

ТОМ 8, №4, 2024

eISSN 2541-9129

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Безопасность техногенных и природных систем

Техносферная
безопасность /
Technosphere Safety

Машиностроение /
Machine Building

Химические технологии,
науки о материалах,
металлургия / Chemical
Technologies, Materials
Sciences, Metallurgy



www.bps-journal.ru
DOI 10.23947/2541-9129



Безопасность техногенных и природных систем

Safety of Technogenic and Natural Systems

Рецензируемый научно-практический журнал

eISSN 2541-9129

Издается с 2017 года

Периодичность – 4 выпуска в год

DOI: 10.23947/2541-9129

Учредитель и издатель — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), г. Ростов-на-Дону

Создан в целях освещения результатов исследований и реальных достижений по актуальным вопросам машиностроения, техносферной безопасности, современной металлургии и материаловедения. В журнале освещаются проблемы развития фундаментальных исследований и инженерных разработок в ряде важнейших областей технических наук. Одним из главных направлений деятельности журнала является интеграция в международное информационное пространство.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

- 2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки)
- 2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)
- 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
- 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки)
- 2.6.17 – Металловедение (технические науки)
- 2.10.1 – Пожарная безопасность (технические науки)
- 2.10.2 – Экологическая безопасность (технические науки)
- 2.10.3 – Безопасность труда (технические науки)

<i>Регистрация:</i>	Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 66531 от 21 июля 2016 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
<i>Индексация и архивация:</i>	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive
<i>Сайт:</i>	https://bps-journal.ru
<i>Адрес редакции:</i>	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
<i>E-mail:</i>	vestnik@donstu.ru
<i>Телефон:</i>	+7 (863) 2–738–372
<i>Дата выхода №4, 2024 в свет:</i>	29.11.2024





Safety of Technogenic and Natural Systems Bezopasnost' Tekhnogennyh i Prirodnyh Sistem

Peer-Reviewed Scientific and Practical Journal

eISSN 2541-9129

Published Since 2017

Periodicity – 4 issues per year

DOI: 10.23947/2541-9129

Founder and Publisher — Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don, Russian Federation

The journal is created in order to highlight the results of research and real achievements on topical issues of Mechanical Engineering, Technosphere Safety, Modern Metallurgy and Materials Science. The journal highlights the problems of the development of fundamental research and engineering developments in a number of important areas of technical sciences. One of the main activities of the journal is integration into the international information space.

The Journal Publishes Articles in the Following Fields of Science:

Ground Transport and Technological Means and Complexes
Machines, Aggregates and Technological Processes
Metallurgical Science and Heat Treatment of Metals and Alloys
Powder Metallurgy and Composite Materials
Materials Science
Fire Safety
Environmental Safety
Occupational Safety

Registration:

Mass Media Registration Certificate ЭЛ № ФС 77 – 66531 Dated July, 21, 2016, Issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media

Indexing and Archiving:

RISC, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive

Website:

<https://bps-journal.ru>

Address

of the Editorial Office: 1, Gagarin Sq. Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation

E-mail:

vestnik@donstu.ru

Telephone:

+7 (863) 2–738–372

*Date of Publication
No.4,2024:*

29.11.2024



Редакционная коллегия

Главный редактор

Мехси Бесарион Чохоевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Заместители главного редактора

Короткий Анатолий Аркадьевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Азаров Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Российская Федерация)

Выпускающий редактор

Комахидзе Манана Гивиевна, кандидат химических наук, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Ответственные секретари

Хазанович Григорий Шнеерович, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Шевченко Надежда Анатольевна, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Абдрахманов Наиль Хадитович, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация)

Агеева Екатерина Владимировна, доктор технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск, Российская Федерация)

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (Курск, Российская Федерация)

Амосов Александр Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, Самарский государственный технический университет (Самара, Российская Федерация)

Баурова Наталья Ивановна, доктор технических наук, профессор, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (Москва, Российская Федерация)

Беспалов Вадим Игоревич, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Булыгин Юрий Игоревич, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Воронова Элеонора Юрьевна, доктор технических наук, доцент, Шахтинский автодорожный институт (филиал) ЮРГПУ (НПИ) (Шахты, Российская Федерация)

Гапонов Владимир Лаврентьевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Гурова Оксана Сергеевна, доктор технических наук, доцент, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Гутаревич Виктор Олегович, доктор технических наук, доцент, Донецкий национальный технический университет (Донецк, Донецкая Народная Республика)

Деев Владислав Борисович, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Москва, Российская Федерация)

Дорофеев Владимир Юрьевич, доктор технических наук, профессор, Южно-Российский государственный технический университет (НПИ) имени М. И. Платова (Новочеркасск, Российская Федерация)

Егоров Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор, Южно-Российский государственный технический университет (НПИ) имени М. И. Платова (Новочеркасск, Российская Федерация)

Еремеева Жанна Владимировна, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Москва, Российская Федерация)

Копченков Вячеслав Григорьевич, доктор технических наук, профессор, Северо-Кавказский федеральный университет (Ставрополь, Российская Федерация)

Лагерев Александр Валерьевич, доктор технических наук, профессор, Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация)

Лагерев Игорь Александрович, доктор технических наук, доцент, Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация)

Манжула Константин Павлович, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербургский, Российская Федерация)

Мензелинцева Надежда Васильевна, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Российская Федерация)

Минко Всеволод Афанасьевич, доктор технических наук, профессор, Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (Белгород, Российская Федерация)

Москвичев Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор, Красноярский филиал Федерального исследовательского центра «Информационных и вычислительных технологий» (Красноярск, Российская Федерация)

Носенко Алексей Станиславович, доктор технических наук, профессор, Шахтинский автодорожный институт (филиал) ЮРГПУ (НПИ) (Шахты, Российская Федерация)

Плешко Михаил Степанович, доктор технических наук, доцент, Национальный исследовательский технологический университет МИСиС (Москва, Российская Федерация)

Пустовойт Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Пушенко Сергей Леонардович, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Порошин Александр Алексеевич, доктор технических наук, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Балашиха, Российская Федерация)

Севастьянов Борис Владимирович, доктор технических наук, кандидат педагогических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (Ижевск, Российская Федерация)

Тюрин Александр Павлович, доктор технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (Ижевск, Российская Федерация)

Хазанович Григорий Шнеерович, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Хафизов Ильдар Фашилович, доктор технических наук, доцент, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация)

Хафизов Фаниль Шамильевич, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация)

Чукарин Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Editorial Board

Editor-in-Chief

Besarion Ch. Meskhi, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Deputy Chief Editors

Anatoliy A. Korotkiy, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Valery N. Azarov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russian Federation)

Executive Editor

Manana G. Komakhidze, Cand.Sci. (Chemistry), Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Executive Secretaries

Grigoriy Sh. Khazanovich, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Nadezhda A. Shevchenko, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Aleksandr A. Poroshin, Dr.Sci. (Eng.), All-Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Balashikha, Russian Federation)

Aleksandr N. Chukarin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Rostov State Transport University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Aleksandr P. Amosov, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Samara State Technical University (Samara, Russian Federation)

Aleksandr P. Tyurin, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation)

Aleksandr V. Lagerev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Ivan Petrovsky Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

Aleksey S. Nosenko, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Shakhty Road Institute (branch) SRSPU (NPI) named after. M.I. Platova (Shakhty, Russian Federation)

Boris V. Sevastyanov, Dr.Sci. (Eng.), Cand. Sci. (Pedagog.), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation)

Ekaterina V. Ageeva, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russian Federation)

Eleonora Yu. Voronova, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Shakhty Road Institute (branch) SRSPU (NPI) named after. M.I. Platov (Shakhty, Russian Federation)

Evgeniy V. Ageev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Southwest State University (Kursk, Russian Federation)

Fanil Sh. Hafizov, Dr.Sci. (Eng.) Professor, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation)

Grigoriy Sh. Khazanovich, Dr.Sci. (Eng.), professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Igor A. Lagerev, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Ivan Petrovsky Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

Ildar F. Hafizov, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation)

Konstantin P. Manzhula, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation)

Mikhail S. Pleshko, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, National University of Science and Technology (MISIS) (Moscow, Russian Federation)

Nadezhda V. Menzelintseva, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russian Federation)

Nail Kh. Abdrakhmanov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation)

Natalya I. Baurova, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (Moscow, Russian Federation)

Oksana S. Gurova, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Sergey L. Pushenko, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Sergey N. Egorov, Dr.Sci. (Eng.), South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after MI Platov (Novocherkassk, Russian Federation)

Vadim I. Bepalov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Viktor N. Pustovoit, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Viktor O. Gutarevich, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Donetsk National Technical University (Donetsk, Donetsk People's Republic)

Vladimir L. Gaponov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Vladimir V. Moskvichev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies (Krasnoyarsk, Russian Federation)

Vladimir Yu. Dorofeev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after MI Platov (Novocherkassk, Russian Federation)

Vladislav B. Deev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, National University of Science and Technology (MISIS) (Moscow, Russian Federation)

Vsevolod A. Minko, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Belgorod, Russian Federation)

Vyacheslav G. Kopchenkov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, North-Caucasus Federal University (Stavropol, Russian Federation)

Yuriy I. Bulygin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Zhanna V. Eremeeva, Dr.Sci. (Eng.), Professor, National University of Science and Technology (MISIS) (Moscow, Russian Federation)

Содержание

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Способ утилизации литий-ионных аккумуляторов с извлечением ценных компонентов 7
А.С. Мельникова, Н.В. Кострюкова
- Обоснование критериев и оценка экологической безопасности при эксплуатации объектов метрополитена 16
С.А. Жуков

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Определение оптимального объема элементов строительных и машиностроительных конструкций при неразрушающем контроле их прочности 29
Н.Л. Вернези
- Усеченная форма закона Фишера-Типпета для моделирования нагруженности машиностроительных конструкций 39
А.А. Котесов

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

- Микродуговое молибденирование стали с использованием молибдата аммония 47
М.С. Степанов, Ю.М. Домбровский
- Формирование эпюры остаточных напряжений после закалки в магнитном поле 54
В.Н. Пустовойт, Ю.В. Долгачев
- Морфология и свойства лазернооблученной композиции «хромовое покрытие – медная подложка» 62
Г.И. Бровер, Е.Е. Щербакова, Е.Б. Борисенко

Contents

TECHNOSPHERE SAFETY

- Method for Recycling Lithium-Ion Batteries with the Extraction of Valuable Components** 7
Anna S. Melnikova, Natalya V. Kostryukova
- Justification of Criteria and Assessment of Environmental Safety during the Operation of Metro Facilities** 16
Sergey A. Zhukov

