отметить, что в исследовании рассматриваются цены условной единицы удовлетворения потребности.

Анализ пространственной зависимости цен проводился в разрезе 83 субъектов РФ. В анализ не включены Чеченская Республика и Ненецкий автономный округ в силу отсутствия данных по ним на платформе «продажи.рф». Так как продажи лекарственных средств для простуды имеют сезонный характер и в летний период могут осуществляться не каждый день, а набор данных содержит только регистрируемые цены реализации, которые не фиксируются в случае отсутствия продаж товара даже при наличии товаров в аптеках, в отдельные дни наблюдалось снижение учитываемых при расчете индекса Морана числа регионов.

Полученные результаты и их обсуждение

Пространственная автокорреляция цен оценивалась с применением 10 описанных выше весовых матриц для лекарственных средств «Ренгалин», «Доктор Мом», «Коделак» на каждый день в период с 1 января 2021 года по 31 декабря 2023 года (1096 дней). Проведенные расчеты глобального индекса Морана представлены в табл. 2. Они показывают, что наиболее высокие и самые низкие значения глобального индекса Морана были зарегистрированы при применении матрицы, учитывающей расстояние между административными центрами регионов с учетом их соседства первого порядка (Матрица 7), но преимущественно эти оценки были статистически не значимы на уровне $p < 0,05$ (например, для «Ренгалин» они были значимы только в 7% случаях, то есть для 77 дней из 1096) (см. табл. 2).

Таблица 2. Статистика оценок глобального индекса Морана за период с 1 января 2021 года по 31 декабря 2023 года

Table 2. Statistics of the estimates of the global Moran's index for the period from January 1, 2021 to December 31, 2023

Глобальный индекс Морана	Матрица									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
«Доктор Мом»										
Минимальное	-0,107	-0,128	-0,242	-0,150	-0,120	-0,133	-0,478	-0,179	-0,144	-0,096
Максимальное	0,427	0,529	0,462	0,541	0,407	0,528	0,599	0,542	0,555	0,515
Среднее	0,160	0,210	0,147	0,222	0,148	0,211	0,142	0,217	0,198	0,196
Медиана	0,160	0,211	0,151	0,224	0,147	0,211	0,139	0,221	0,201	0,194
Коэффициент вариации	59%	54%	64%	53%	60%	54%	83%	53%	57%	52%
Доля статистически значимых результатов за период	0,66	0,74	0,36	0,75	0,62	0,74	0,22	0,74	0,67	0,81
«Коделак»										
Минимальное	-0,133	-0,157	-0,307	-0,143	-0,130	-0,156	-0,548	-0,207	-0,181	-0,154
Максимальное	0,461	0,535	0,424	0,565	0,418	0,538	0,697	0,527	0,551	0,485
Среднее	0,119	0,165	0,113	0,177	0,112	0,166	0,095	0,165	0,140	0,134
Медиана	0,116	0,165	0,107	0,178	0,108	0,167	0,088	0,160	0,135	0,125
Коэффициент вариации	75%	66%	89%	64%	77%	66%	150%	70%	80%	74%
Доля статистически значимых результатов за период	0,50	0,62	0,27	0,63	0,47	0,63	0,17	0,57	0,49	0,60
«Ренгалин»										
Минимальное	-0,125	-0,202	-0,212	-0,231	-0,127	-0,206	-0,490	-0,186	-0,197	-0,133
Максимальное	0,442	0,541	0,358	0,535	0,405	0,540	0,675	0,540	0,549	0,507
Среднее	0,148	0,177	0,070	0,176	0,129	0,175	0,052	0,176	0,128	0,137
Медиана	0,148	0,176	0,071	0,173	0,131	0,173	0,053	0,177	0,128	0,138
Коэффициент вариации	67%	66%	113%	69%	70%	67%	230%	69%	84%	73%
Доля статистически значимых результатов за период	0,62	0,66	0,10	0,62	0,56	0,65	0,07	0,62	0,47	0,63

Результаты оценки глобального индекса Морана с применением Матрицы 8, в которой реализовано построчное нормирование, дало более устойчивые результаты в сравнении с Матрицей 7. Одновременно обращает на себя внимание то, что наиболее высокая доля статистически значимых оценок получена с применением другой матрицы обратных расстояний, для которой также применялось построчное нормирование. И здесь следует обратить внимание на то, что такое построчное нормирование матриц расстояний трансформирует пространство в случае неравномерного разброса точек наблюдения, что характерно для России. В ранее проведенных исследованиях отмечалось, что в ситуации, когда одни наблюдения могут не иметь близких соседей, а иметь лишь относительно удаленных соседей, а другие могут иметь много близких (и, следовательно, очень влиятельных) соседей, стандартизация строк меняет предполагаемую структуру этой взаимозависимости [24], то есть фактически сжимает расстояния для территорий с удаленными соседями. Возможно, учитывая особенности административно-территориального деления России, такое сжатие не является негативным проявлением. Для России отмечается, что «пространственные внешние эффекты могут иметь различный харак-

тер в европейской части, которая включает регионы меньших размеров, с более активными кооперационными связями, и в восточной части страны, где преобладают субъекты Федерации с обширными территориями» [32]. Поэтому уход от абсолютного расстояния в относительное может учитывать различное восприятие пространства экономической деятельности на востоке и западе страны.

Проблема пространственного анализа в странах с различными площадями административно-территориальных единиц характерна не только для России [33]. Учеными отмечается, что в небольших округах выбор матриц пространственных весов не существен, особенно при использовании локального индекса Морана I, в то время как для крупных округов различия между параметрами пространственных весов более очевидны [33]. Пытаясь решить эту проблему, исследователи сравнивали различные матрицы, в том числе изменяя радиусы отсечения и подходы к формированию матрицы [22, 34]. Например, общим решением проблемы сильной вариации размеров территорий считается метод *k*-ближайших соседей [22]. В нашем исследовании рассматривались матрицы с отсечением трех и пяти ближайших соседей. Последняя, опираясь на долю статистически зна-

чимых оценок и коэффициент вариации, показывает более стабильные результаты.

Что касается матрицы смежности, учитывающей соседство первого порядка (бинарная), то она подвергается критике чаще всего. При этом она может показывать как более сильную, так и более слабую пространственную связь в сравнении с матрицей расстояний [25, 26, 34], что также наблюдается и в текущем исследовании.

В целом предшествующие исследования показывают, что нет универсальных правил выбора матрицы, так как каждому явлению может быть свойственно определенное пространственное взаимодействие [34], которое может учитывать одна матрица и не учитывать другая. Важным является их согласованность [23]. Корреляционный анализ полученных оценок показал высокую согласованность получаемых оценок с применением различных матриц.

В целях изучения проявления пространственных связей на данных различной агрегации глобальный индекс Морана оценивался на дневных, недельных, месячных и годовых данных о ценах лекарственных препаратов «Ренгалин», «Доктор Мом», «Коделак» с применением взвешенной построчно матрицы смежности первого порядка (Матрица 2). Расчеты показали, что с увеличением агрегации доля статистически не значимых оценок снижается, а нижняя граница получаемых оценок (минимальные значения глобального индекса Морана) повышается (см. **рисунк, табл. 3**).

Такая ситуация отмечалась и ранее [16], что связано со скоростью реакции рынков на изменения. Годовые и месячные данные характеризуют общую ситуацию на рынке, в то время как на дневных ценах можно заметить разнообразие ценовых реакций и выделить скорость пространственной реакции. При этом важно учитывать особенность рассматриваемых

данных. Фактически они представляют собой регистрацию цен реализации. В условиях одного дня, особенно в несезонный период, когда продажи лекарственных средств падают и чаще организуются точечные распродажи, вариация цен может быть сильнее. В части регионов в такие периоды продаж может вообще не быть, а следовательно, в расчете глобального индекса Морана эти регионы не принимают участие. При этом технически если по соседям наблюдения данных нет, то наблюдение автоматически отбрасывается при расчете глобального индекса Морана с учетом матрицы весов, даже если данные по нему присутствуют. Фактически глобальные индексы Морана на годовых данных в расчет берут все наблюдения, в то время как дневные оценки получены только по наблюдениям, в которых регистрировалась продажа лекарства. Таким образом, уровень агрегации данных имеет существенное значение при интерпретации результатов пространственной автокорреляции цен.