MACHINE BUILDING

- Determination of the Optimal Volume of Elements of Building and Engineering Structures by Non-Destructive Testing of Their Strength** 29
Nikos L. Vernezi
- Fisher-Tippet Law Truncated Form for Loading Modeling of Machinery Structures** 39
Anatoly A. Kotesov

CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

- Microarc Molybdenum Steel Saturation Using Ammonium Molybdate** 47
Makar S. Stepanov, Yuriy M. Dombrovskii
- Formation of Residual Stress Diagram after Quenching in a Magnetic Field** 54
Viktor N. Pustovoit, Yuri V. Dolgachev
- Morphology and Properties of the Laser-Irradiated Composition “Chrome Coating – Copper Substrate”** 62
Galina I. Brover, Elena E. Shecherbakova, Elena B. Borisenko

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 504.064.45

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-7-15>

Способ утилизации литий-ионных аккумуляторов с извлечением ценных компонентов

А.С. Мельникова  , Н.В. Кострюкова

Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Российская Федерация

 annamel7@mail.ru

EDN: WMZISP

Аннотация

Введение. В связи с постоянно растущей потребностью в литий-ионных аккумуляторах (ЛИА) и увеличением количества уже используемых накопительных устройств актуальной темой на сегодняшний день является создание экологичного, безопасного и дешевого способа их утилизации. Жизненный цикл литий-ионных аккумуляторов меньше, чем оборудования, где они применяются, поэтому возрастает риск образования большого количества отходов, которые могут привести к серьезным проблемам с утилизацией и пагубному воздействию на окружающую среду. В то же время отработанные литий-ионные аккумуляторы можно использовать вторично, извлекая из них ценные компоненты для возвращения в производственный цикл. В связи с этим целью данной работы является исследование методов утилизации литий-ионных аккумуляторов и анализ предложенного авторами способа их утилизации с извлечением ценных компонентов (Li_2CO_3) при внедрении принципов экономики замкнутого цикла в производство.

Материалы и методы. Авторами использовались методы систематизации научной литературы по проблематике утилизации литий-ионных аккумуляторов. Для выбора наиболее перспективного из них была использована программа Mrg_Dipl. В ней заложены прямые методы принятия решений, метод парных сравнений и метод взвешенной суммы. Разработка технологической схемы процесса переработки ЛИА проводилась в программе «КОМПАС-3D».

Результаты исследования. В результате анализа были выделены достоинства и недостатки каждого метода утилизации литий-ионных аккумуляторов, а также выбран гидрохимический способ с использованием методики решения задач с многокритериальным выбором. Предложена технологическая схема процесса переработки литий-ионных аккумуляторов с извлечением карбоната лития, состоящая из пяти стадий: измельчение, разделение, фильтрация, осаждение и вылавливание влажного осадка Li_2CO_3 . Рассчитан материальный баланс разработанного способа утилизации.

Обсуждение и заключение. Разработанная авторами система утилизации обеспечивает безопасную переработку отработавших литий-ионных аккумуляторов при минимальном негативном воздействии на окружающую среду и максимальном выделении ценных компонентов. Результаты исследования могут быть использованы для модернизации процесса утилизации литий-ионных аккумуляторов с целью извлечения дополнительной прибыли от продажи карбоната лития.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, переработка, утилизация, экономика замкнутого цикла, гидрометаллургия

Благодарности. Авторы выражают благодарность наставнику экологического клуба «Зеленый проект» Уфимского университета науки и технологий Эльвире Валериковне Нафиковой за помощь в подготовке исследования, а также редакции журнала и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, устранение которых позволило повысить ее качество.

Для цитирования. Мельникова А.С., Кострюкова Н.В. Способ утилизации литий-ионных аккумуляторов с извлечением ценных компонентов. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;8(4):7–15. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-7-15>

Original Theoretical Research

Method for Recycling Lithium-Ion Batteries with the Extraction of Valuable Components

Anna S. Melnikova  , Natalya V. Kostryukova

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

 annamel7@mail.ru

Abstract

Introduction. Due to the increasing demand for lithium-ion batteries, it has become a pressing issue to find an environmentally friendly and safe way to dispose of old batteries. The life cycle of these batteries is shorter than that of the equipment they power, which leads to a growing amount of waste. This waste poses a serious problem for disposal and can have harmful effects on the environment. At the same time, recycling spent lithium-ion batteries offers a solution. By extracting valuable components we can return these components to the production process and create a closed-loop system. In this regard, the aim of this study is to investigate the methods of recycling lithium-ion batteries and to analyze the proposed method for their disposal, which involves extracting valuable components such as Li_2CO_3 , while introducing the principles of a closed-loop economy into the production process.

Materials and Methods. The methods of systematizing scientific literature on lithium-ion battery recycling were used. The “Mpr_Dipl” software was used to select the most promising method, which includes direct decision-making, paired comparison, and weighted sum methods. A technological process for lithium-ion batteries processing was developed using the COMPASS-3D software.

Results. As a result of the analysis, the advantages and disadvantages of each lithium-ion recycling method were highlighted. A hydrochemical method was selected using the multi-criteria decision-making method. A five-stage process for lithium ion battery processing with lithium carbonate extraction was developed, including grinding, separation, filtration, precipitation, and wet Li_2CO_3 capture. The material balance for the developed method was calculated.

Discussion and Conclusion. The developed recycling system ensures safe recycling of used lithium-ion batteries with minimal negative environmental impact and maximum recovery of valuable components. These results can be used to optimize the recycling process and maximize the extraction of valuable materials from spent lithium-ion batteries for further sale as lithium carbonate, thereby generating additional revenue.

Keywords: lithium-ion battery, recycling, disposal, circular economy, hydrometallurgy

Acknowledgements. The authors would like to thank Elvira Valerikovna Nafikova, the mentor of the "Green Project" environmental club at Ufa University of Science and Technology, for her assistance in preparing this paper. They also extend their gratitude to the Editorial team and reviewers for their attention and valuable recommendations, which made it possible to improve the quality of the paper.

For citation. Melnikova AS, Kostryukova NV. Method for Recycling Lithium-Ion Batteries with the Extraction of Valuable Components. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;8(4):7–15. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-7-15>

Введение. Ежегодно растут объемы мирового потребления энергии в результате технического прогресса, увеличения численности населения и развития экономики. Сейчас ученые проводят исследования, направленные на разработку и эффективное использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как энергии ветра, солнца, воды и приливов [1]. Однако большинство возобновляемых источников энергии нельзя использовать регулярно, поэтому необходимо иметь накопительные устройства для обеспечения постоянного поступления энергии из таких источников [2]. Именно для этого и применяют литий-ионные аккумуляторы. Ежегодно спрос на них растет и в ближайшем будущем продолжит расти, так как появляются новые материалы и совершенствуются процессы производства. О росте спроса на ЛИА свидетельствуют оценки экспертов: согласно прогнозам Fortune business insight, объем рынка литий-ионных аккумуляторов к 2028 году достигнет 193 миллиардов долларов (рис. 1).

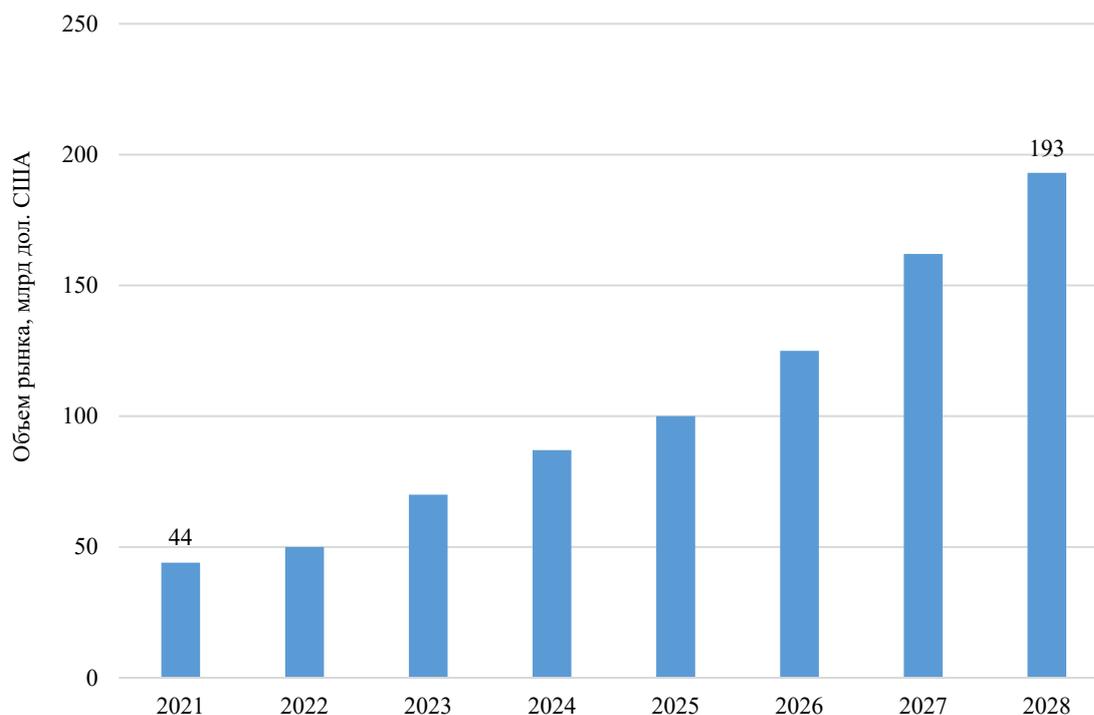


Рис. 1. Объем и прогноз динамики мирового рынка литий-ионных аккумуляторов, млрд дол. США

На сегодняшний день в России действует несколько заводов по производству ЛИА. К крупнейшим из них можно отнести:

- Aspil Energy (Пятигорск);
- «Сатурн» (Красноярск);
- «Уралэлемент» (Челябинск);
- ОАО «НИАИ «Источник» (Санкт-Петербург).

Тут важно отметить, что комплектующие детали для аккумуляторов импортируются из Китая и Боливии [3].

В связи с активным использованием ЛИА актуальность приобретает создание экологичного, безопасного и дешевого способа утилизации отработанных аккумуляторов. Авторы работы [4] считают, что около 95 % всех литий-ионных аккумуляторов, созданных в мире, остаются непереработанными в домашних хозяйствах. Это способствует образованию большого количества отходов и увеличению материальных затрат на их утилизацию [5]. Таким образом, для выхода из сложившейся ситуации необходимо внедрение практик экономики замкнутого цикла и утилизации ЛИА с извлечением из них ценных материалов [6]. Целью данной работы является исследование методов утилизации литий-ионных аккумуляторов и разработка системы утилизации ЛИА с извлечением ценных компонентов (карбоната лития), используемой в условиях экономики замкнутого цикла.