Заключение

В проведенном исследовании с использованием данных с высокой частотой детализации (дневных данных) проведен анализ пространственных зависимостей ценообразования на примере цен лекарственных препаратов «Ренгалин», «Доктор Мом» и «Коделак» в 83 регионах Российской Федерации. Эксплораторный анализ данных о дневных ценах показал наличие значительного числа выбросов. Среди причин их появления могут быть ошибки при вводе информации, агрегация цен товаров одного товарного знака, но разного объема/веса и др. Для снижения эффекта данных ограничений выбросы были удалены на основе метода «3σ».

Таблица 3. Статистика оценок глобального индекса Морана за период с 1 января 2021 года по 31 декабря 2023 года для различных уровней агрегации данных

Table 3. Statistics of global Moran's index estimates for the period from January 1, 2021 to December 31, 2023 within various levels of data aggregation

Уровень агрегации	Значение Глобального индекса Морана			Коэффициент вариации	Доля периодов со статистически значимой оценкой
	Минимальное	Максимальное	Среднее		
«Доктор Мом»					
День	-0,128	0,529	0,210	53,8%	74%
Неделя	0,168	0,566	0,398	22,2%	100%
Месяц	0,351	0,616	0,475	14,9%	100%
Год	0,506	0,598	0,565	9,2%	100%
«Коделак»					
День	-0,157	0,535	0,165	66,2%	62%
Неделя	0,114	0,679	0,373	25,1%	99%
Месяц	0,341	0,650	0,479	14,2%	100%
Год	0,447	0,630	0,543	16,9%	100%
«Ренгалин»					
День	-0,202	0,541	0,177	66,5%	66%
Неделя	0,126	0,487	0,333	22,1%	100%
Месяц	0,265	0,493	0,383	15,4%	100%
Год	0,357	0,532	0,467	20,4%	100%

Авторами были рассмотрены десять различных видов пространственных весовых матриц. Результаты показали, что оценки, получаемые на основе нормированных построчно матриц, имеют более высокую статистическую значимость и меньшие значения коэффициента вариации. Более высокие оценки глобального индекса Морана получены при применении взвешенной матрицы, учитывающей расстояния между центроидами для препаратов «Коделак» и «Доктор Мом», взвешенной матрицы смежности для «Ренгалин».

Анализ данных различной агрегации показал, что глобальный индекс Морана значительно колеблется (коэффициент вариации – до 66,5% для «Ренгалин») и в целом оказывается незначимым на дневных данных (максимальная доля дней со статистически значимыми оценками – 74%), тогда как на данных с агрегацией в неделю, месяц и год все оценки индекса являются статистически значимыми, коэффициент вариации значительно снижается (до 9,2% «Доктор Мом»). Таким образом, в пределах одного дня не стоит ожидать какой-либо значимой реакции одного региона на изменение цен в соседнем регионе, а зафиксированная в рамках одного дня пространственная связь не обязательно будет отражать реальную пространственную связь рынков.