Материалы и методы. Проведён анализ методов утилизации литий-ионных аккумуляторов. Основой для него послужили отечественные и зарубежные исследования. Для выбора наиболее перспективного метода была применена методика решения задач с многокритериальным выбором с применением программного обеспечения Mrg_Dipl.

Расчет материального баланса системы производился на основании [7].

Разработка технологической схемы осуществлялась с использованием программы «КОМПАС-3D».

Результаты исследования

1. Анализ существующих методов переработки ЛИА. Методы вторичной переработки являются потенциальным решением для возобновления использования литий-ионных аккумуляторов в экономическом цикле [8]. Это важная часть экономики замкнутого цикла, поскольку она позволяет осуществлять внутреннее перемещение материалов, что снижает потребление ресурсов, связанных с производством первичного сырья [9].

Переработка ЛИА важна, поскольку она снижает воздействие на окружающую среду при добыче новых ресурсов и утилизации опасных отходов. Это также позволяет экономить ресурсы и снижать затраты на производство новых аккумуляторов.

На рис. 2 представлены три наиболее распространённых метода утилизации и переработки литий-ионных батарей/аккумуляторов: физический, пирометаллургический и гидрохимический [10].



Рис. 2. Классификация методов утилизации ЛИА

Суть физического метода заключается в разборке аккумуляторов с использованием различных способов для разделения компонентов батареи в соответствии с их физическими свойствами, такими как плотность и магнетизм. Основными способами физического метода являются гравиметрическое, флотационное и магнитное разделение. Этот метод является одним из самых популярных методов утилизации литий-ионных батарей благодаря малым затратам и экологичности. Однако следует отметить, что физические методы переработки могут быть менее эффективными при извлечении ценных компонентов, чем другие методы.

Пирометаллургия — это хорошо известный и надежный метод, который заключается в обработке материалов при высоких температурах, он позволяет извлекать из отходов аккумуляторных батарей большое количество ценных металлов, таких как кобальт и никель. Этот процесс потребляет много энергии, но, как правило, он надежен и не требует специальной настройки для обработки отходов с определенным составом, что выгодно для материалов с переменным составом, таких как электронные отходы и батарейный мусор [11].

Процесс пирометаллургии состоит из трех этапов: восстановление металла, пиролиз и сжигание газа. Пиролиз включает в себя термическую деградацию органических компонентов литий-ионных аккумуляторов. В результате пиролиза образуются токсичные дымовые газы, которые могут быть вредны для технологического процесса [12]. Основными коммерческими компаниями, занимающимися пирометаллургической переработкой литий-ионных аккумуляторов, являются Sumitomo-Sony в Японии и Umicore AG & Co. KG в Бельгии [13].

Суть гидрометаллургического процесса заключается в использовании водных растворов для извлечения необходимых металлов из катодного материала [14]. В гидрометаллургическом процессе скорость извлечения металла высока при меньших затратах энергии и отсутствии токсичных выбросов в атмосферу. Суть процесса заключается в том, что измельченный материал обрабатывают кислотой или щелочью для растворения металлов. Затем полученный раствор очищают и извлекают металлы. Из-за сложной конструкции ячеек начальной стадией является измельчение, далее следуют фазы выщелачивания и механического разделения, которые включают в себя ферромагнетизм. Отделение углерода от оксида металла также может быть осуществлено методом пенной флотации [15].

Основными преимуществами гидрометаллургии являются использование недорогих реагентов, слабое воздействие на окружающую среду, низкие эксплуатационные расходы, безопасность труда и возможность промышленного масштабирования.

2. Выбор наиболее эффективного метода утилизации ЛИА. Для выбора наиболее перспективной и логически обоснованной технологии утилизации литий-ионных аккумуляторов с помощью специальной программы разработана задача с многокритериальным выбором и найдено решение, удовлетворяющее наиболее важным требованиям эффективной утилизации.

Для решения данной задачи нужны входные данные — альтернативы (в данном случае это сами методы утилизации). Критерии оценивания проранжированы по шкале от 1 до 5 («Возможность интегрирования в процесс производства», «Трудо/энергоёмкость процесса», «Уровень восстановления материалов», «Безопасность процесса», «Образование побочных продуктов»), где 1 будет считаться как наиболее благоприятный исход, а 5 — наименее благоприятный.

Основной критерий выбора для данной задачи — «Возможность интегрирования в процесс производства», так как основополагающим решением будет являться использование ресурсов основной производственной линии. Другим критериям будут присвоены следующие весовые коэффициенты:

«Возможность интегрирования в процесс производства» — 0,4;

«Трудо/энергоёмкость процесса» — 0,15;

«Уровень восстановления материалов» — 0,2;

«Безопасность процесса» — 0,1;

«Образование побочных продуктов» — 0,15.

Данные ранжирования критериев по всем трем методам утилизации представлены в таблице 1.

Таблица 1

Данные для задачи многокритериального выбора

Критерии	Способ переработки		
	физический	пирометаллургический	гидрометаллургический
Трудо/энергоёмкость процесса	2	3	4
Возможность интегрирования в процесс производства	3	5	2
Уровень восстановления материалов	4	5	2
Безопасность процесса	4	2	3
Образование побочных продуктов	2	5	3

Для определения наиболее подходящего выбора авторы воспользовались программой Mpr_Dipl. В ней заложены методы принятия решений в многокритериальных задачах: прямые методы (отличаются характерной зависимостью полезности альтернативы от ее оценок по некоторым специальным критериям), методы парных сравнений (критерии упорядочиваются по важности, после чего считается лучшим тот, который имеет более высокую оценку по более важному критерию вне зависимости от оценок по прочим критериям.), метод взвешенной суммы (методы принятия решения в условиях определенности и в условиях неопределенности). Эту программу использовали авторы статьи [16] для выбора метода утилизации лужки подсолнечника. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

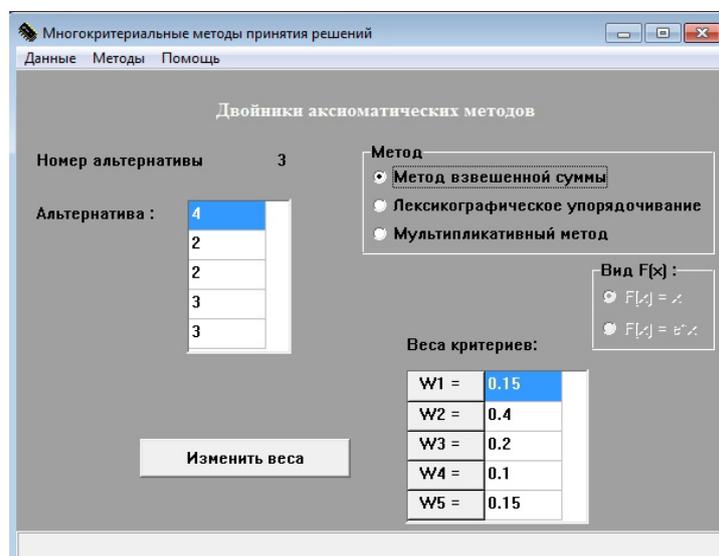


Рис. 3. Результаты расчетов программы «Mpr_Dipl»

Таким образом, наиболее подходящим методом утилизации литий-ионных аккумуляторов в рассматриваемом случае является гидрохимический метод (альтернатива № 3).

3. Технология переработки отработанных ЛИА с использованием гидрохимического способа. По результатам анализа различных технологий переработки литий-ионных аккумуляторов было принято решение использовать гидрохимический способ с извлечением карбоната лития, состоящий из нескольких этапов. Карбонат лития является ценным продуктом и широко применяется в металлургии, его используют для десульфации стали. Также он находит применение в пиротехнике, производстве стекол и пластмасс, электроизоляционного фарфора, ситаллов, а также в сельском хозяйстве в качестве удобрения и кормовой добавки. Технологическая схема процесса переработки ЛИА представлена на рис. 4.

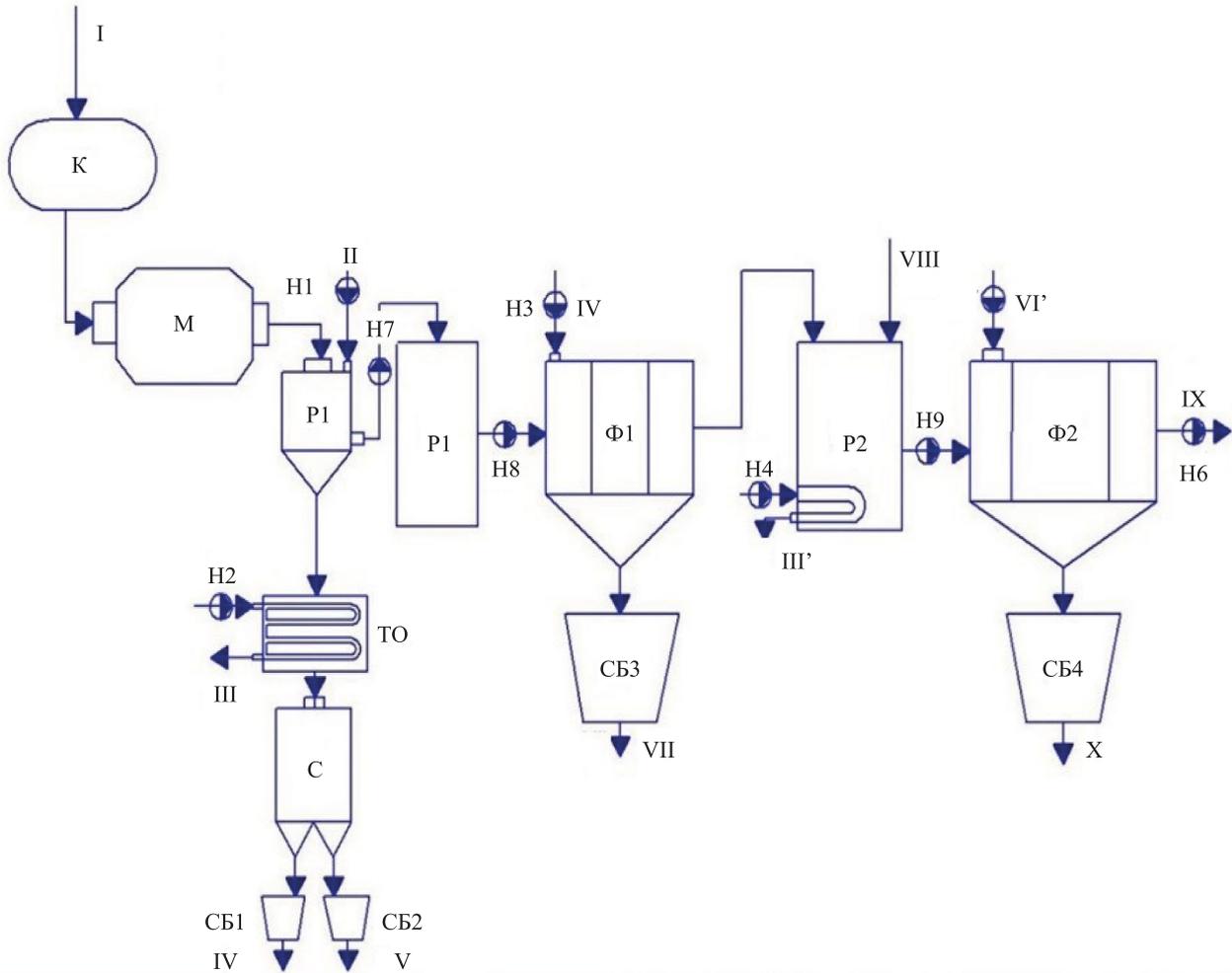


Рис. 4. Технологическая схема процесса переработки ЛИА:

- I — отработанный ЛИА; II — вода; III, III' — теплоноситель; IV — уловленный пластик; V — уловленные металлы;
 VI, VI' — вода для промывки пресс-фильтра; VII — уловленные оксиды металлов, графит;
 VIII — Na_2CO_3 ; IX — фильтр для очистки воды; X — Li_2CO_3

Согласно данным, приведенным на рис. 4, технологическая схема процесса переработки ЛИА с извлечением карбоната лития состоит из пяти стадий: измельчение, разделение, фильтрация, осаждение и вылавливание влажного осадка Li_2CO_3 . На первом этапе используемым оборудованием являются криокамера, шаровая мельница, вертикальная молотковая дробилка, теплообменник и циркуляционный насос. На втором этапе используется электростатический сепаратор для разделения металлических частиц и пластика. На третьем этапе основное оборудование — это суспензионный насос и пресс-фильтр. Они необходимы для улавливания диоксида марганца, графита, остатка металлических частиц и пластика. Для осаждения Li_2CO_3 применяется реакционная емкость.

Авторами был произведен расчет материального баланса разработанного ими способа (таблица 2). Расчет делался из прогноза, что в сутки на производстве будет перерабатываться тонна ЛИА с заданными характеристиками.

Таблица 2

Сводный материальный баланс процесса переработки

Приход			
Продукты переработки	т/сут.	т/год	% масс
1. Отходы в виде литий-ионных аккумуляторов, в т.ч.	1,000	25,000	67,980
диоксид марганца	0,150	3,750	
графит	0,060	1,500	
соединения лития	0,110	2,750	
растворители	0,180	4,500	
металлические частицы	0,350	8,750	
пластик	0,150	3,750	
2. Вода	0,403	10,075	27,396
3. Na ₂ CO ₃	0,068	1,700	4,624
Итого	1,471	36,775	100,000
Расход			
Продукты переработки	т/сут.	т/год	% масс
1. Влажный осадок Li ₂ CO ₃	0,081	2,025	5,506
2. Фильтрат	0,627	15,675	42,868
3. Осадок (на пресс-фильтре 1)	0,254	6,350	17,267
4. Металлические частицы	0,349	8,725	23,725
5. Пластик	0,149	3,725	6,962
6. Водяной пар, выделенный в процессе сушки осадка	0,011	2,750	3,672
Итого	1,471	36,775	100,000

В результате внедрения технологии переработки ЛИА из 25 тонн отходов в год будет выделено 2,025 тонны влажного осадка Li₂CO₃, 6,350 тонны осадка в виде графита, диоксида марганца, металлических частиц и пластика, на первичной стадии уловлено и разделено 8,725 тонны металлических частиц, 3,725 тонны пластика. Образовавшийся фильтрат (15,675 тонны за год) предложено отправить на водоподготовительную установку основного производства завода по производству литий-ионных аккумуляторов N, где происходит многоуровневая очистка воды.

Обсуждение и заключение. В ходе исследования были проанализированы различные способы утилизации литий-ионных аккумуляторов, выявлены их достоинства и недостатки. Произведен поиск наиболее перспективного метода утилизации ЛИА с использованием задачи с многокритериальным выбором. Представлен способ утилизации литий-ионных аккумуляторов с извлечением ценных компонентов с применением гидрохимического метода. Данная система обеспечивает безопасную переработку отработанных литий-ионных аккумуляторов с минимальным негативным влиянием на окружающую среду и максимальным выделением ценных компонентов.

Таким образом, внедрение экономики замкнутого цикла в процесс переработки ЛИА может снизить негативное воздействие на окружающую среду, а также принести финансовые выгоды при извлечении из них ценных компонентов. Вторичная переработка станет важными факторами снижения объемов образования отходов и рационального использования энергии.

Список литературы / References

1. Bin Huang, Zhefei Pan, Xiangyu Su, Liang An. Recycling of Lithium-Ion Batteries: Recent Advances and Perspectives. *Journal of Power Sources*. 2018;399:274–286. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.116>
 2. Yue Yang, Emenike G Okonkwo, Guoyong Huang, Shengming Xu, Wei Sun, Yinghe He. On the Sustainability of Lithium-Ion Battery Industry — A Review and Perspective. *Energy Storage Mater*. 2021;36:186–212. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.12.019>
 3. Аренков И.А., Иванова Д.В., Жеребчикова П.Е. Аналитический обзор рынка производителей литий-ионных аккумуляторов. *Экономика, предпринимательство и право*. 2023;13(12):5963–5980. <https://doi.org/10.18334/epp.13.12.119994>
- Arenkov IA, Ivanova DV, Zhrebchikova PE. Analytical Review of the Market for Lithium-Ion Battery Manufacturers. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*. 2023;13(12):5963–5980. (In Russ.) <https://doi.org/10.18334/epp.13.12.119994>

4. Jędrzej Piątek, Semih Afyon, Tetyana M Budnyak, Serhiy Budnyk, Sipponen MH, Adam Slabon. Sustainable Li-Ion Batteries: Chemistry and Recycling. *Advanced Energy Materials*. 2021;11(43):203456. <https://doi.org/10.1002/aenm.202003456>
5. Hayder Ali, Hassan A Khan, Pecht MG. Circular Economy of Li Batteries: Technologies and Trends. *Journal of Energy Storage*. 2021;40:102690. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102690>
6. Fisher M, Apt J, Whitacre JF. Can Flow Batteries Scale in the Behind-the-Meter Commercial and Industrial Market? A Techno-Economic Comparison of Storage Technologies in California. *Journal of Power Sources*. 2019;420:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.02.051>
7. Бесков В.С. *Общая химическая технология*. Москва: ИКЦ «Академкнига»; 2006. 452 с. URL: <https://library.tou.edu.kz/fulltext/buuk/b2381.pdf> (дата обращения: 20.06.2024).
- Beskov VS. *General Chemical Technology*. Moscow: IKTs Akademkniga; 2006. 452 p. URL: <https://library.tou.edu.kz/fulltext/buuk/b2381.pdf> (In Russ.) (accessed: 20.06.2024).
8. Velazquez-Martinez O, Valio J, Santasalo-Aarnio A, Reuter M, Serna-Guerrero R, Serna-Guerrero R. A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective. *Batteries*. 2019;5(4):68. <https://doi.org/10.3390/batteries5040068>
9. Jinqiu Xu, Thomas HR, Francis RW, Lum KR, Jingwei Wang, Bo Liang. A Review of Processes and Technologies for the Recycling of Lithium-Ion Secondary Batteries. *Journal of Power Sources*. 2008;177(2):512–527. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.11.074>
10. Мельникова А.С. Способы утилизации литий-ионных источников тока. В: Труды международной научной экологической конференции «Аграрные ландшафты, их устойчивость и особенности развития», Краснодар, 24–26 марта 2020 года. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; 2020. С. 202–204.
- Melnikova AS. Methods for Disposal of Lithium-Ion Current Stones. In: *Proceedings of the International Scientific Ecological Conference “Agricultural Landscapes, Their Sustainability and Development Features”*, Krasnodar, March 24–26, 2020. Krasnodar: Kuban State Agrarian University; 2020. P. 202–204. (In Russ.)
11. Xuehu Zhong, Wei Liu, Junwei Han, Fen Jiao, Wenqing Qin, Tong Liu, et al. Pyrolysis and Physical Separation for the Recovery of Spent LiFePO₄ Batteries. *Waste Management*. 2019;89:83–93. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.068>
12. Thompson DL, Hartley JM, Lambert SM, Shiref M, Harper GDJ, Kendrick E, et al. The Importance of Design in Lithium-Ion Battery Recycling – A Critical Review. *Green Chemistry*. 2020;22:7585–7603. <https://doi.org/10.1039/D0GC02745F>
13. Ekberg C, Petranikova M. Chapter 7 – Lithium Batteries Recycling. In book: Chagnes A, Światowska J (eds.). *Lithium Process Chemistry*. 2015. P. 233–267. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801417-2.00007-4>
14. Juntao Hu, Jialiang Zhang, Hongxu Li, Yongqiang Chen, Chengyan Wang. A Promising Approach for the Recovery of High Value-Added Metals from Spent Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources*. 2017;351:192–199. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.093>
15. Pagliaro M, Meneguzzo F. Lithium Battery Reusing and Recycling: A Circular Economy Insight. *Heliyon*. 2019;5(6):e01866. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01866>
16. Ишбулатова А.И., Кусова И.В. Гранулирование как способ утилизации лузги подсолнечника. В: Труды IV международной научно-практической конференции «Проблемы обеспечения безопасности» (БЕЗОПАСНОСТЬ-2022), посвященной 90-летию УГАТУ. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет; 2022. С. 252–255.
- Ishbulatova AI, Kusova IV. Granulation as a Way to Recycle Sunflower Husks. In: *Proceedings of the IV International Scientific and practical conference “Security Problems” (SECURITY-2022) dedicated to the 90th anniversary of USATU*. Ufa: Ufa State Aviation Technical University; 2022. P. 252–255. (In Russ.)

Об авторах:

Анна Сергеевна Мельникова, аспирант кафедры безопасности производства и промышленной экологии Уфимского университета науки и технологий (450076, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), annamel7@mail.ru

Наталья Викторовна Кострюкова, кандидат химических наук, доцент кафедры безопасности производства и промышленной экологии Уфимского университета науки и технологий (450076, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32), [SPIN-код](#), [ScopusID](#), kostrukova@list.ru

Заявленный вклад авторов:

А.С. Мельникова: анализ литературных данных, описание теоретической части исследования, расчет материального баланса, оформление научной статьи.

Н.В. Кострюкова: создание технологической схемы процесса переработки ЛИА.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Anna S. Melnikova, Postgraduate Student of the Industrial Safety and Industrial Ecology Department, Ufa University of Science and Technology (32, Zaki Validi Str., Ufa, 450076, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), annamel7@mail.ru

Natalya V. Kostryukova, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the Industrial Safety and Industrial Ecology Department, Ufa University of Science and Technology (32, Zaki Validi Str., Ufa, 450076, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ScopusID](#), kostrukova@list.ru

Claimed Contributorship:

FS Melnikova: analysis of literary data, description of the theoretical part of the research, calculation of material balance, design of a scientific article.

NV Kostryukova: creation of a technological scheme of LIB processing process.

Conflict of Interest Statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 05.09.2024

Поступила после рецензирования / Revised 24.09.2024

Принята к публикации / Accepted 08.10.2024

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 528.9

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-16-28>

Обоснование критериев и оценка экологической безопасности при эксплуатации объектов метрополитена

С.А. Жуков

АО «Мосинжпроект», г. Москва, Российская Федерация

✉ fragrante@mail.ru

EDN: WUEXOJ

Аннотация

Введение. В современном мире, где темпы урбанизации неуклонно растут, экологическая безопасность выступает в качестве критического аспекта городского планирования и управления. Эксплуатация метрополитенов, будучи важной частью городской инфраструктуры, вносит свой вклад в мобильность населения, но также может стать источником значительных экологических проблем. Данная тема исследована в трудах таких ученых, как Е.Ю. Куликова, Д.С. Конюхов, Е.В. Потапова, С.В. Баловцев, Д.Ю. Чунюк и др. Однако в их работах практически не учитывается тот факт, что одной из основных угроз экологической безопасности является ухудшение состояния тоннельной обделки под воздействием гидрогеологических процессов, которые не только усиливают риск аварийных ситуаций, но и повышают вероятность негативного воздействия на подземные воды и окружающую среду в целом. Поэтому исследование характера развития дефектов в тоннельных обделках и их динамики представляет научно-практический интерес и является целью данной работы. Для реализации поставленной цели необходимо проанализировать связи между состоянием тоннельной обделки и экологической безопасностью, основываясь на данных о дефектах конструкций тоннелей метрополитена и их влиянии на окружающую среду.

Материалы и методы. Материалами для данного исследования послужили дефектные участки обделки перегонных тоннелей некоторых линий Московского метрополитена. Проведены натурные исследования состояния обделки и геодезическая съемка туннеля, которые продемонстрировали значительные изменения показателей, по сравнению с нормативными, в результате взаимодействия техногенной среды с окружающей природой. При проведении исследования использованы также методы сейсмоакустического обследования обделки тоннеля с помощью ударного возбуждения.

Результаты исследования. Получены данные о зависимости развития дефектов от изменения уровня грунтовых вод. Дефекты тоннельной обделки способствуют утечке химически активных веществ в грунт и подземные воды, что угрожает биоразнообразию и снижает качество воды, используемой населением.

Обсуждение и заключение. Проведенные натурные изыскания показали, что дефекты тоннельной обделки, такие как трещины, выщелачивание бетона и нарушение гидроизоляции, оказывают прямое влияние на экологическую безопасность. Таким образом, поддержание целостности тоннельной обделки является ключевым элементом обеспечения экологической безопасности в городских условиях. Результаты проведенных исследований будут служить фундаментом для разработки комплексных предложений по улучшению методов мониторинга и обеспечения структурной целостности тоннельных конструкций.

Ключевые слова: метрополитен, экологическая безопасность, устойчивое развитие, городская транспортная система, экологические стандарты, инновационные технологии, риски

Благодарности. Автор благодарит руководителя научного проекта ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации», кандидата технических наук, доцента А.Т. Иванова, доктора технических наук, профессора, ведущего научного сотрудника исследовательского центра М.В. Сидорова за проведенные ими экспертные интервью, а также коллектив АО «Мосметрострой» за помощь в организации исследования.

Для цитирования. Жуков С.А. Обоснование критериев и оценка экологической безопасности при эксплуатации объектов метрополитена. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(4):16–28. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-16-28>

© Жуков С.А., 2024

Justification of Criteria and Assessment of Environmental Safety during the Operation of Metro Facilities

Sergey A. Zhukov 

Mosinzhproekt AO, Moscow, Russian Federation

✉ fragante@mail.ru

Abstract

Introduction. In today's world, with the increasing pace of urbanization, environmental safety plays a crucial role in urban planning and management. Subway operations, as an important part of urban infrastructure, contribute to population mobility, but they can also cause significant environmental problems. Such scientists as Kulikova E.Yu., Konyukhov D.S., Potapova E.V., Balovtsev S.V., Chunyuk D.Yu., etc have studied these issues. However, their research mostly ignores the fact that one of the major threats to environmental safety is the degradation of tunnel linings due to hydrogeological processes. This not only increases the risk of accidents but also increases the likelihood of negative impacts on groundwater and the environment. Therefore, the study of the nature of the development of defects in tunnel linings and their dynamics over time is of both scientific and practical interest, and is the aim of this research. To achieve this objective, it is necessary to analyze the relationship between the condition of the tunnel lining and environmental safety based on data about defects in subway tunnel structures and their impact on the environment.

Materials and Methods. For this study, we used defective sections of the subway tunnel linings from several lines of the Moscow Metro as materials. We conducted field studies of the lining's condition and geodetic surveys of the tunnels, which revealed significant changes in the indicators compared to the normative values as a result of the interaction between the human-made environment and the surrounding nature. Additionally, we employed seismoacoustic inspection methods to inspect the tunnel linings using shock excitation.

Results. Data on the dependence of defect development on changes in groundwater level has been obtained. Defects in tunnel linings contribute to the leakage of chemically active substances into soil and groundwater, which threatens biodiversity and reduces water quality used by the population.

Discussion and Conclusion. Field surveys have shown that defects in tunnel linings, such as cracks, concrete leaching, and waterproofing violations, have a direct impact on environmental safety. Therefore, maintaining the integrity of these structures is a key element in ensuring environmental safety in urban areas. The results of this research will form the basis for developing comprehensive proposals to improve monitoring techniques and ensure the structural integrity of tunnel structures.

Keywords: metro, environmental safety, sustainable development, urban transport system, environmental standards, innovative technologies

Acknowledgements. The author would like to thank the Head of the scientific project at the Scientific and Engineering Center of the Tunnel Association OOO, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor A.T. Ivanov, and Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher at the research center M.V. Sidorov, for their expert interviews together with the author of the article, as well to as the staff of Mosmetrostroy AO for their assistance in organizing the research.

For Citation. Zhukov SA. Justification of Criteria and Assessment of Environmental Safety during the Operation of Metro Facilities. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;8(4):16–28. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-16-28>

Введение. Строительство и эксплуатация метрополитена сопровождаются активизацией экологических рисков [1], связанных с проявлением геологических и геохимических опасностей, шумовых, вибрационных, биологических воздействий и др. [2]. При этом в качестве основных критериев, которые прежде всего надо учитывать при управлении экологическими рисками на объектах метрополитена являются:

- *технические*, которые направлены на минимизацию потенциальных аварий и нештатных ситуаций (минимизация попадания опасных и вредных веществ, используемых в технологическом процессе, в компоненты биосферы);
- *экономические*, призванные минимизировать инвестиционные риски при эксплуатации конкретного объекта метрополитена;
- *нормативно-правовые*, направленные на обеспечение геоэкологической, технологической и эксплуатационной безопасности на объектах метрополитена;
- *ресурсные*, регулирующие интенсивность использования природных ресурсов при эксплуатации метрополитена;
- *ландшафтно-географические*, имеющие цель сократить нежелательное экологическое воздействие на географические компоненты природно-технической геосистемы.

Контроль за вышеуказанными критериями может быть эффективным только при совокупном применении геотехнического и геоэкологического мониторинга.

Следует учитывать, что одним из самых серьезных факторов, приводящих к снижению экологической безопасности тоннелей метрополитена [3], является геологический риск [4]. Более того, именно гидрогеологическая составляющая геологического риска определяет характер снижения надежности и долговечности подземных объектов метрополитена [5]. При этом в несущих конструкциях тоннелей могут стремительно развиваться такие дефекты, как течи, свищи, эллиптичность и пр., обусловленные сопутствующими прорывами пльвунов, воды и выносом рыхлого заполнителя в заобделочное пространство тоннелей [6]. Цель данной статьи — проанализировать развитие дефектов в тоннелях метрополитена, выявить их динамику, а также определить влияние состояния тоннельной обделки на окружающую среду.

Материалы и методы. Материалом для данного исследования послужили результаты обследования отделки туннеля метро, проведенного с помощью геодезической съемки сейсмоакустическими методами с применением ударного возбуждения.

Эксплуатационный режим объектов метрополитена во много определяется характером изменения напряженно-деформированного состояния породного массива, вмещающего подземный объект, и гидрогеологической обстановкой в районе его размещения. Изменчивость гидрогеологической обстановки во времени чаще всего приводит к развитию деформационных процессов [7], в результате которых износ обделки тоннелей увеличивается, происходит снижение эксплуатационных характеристик объекта [8]. Это особенно важно учитывать при ведении работ в неустойчивых несвязных грунтах, изменение структуры которых приводит к формированию дефектов в тоннельной обделке и выносу в выработанное пространство рыхлого заполнителя и больших объемов водных масс [9].

Колесания гидростатического давления в подобных грунтах может привести к быстрому развитию аварийных ситуаций, связанных с ослаблением прочностных характеристик обделки, изменением структуры вышележащих грунтов и, соответственно, оседанием земной поверхности, влекущим деформации и разрушения подземных коммуникаций, зданий и сооружений на поверхности. Снижение герметичности тоннельной обделки свидетельствует о снижении гидростатического давления во вмещающем массиве, что может вызвать аварийную или нештатную ситуацию.

Классический мониторинг гидрологической обстановки в тоннелях метрополитена [10] является неотъемлемой частью обеспечения экологической безопасности эксплуатации его объектов [11]. На рис. 1–4 представлены фотоматериалы мониторинга перегонного туннеля одной из линий Московского метрополитена.