Список источников

1. Tobler W.R. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region // *Economic Geography*. 1970, vol. 46, pp. 234–240. <https://doi.org/10.2307/143141>.
2. ESG-трансформация инновационного развития экономики: региональные и отраслевые аспекты / Абзалилова Л.Р., Ахмадеев А.М., Бахитова Р.Х. [и др.]. М.: Изд-во «КноРус», 2023. 290 с.
3. Валинурова Л.С., Орешников В.В. Подход к моделированию инновационной деятельности региона // *Вестник Пермского университета. Серия: Экономика*. 2023. Т. 18. № 3. С. 275–291. <https://doi.org/10.17072/1994-9960-2023-3-275-291>.
4. Россинская Г.М., Ибрагимова З.Ф., Ишмухаметов Н.С. Продовольственная безопасность: формирование и проявление на разных уровнях экономической системы // *Экономика и управление: научно-практический журнал*. 2022. № 3(165). С. 11–17. <https://doi.org/10.34773/EU.2022.3.2>.
5. Юсупов К.Н., Гришин К.Е., Бикмаева А.Д. Стратегические ориентиры регионального развития в современных условиях: монография. Уфа: УУНиТ, 2022. 214 с.
6. Мангаева Э.И., Голденкова В.С., Слободчикова И.В. Некоторые аспекты устойчивого развития региональной экономики // *Научные труды Вольного экономического общества России*. 2022. Т. 236, № 4. С. 78–97. <https://doi.org/10.38197/2072-2060-2022-236-4-78-97>.
7. Krivoshlykov V. S., Zhahov N. V., Borodin A. L. et al. Factor analysis of the system development of the food market of fish products. *Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2019: Education Excellence and Innovation Management through Vision 2020*: 33, Education Excellence and Innovation Management through Vision 2020, Granada, 2019, pp. 6217–6223.
8. Chakrabarty M., Majumder A., Ray R. A Framework for the Simultaneous Measurement of Spatial Variation and Temporal Movement in Prices in a Heterogeneous Country: The Dynamic Household Regional Product Dummy Model // *Review of Income and Wealth*. 2018, no. 64, pp. 703–730. <https://doi.org/10.1111/roiw.12266>.
9. Ray R. Spatial Differences in Prices in India, State Rankings and Inequality // *Household Behaviour, Prices, and Welfare. Themes in Economics*. Springer, Singapore. 2019, pp. 119–178. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1930-3_6.
10. Weinand S., von Auer L. Anatomy of regional price differentials: evidence from micro-price data // *Spatial Economic Analysis*. 2020, no. 15(4), pp. 413–440. <https://doi.org/10.1080/17421772.2020.1729>.
11. Spatial quantitative analysis of garlic price data based on argis technology / Wu G., Zhang C., Liu P., Ren W., Zheng Y., Guo F., et al. // *Comput Mater Contin*. 2019, no. 58(1), pp. 183–195. <https://doi.org/10.32604/cmc.2019.03792>.
12. Цыплаков А.А. Статистический анализ динамики региональных уровней цен // *Мир экономики и управления*. 2000. Т. 1. № 1. С. 5–19.
13. Иванова В.И. Конвергенция цен на рынке зерна: исторический аспект // *Пространственная экономика*. 2015. № 3. С. 34–56.
14. Кириллов А.М. Инфляция цен на продовольственные товары в регионах России: пространственный анализ // *Пространственная экономика*. 2017. № 4. С. 41–58. <https://doi.org/10.14530/se.2017.4.041-058>.
15. Кириллов А.М. Исследование пространственной автокорреляции: случай российской региональной инфляции // *Прикладная эконометрика*. 2021. № 64. С. 5–22. <https://doi.org/10.22394/1993-7601-2021-64-5-22>.
16. Динамика пространственной корреляции цен на овощи и фрукты / Тимирьянова В.М., Лакман И.А., Красносельская Д.Х., Столь А.В. // *Пространственная экономика*. 2023. Т. 19. № 2. С. 94–125. <https://dx.doi.org/10.14530/se.2023.2.094-125>.
17. Payne M.T., Smith M.G., Landry C.J. Price Determination and Efficiency in the Market for South Platte Basin Ditch Company Shares // *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 2014, no. 50(6), pp. 1488–1500. <https://doi.org/10.1111/jawr.12215>.
18. Spatial analysis of residential fuel prices: Local variations in the price of heating oil in Northern Ireland / Walker R., McKenzie P., Liddell Ch., Morris Ch. // *Applied Geography*. 2015, no. 63, pp. 369–379. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.07.016>.
19. Bergeaud A., Raimbault J. An empirical analysis of the spatial variability of fuel prices in the United States // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020, no. 132(C), pp. 131–143.
20. Fingleton B., Fuerst F., Szumilo N. Housing affordability: Is new local supply the key? // *Environment and Planning A: Economy and Space*. 2019, no. 51(1), pp. 25–50. <https://doi.org/10.1177/0308518X18798372>.
21. Fackler P. L., Goodwin B. K. Chapter 17 Spatial price analysis. *Marketing, Distribution and Consumers*. 2001, pp. 971–1024. [https://doi.org/10.1016/s1574-0072\(01\)1002](https://doi.org/10.1016/s1574-0072(01)1002).