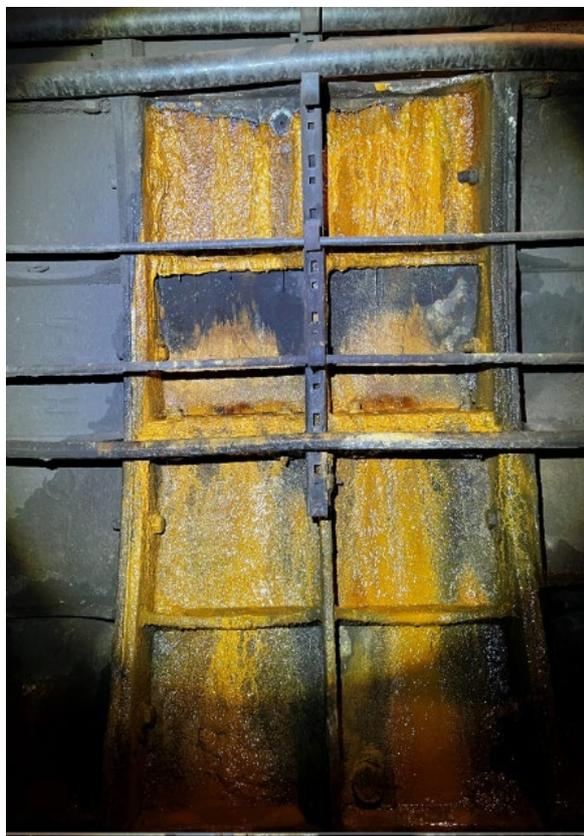


Рис. 1. Выщелачивание и мокрое пятно в межкольецевом и межблочном стыке обделки, активная течь

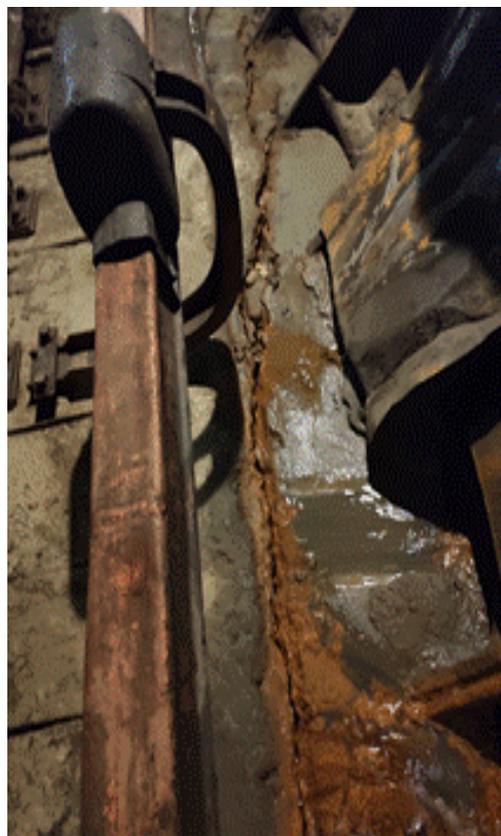


Рис. 2. Вынос грунта в область контактного рельса



Рис. 3. Неисправность болта



Рис. 4. Выщелачивание и мокрое пятно в межкольцевом и межблочном стыке обделки, активная течь. Трещина в спинке тубинга

Обследование дефектных участков, образовавшихся в результате аварии, позволило систематизировать основные нарушения на перегоне, их возможные причины и последствия развития согласно ГОСТ Р 57208–2016¹ (таблица 1).

Таблица 1

Классификация дефектов

№ п/п	Вид дефекта	Потенциальные причины	Потенциальные последствия
1	Сколы бетона в стеновых блоках и плитах перекрытия, в том числе на некоторых участках с обнажением арматуры	Механическое воздействие	Снижение несущей способности обделки
2	Выщелачивания на стеновых блоках и плитах перекрытия перегонного тоннеля. Мокрые пятна на стеновых блоках. Капез. Активные течи	Нарушение гидроизоляции	Разрушение бетона в конструкциях, коррозия металла и арматуры. Снижение эксплуатационных характеристик объектов
3	Уступы в стыках плит перекрытий перегонного тоннеля величиной до 30 мм	Ошибки при изготовлении и монтаже	Степень снижения несущей способности определяется расчетом
4	Трещины в плитах перекрытия величиной раскрытия до 0,2 мм	Усадка в результате принятого режима тепловлажностной обработки, состава бетонной смеси, свойств цемента и т.п.	На несущую способность не влияют. Могут снизить долговечность
5	Растрескивание материала заделки швов в стеновых блоках и в плитах перекрытия	При эксплуатации тоннелей и метрополитенов (в том числе вибрационные воздействия от подвижного состава)	Водообводненность конструкций и снижение эксплуатационных характеристик объекта

¹ ГОСТ Р 57208–2016. Тоннели и метрополитены. Правила обследования и устранения дефектов и повреждений при эксплуатации. Москва: Стандартформ; 2019. 16 с.

Результаты исследования. Исследование геологических разрезов аварийных участков позволило выявить изменение уровня водоносных горизонтов во времени и структурные преобразования грунтов [12]. Одновременно наблюдались изменения геометрии обделочной конструкции тоннеля.

При геодезической съемке дефектных участков перегонных тоннелей измерения фактических размеров исследуемых конструкций проводились ручным лазерным дальномером Leica DISTO D2. Точность измерений: $\pm 1,5$ мм. Были обнаружены значительные нарушения габаритов:

- на ПК0167 + 09 – ПК0167 + 23 (до 303 мм) по I пути;
- на ПК0166 + 73 – ПК0167 + 23 (до 355 мм) по II пути.

Результаты измерения фактических геометрических размеров конструкций действующих сооружений метрополитена на рассматриваемых проблемных участках приведены в сводных таблицах 2 и 3. Значения деформаций в характерных точках обделки и графическое отображение зависимости деформаций от пикетажа с указанием опасных участков по I и II путям по результатам геодезической съемки показаны на рис. 5–18. Положение характерных точек по I и II путям продемонстрированы на рис. 19.

Таблица 2

Значения деформаций обделки I пути

ПК	I путь					УГР	
	1 отм.	2 отм.	3 отм.	4 отм.	5 отм.	6 отм.	7 отм.
165+53,40	-86	47	30	76	61	-35	18
165+63,40	-38	47	31	21	-65	-24	6
165+73,30	-44	2	13	22	-4	-11	-3
165+83,30	8	12	23	0	35	1	-1
165+93,30	2	10	3	-34	32	-2	1
166+3,40	18	-1	-73	-40	-44	-9	-11
166+13,40	-19	-54	1	-41	3	-11	-15
166+23,40	18	34	32	-95	-40	-3	-1
166+33,30	86	24	-15	-50	-38	-10	-12
166+34,40	98	75	-25	-98	-103	-7	-8
166+39,40	128	69	-90	-111	-105	-6	-7
166+50,40	100	31	-86	-68	-58	-14	-15
166+56,40	70	25	-56	-53	-49	-20	-22
166+62,40	84	75	-1	-44	-42	-9	-12
166+68,40	91	45	19	-21	-69	-11	-14
166+80,40	53	89	-43	-123	-43	-11	-12
166+89,50	96	20	-67	-75	-63	-22	-23
166+97,50	150	47	-113	-109	-60	-31	-32
167+0,50	144	67	-89	-108	-77	-22	-23
167+3,50	135	51	-76	-89	-81	-28	-27
167+6,45	110	48	-76	-84	-56	-24	-25
167+7,45	99	49	-78	-78	-49	-24	-23
167+8,45	117	45	-85	-81	-51	-22	-21
167+9,45	-172	-23	-187	-182	-352	-21	-21
167+18,30	-150	-59	-303	-351	-322	-10	-9
167+23,55	-188	-137	-138	-224	-351	-4	-5

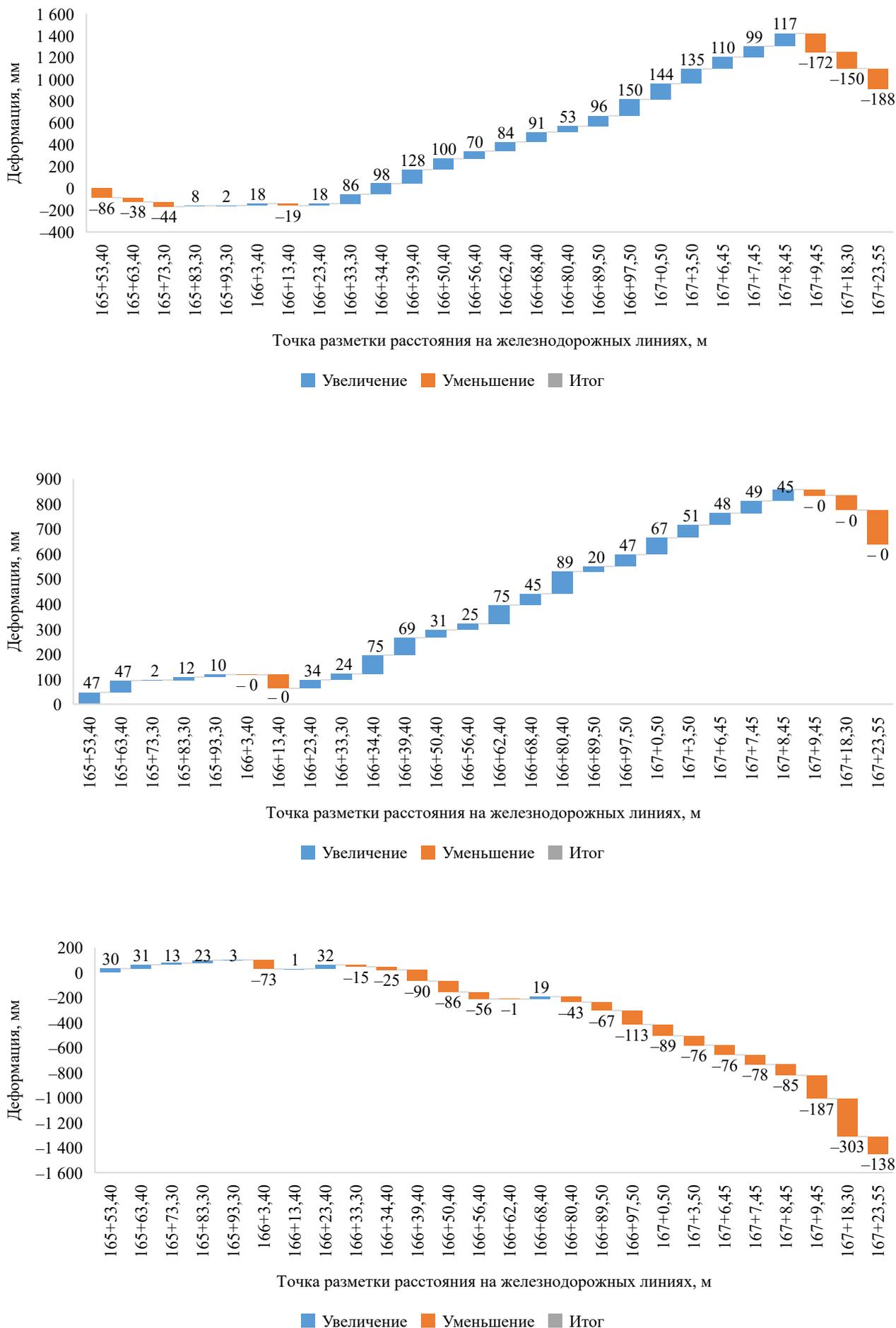


Рис. 7. График деформации обделки I пути 3 отг.