22. Anselin L. Under the hood: issues in the specification and interpretation of spatial regression models // *Agricultural economics*. 2002, no. 27(3), pp. 247–267.
23. Патракеева О.Ю., Кулыгин В.В. Весовые матрицы в моделях оценки пространственных эффектов транспортной инфраструктуры в российских регионах // Развитие водных транспортных магистралей в условиях глобального изменения климата на территории Российской Федерации (Евразии) («Опасные явления – IV») памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова: материалы IV Международной научной конференции (г. Ростов-на-Дону, 5–9 сентября 2022 г.). Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2022. С. 412–415.
24. Bell K.P., Bockstael N.E. Applying the Generalized-Moments Estimation Approach to Spatial Problems Involving Micro-Level Data // *Review of Economics and Statistics*. 2000, no. 82(1), pp. 72–82. <https://doi.org/10.1162/003465300558641>.
25. Демидова О.А. Пространственно-авторегрессионная модель для двух групп взаимосвязанных регионов (на примере восточной и западной части России) // *Прикладная эконометрика*. 2014. № 2 (34). С. 19–35.
26. Балаш В.А., Файзлиев А.Р. Пространственная корреляция в статистических исследованиях // *Промышленность: экономика, управление, технологии*. 2008. № 4. С. 122–125.
27. Kostov P. Model Boosting for Spatial Weighting Matrix Selection in Spatial Lag Models // *Environment and Planning B: Planning and Design*. 2010, no. 37(3), pp. 533–549. <https://doi.org/10.1068/b35137>.
28. Карачурина Л.Б., Мкртчян Н.В. Опыт расчета расстояний между разными типами населенных пунктов России (для оценки дальности миграции населения) // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. 2023. № 68 (3). С. 418–442. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.301>.
29. Абрамов А., Глущенко К. Матрица кратчайших расстояний между административными центрами российских регионов. Новосибирск: НГУ, 2000. Режим доступа: http://nsu-ef.ru/teachers/Gluschenko_KP/Research/Data/Distances.xls, свободный. Загл. с экрана (дата обращения: 20.06.2024 г.).
30. A framework for electricity price spike analysis with advanced data mining methods / Zhao J.H., Dong Zh.Y., Li X., Wong K.P. // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2007, no. 22(1), pp. 376–385.
31. Рейтинг операторов фискальных данных – 2024. Режим доступа: <https://www.klerk.ru/blogs/platformaofd/602111/> (дата обращения: 20.06.2024 г.).
32. Коломак Е.А. Пространственные экстерналии как ресурс экономического роста // *Регион: экономика и социология*. 2010. № 4. С. 73–87.
33. Impact of Polygon Geometry on the Identification of Economic Clusters / Frizado J., Smith B.W., Carroll M.C. et al. // *Letters in Spatial and Resource Sciences*. 2009, no. 2(1), pp. 31–44. <https://doi.org/10.1007/s12076-008-0020-6>.
34. Иванова В.И. Региональная конвергенция доходов населения: пространственный анализ // *Пространственная экономика*. 2014. № 4. С. 100–119. <https://doi.org/10.14530/se.2014.4.100-119>.

References

1. Tobler W.R. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography*. 1970;(46):234–240. <https://doi.org/10.2307/143141>.
2. Abzalilova L.R., Akhmadeev A.M., Bakhitova R. Kh. et al. *ESG-transformatsiya innovatsionnogo razvitiya ekonomiki: regionalnye i otraslevye aspekty* [ESG transformation of innovative economic development: regional and industry aspects]. Moscow: KnoRus publishing house, 2023, 290 p. (In Russ.)
3. Valinurova L.S., Oreshnikov V.V. An approach to modeling a region's innovation activity. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Ekonomika* [Perm University Herald. Economy], 2023;18(3):275–291. <https://doi.org/10.17072/1994-9960-2023-3-275-291>. (In Russ.)
4. Rossinskaya G.M., Ibragimova Z.F., Ishmuhametov N.S. Food security: formation and manifestation at different levels of the economic system. *Ekonomika i upravlenie: nauchno-prakticheskiy zhurnal* [Economics and management: scientific and practical journal], 2022;(3(165)):11–17. (In Russ.)
5. Yusupov K.N., Grishin K.E., Bikmaeva A.D. *Strategicheskie orientiry regionalnogo razvitiya v sovremen-nih usloviyah: monografiya* [Strategic guidelines for regional development in modern conditions: monograph]. Ufa: UUNiT, 2022, 214 p. (In Russ.)
6. Mantaeva E.I., Goldenova V.S., Slobodchikova I.V. Some aspects of sustainable development of the regional economy. *Nauchnye trudy Volnogo ekonomicheskogo obshchestva Rossii* [Scientific works of the Free Economic Society of Russia], 2022;236(4):78–97. <https://doi.org/10.38197/2072-2060-2022-236-4-78-97>. (In Russ.)
7. Krivoshlykov V.S., Zhahov N.V., Borodin A.L. et al. Factor analysis of the system development of the food market of fish products. Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2019: Education Excellence and Innovation Management through Vision 2020: 33, Education Excellence and Innovation Management through Vision 2020, Granada, 2019:6217–6223.
8. Chakrabarty M., Majumder A., Ray R. A Framework for the Simultaneous Measurement of Spatial Variation and Temporal Movement in Prices in a Heterogeneous Country: The Dynamic Household Regional Product Dummy Model. *Review of Income and Wealth*. 2018;(64):703–730. <https://doi.org/10.1111/roiw.12266>.
9. Ray R. Spatial Differences in Prices in India, State Rankings and Inequality. *Household Behaviour, Prices, and Welfare. Themes in Economics*. Springer, Singapore. 2019:119–178. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1930-3_6.
10. Weinand S., von Auer L. Anatomy of regional price differentials: evidence from micro-price data. *Spatial Economic Analysis*. 2020;(15(4)):413–440. <https://doi.org/10.1080/17421772.2020.1729>.
11. Wu G., Zhang C., Liu P., Ren W., Zheng Y., Guo F., et al. Spatial quantitative analysis of garlic price data based on arcgis technology. *Comput Mater Contin*. 2019;(58(1)):183–195. <https://doi.org/10.32604/cmc.2019.03792>.