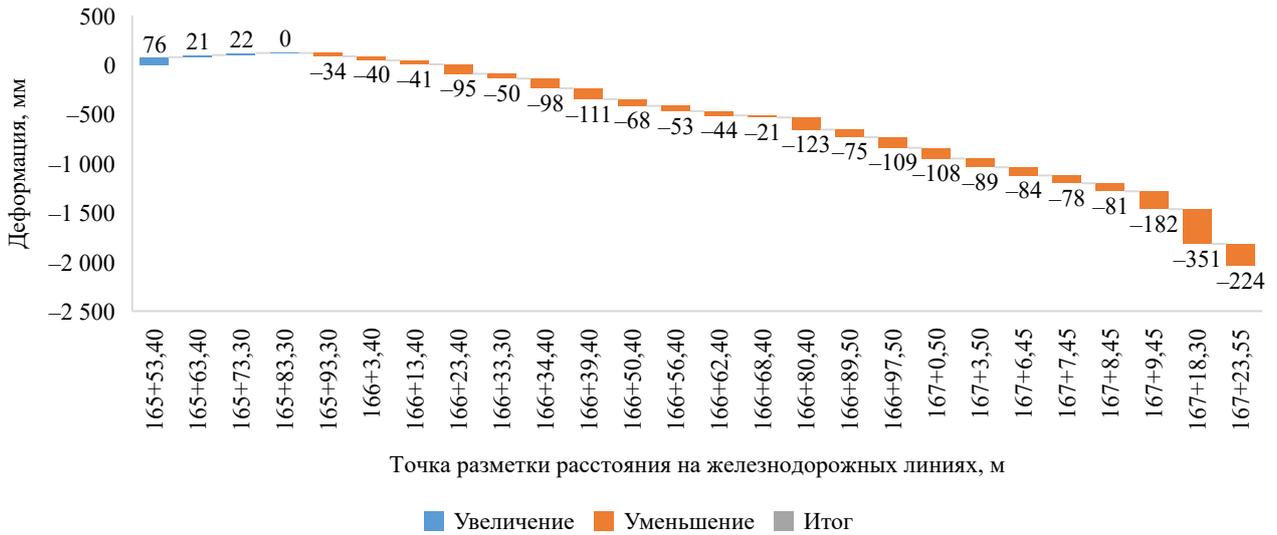


Рис. 8. График деформации обделки I пути 4 отм.

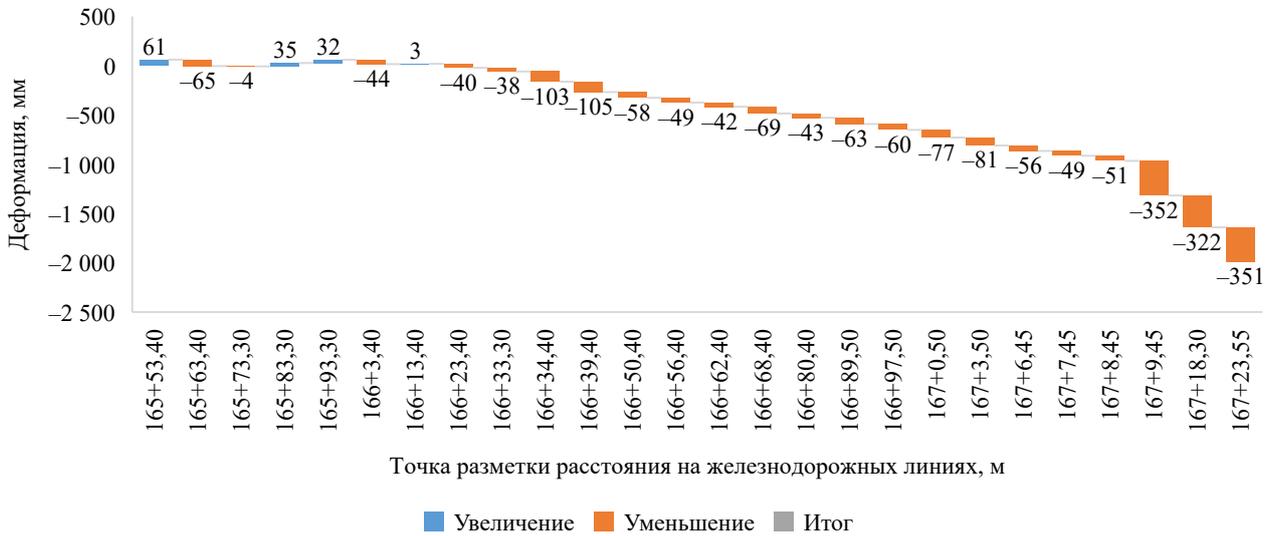


Рис. 9. График деформации обделки I пути 5 отм.

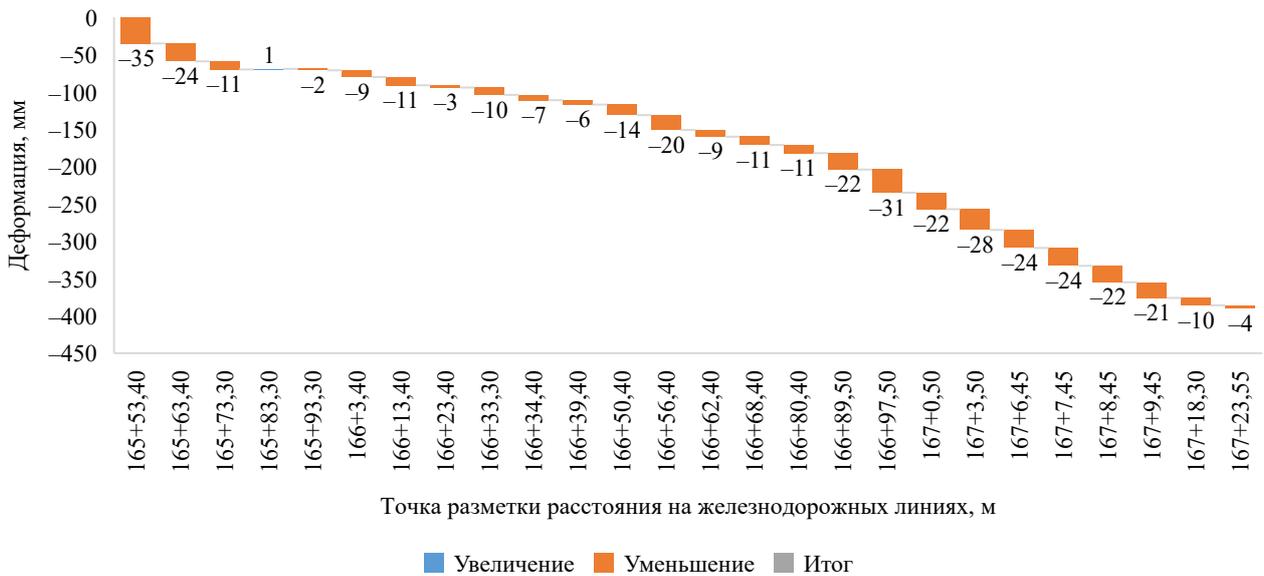


Рис. 10. График деформации обделки I пути 6 отм.

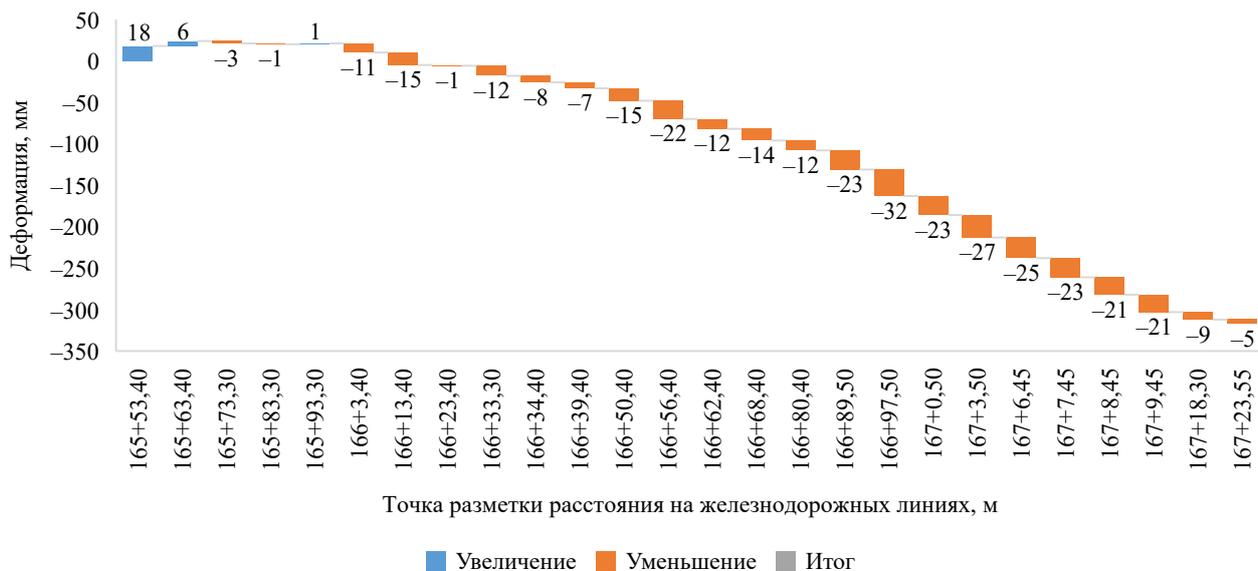


Рис. 11. График деформации обделки I пути 7 отг.