12. Tsyplakov A.A. Statistical analysis of the dynamics of regional price levels. *Mir ekonomiki i upravleniya* [World of Economics and Management], 2000;1:5-19. (In Russ.)
13. Ivanova V.I. Convergence of prices on the grain market: historical aspect. *Prostranstvennaya ekonomika* [Spatial Economics], 2015(3):34-56. (In Russ.)
14. Kirillov A.M. Spatial analysis of food Inflation in Russian regions. *Prostranstvennaya Ekonomika* [Spatial Economics], 2017;(4):41-58. <https://doi.org/10.14530/se.2017.4.041-058>. (In Russ.)
15. Kirillov A.M. Study of spatial autocorrelation: the case of Russian regional inflation. *Prikladnaya ekonometrika* [Applied Econometrics], 2021;(64):5-22. <https://doi.org/10.22394/1993-7601-2021-64-5-22>. (In Russ.)
16. Timiryanova V.M., Lakman I.A., Krasnoselskaya D.K., Stol A.V. Dynamics of spatial dependences of prices for vegetables and fruits. *Prostranstvennaya Ekonomika* [Spatial Economics], 2023;19(2):94-125. <https://dx.doi.org/10.14530/se.2023.2.094-125>. (In Russ.)
17. Payne M.T., Smith M.G., Landry C.J. Price Determination and Efficiency in the Market for South Platte Basin Ditch Company Shares. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 2014;(50(6)):1488-1500. <https://doi.org/10.1111/jawr.12215>.
18. Walker R., McKenzie P., Liddell Ch., Morris Ch. Spatial analysis of residential fuel prices: Local variations in the price of heating oil in Northern Ireland. *Applied Geography*. 2015;(63):369-379. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.07.016>.
19. Bergeaud A., Raimbault J.. An empirical analysis of the spatial variability of fuel prices in the United State. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020;(132(C)):131-143.
20. Fingleton B., Fuerst F., Szumilo N. Housing affordability: Is new local supply the key? *Environment and Planning A: Economy and Space*. 2019;(51(1)):25-50. <https://doi.org/10.1177/0308518X18798372>.
21. Fackler P.L., Goodwin B.K. Chapter 17 Spatial price analysis. *Marketing, Distribution and Consumers*. 2001:971-1024. [https://doi.org/10.1016/s1574-0072\(01\)1002](https://doi.org/10.1016/s1574-0072(01)1002).
22. Anselin L. Under the hood: issues in the specification and interpretation of spatial regression models. *Agricultural economics*. 2002;(27(3)):247-267.
23. Patrakeeva O.Yu., Kulygin V.V. Weight matrices in models for assessing the spatial effects of transport infrastructure in Russian regions. *Razvitie vodnykh transportnykh magistralei v usloviyakh globalnogo izmeneniya klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii (Evrazii) («Opasnye yavleniya – IV») pamyati chlenakorrespondenta RAN D.G. Matishova: materialy IV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (g. Rostov-na-Donu, 5–9 sentyabrya 2022 g.)*. [Development of water transport routes in the context of global climate change on the territory of the Russian Federation (Eurasia) (“Hazardous phenomena - IV”) in memory of Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences D.G. Matishova. Proceedings of the IV International Scientific Conference (Rostov-on-Don, September 5-9, 2022)]. Rostov-on-Don: Publishing House of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2022, pp. 412-415. (In Russ.)
24. Bell K.P., Bockstael N.E. Applying the Generalized-Moments Estimation Approach to Spatial Problems Involving Micro-Level Data. *Review of Economics and Statistics*. 2000;(82(1)):72-82. <https://doi.org/10.1162/003465300558641>.
25. Demidova O.A. Spatial autoregressive model for two groups of interconnected regions (using the example of the eastern and western parts of Russia). *Prikladnaya ekonometrika* [Applied econometrics], 2014;(2(34)):19-35. (In Russ.)
26. Balash V.A., Fayzliev A.R. Spatial correlation in statistical research. *Promyshlennost: ekonomika, upravlenie, tekhnologii* [Industry: economics, management, technology], 2008(4):122-125. (In Russ.)
27. Kostov P. Model boosting for spatial weighting matrix selection in spatial lag models. *Environment and Planning B: Planning and Design*. 2010;(37(3)):533-549. <https://doi.org/10.1068/b35137>.
28. Karachurina L.B., Mkrtchyan N.V. Experience in calculating distances between different types of settlements in Russia (to estimate the distance of population migration). *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle* [Bulletin of St. Petersburg University. Geosciences], 2023;(68 (3)):418-442. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.301>. (In Russ.)
29. Abramov A., Glushchenko K. *Matritsa kratchaishih rastoyaniy mezhdru administrativnymi tsestrami rossiyskih regionov* [Matrix of shortest distances between administrative centers of Russian regions]. Novosibirsk: NSU, 2000. Available at: http://nsu-ef.ru/teachers/Glushchenko_KP/Research/Data/Distances.xls (Accessed June 20, 2024). (In Russ.)
30. Zhao J.H., Dong Zh.Y., Li X., Wong K.P. A framework for electricity price spike analysis with advanced data mining methods. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2007;(22(1)):376-385, Available at: <https://www.klerk.ru/blogs/platformaofd/602111>.
31. Rating of fiscal data operators – 2024. Available at: <https://www.klerk.ru/blogs/platformaofd/602111/> (Accessed June 20, 2024). (In Russ.)
32. Kolomak E.A. Spatial externalities as a resource of economic growth. *Region: ekonomika i sociologiya* [Region: economics and sociology], 2010;(4):73-87. (In Russ.)
33. Frizado J., Smith B.W., Carroll M.C. et al. Impact of polygon geometry on the identification of economic clusters. *Letters in Spatial and Resource Sciences*. 2009;(2(1)):31-44. <https://doi.org/10.1007/s12076-008-0020-6>.
34. Ivanova V.I. Regional convergence of income: spatial analysis. *Prostranstvennaya Ekonomika* [Spatial Economics], 2014;(4):100-119. <https://doi.org/10.14530/se.2014.4.100-119>. (In Russ.)

Поступила 30.07.2024; принята к публикации 14.10.2024; опубликована 28.03.2025
Submitted 30/07/2024; revised 14/10/2024; published 28/03/2025

Тимирьянова Венера Маратовна – доктор экономических наук, главный научный сотрудник, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия.
Email: 79174073127@mail.ru. ORCID 0000-0002-1004-0722

Красносельская Дина Хадимовна – кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия.
Email: dina-hamzina@mail.ru. ORCID 0000-0002-1668-2937

Прудников Вадим Борисович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия.
Email: prudnikov.bgu@mail.ru. ORCID 0000-0001-9892-3257

Гирфутдинова Алсу Фанилевна – студент, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия.
Email: aaagir13@mail.ru

Venera M. Timiryanova – DrSc (Eng.), Chief Researcher, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.
Email: 79174073127@mail.ru. ORCID 0000-0002-1004-0722

Dina Kh. Krasnoselskaya – PhD (Eng.), Senior Researcher, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.
Email: dina-hamzina@mail.ru. ORCID 0000-0002-1668-2937

Vadim B. Prudnikov – PhD (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.
Email: prudnikov.bgu@mail.ru. ORCID 0000-0001-9892-3257

Alsu F. Girkutdinova – student, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.
Email: aaagir13@mail.ru