Таблица 3

Значения деформаций обделки II пути

ПК	2 путь					УГР	
	1 отг.	2 отг.	3 отг.	4 отг.	5 отг.	6 отг.	7 отг.
165+69,10	-85	-71	-55	62	95	-19	-2
165+79,10	5	-8	2	17	26	-7	-5
165+89,10	-36	0	-45	-37	-30	-8	-5
165+99,20	-37	43	-32	-40	0	-6	-5
166+19,30	-38	11	58	33	0	-9	-10
166+29,30	-40	-18	16	39	38	-10	-11
166+39,30	45	14	-85	12	39	-19	-18
166+49,30	40	14	-163	-102	0	-21	-20
166+59,30	60	55	-86	-146	-80	-18	-19
166+69,30	150	47	-77	-1	-119	-5	-4
166+79,30	167	21	-129	-154	-119	-21	-19
166+99,40	194	-66	-271	-209	-95	-111	-105
167+4,40	166	-80	-268	-185	-84	-125	-127
167+7,40	261	11	-267	-284	-197	-127	-127
167+9,40	142	-66	-270	-227	-61	-131	-127
167+10,40	210	7	-273	-291	-170	-120	-120
167+13,40	231	14	-287	-301	-209	-114	-113
167+14,50	181	-92	-301	-242	-83	-77	-75
167+16,40	255	8	-332	-210	-185	-95	-93
167+17,40	210	-3	-334	-235	-181	-87	-85
167+18,40	295	-3	-355	-251	-148	-77	-75
167+19,40	214	-78	-270	-254	-55	-71	-72
167+22,40	209	37	-275	-194	-189	-44	-47
167+23,50	169	46	-261	-235	-120	-39	-42

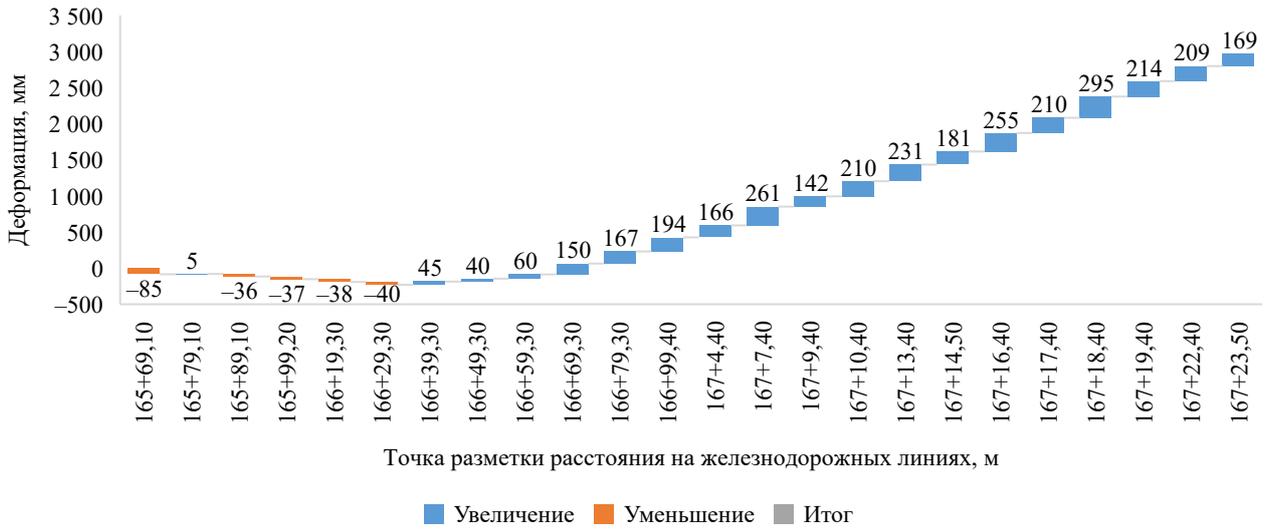


Рис. 12. График деформации обделки II пути 1 отм.

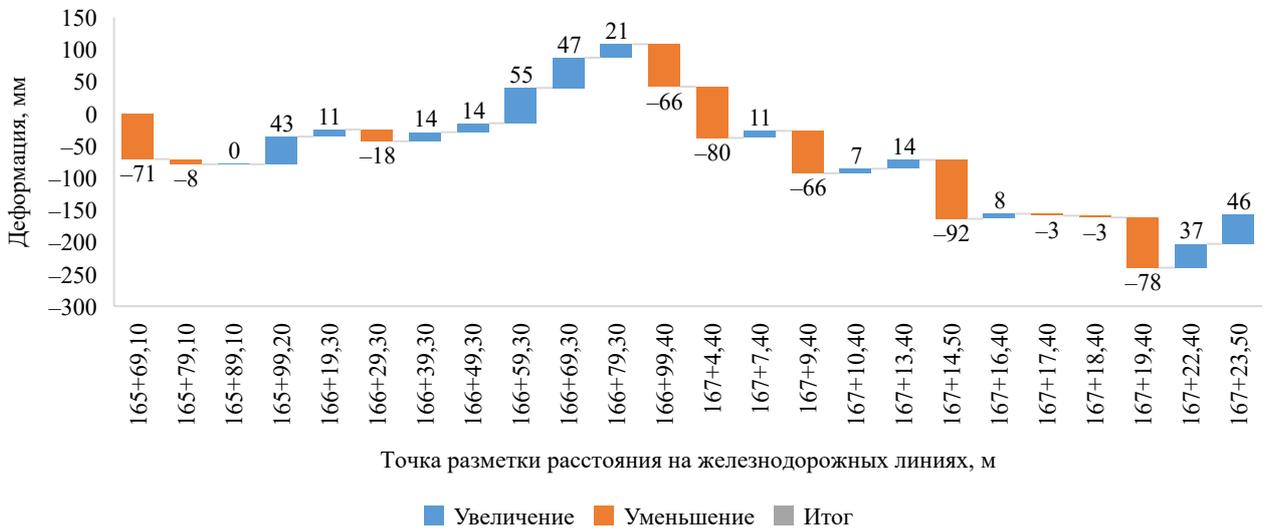


Рис. 13. График деформации обделки II пути 2 отм.

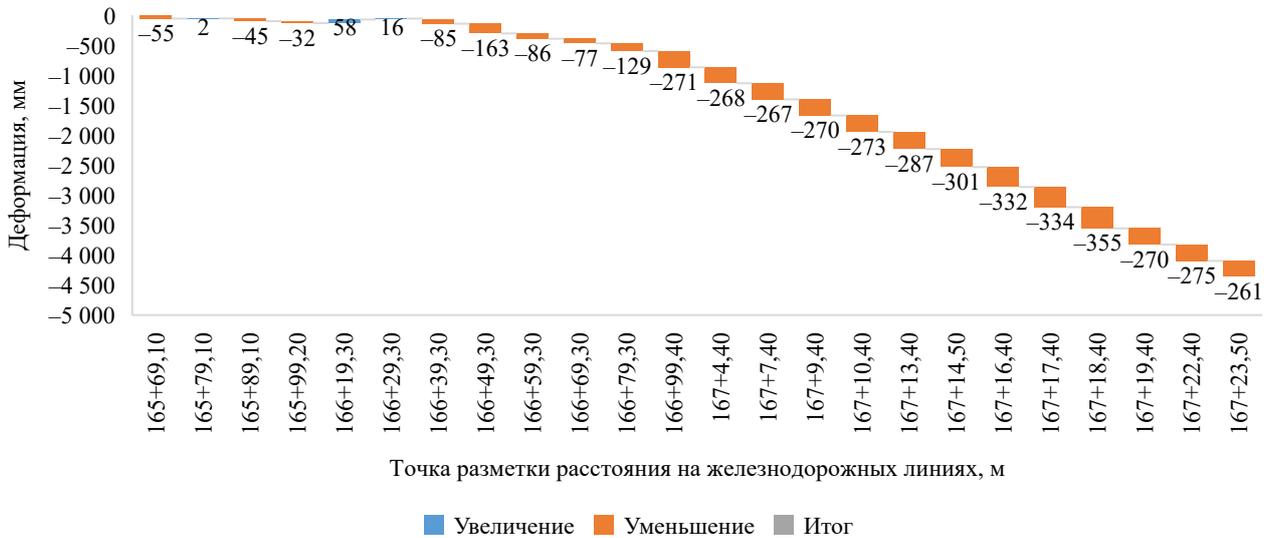


Рис. 14. График деформации обделки II пути 3 отм.

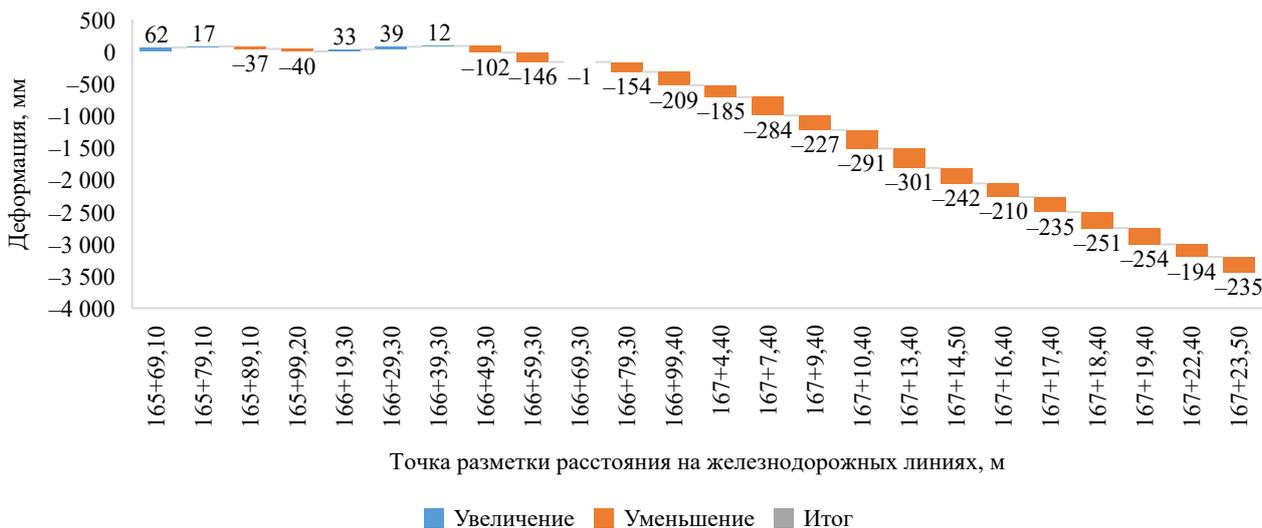


Рис. 15. График деформации обделки II пути 4 отм.



Рис. 16. График деформации обделки II пути 5 отм.



Рис. 17. График деформации обделки II пути 6 отм.

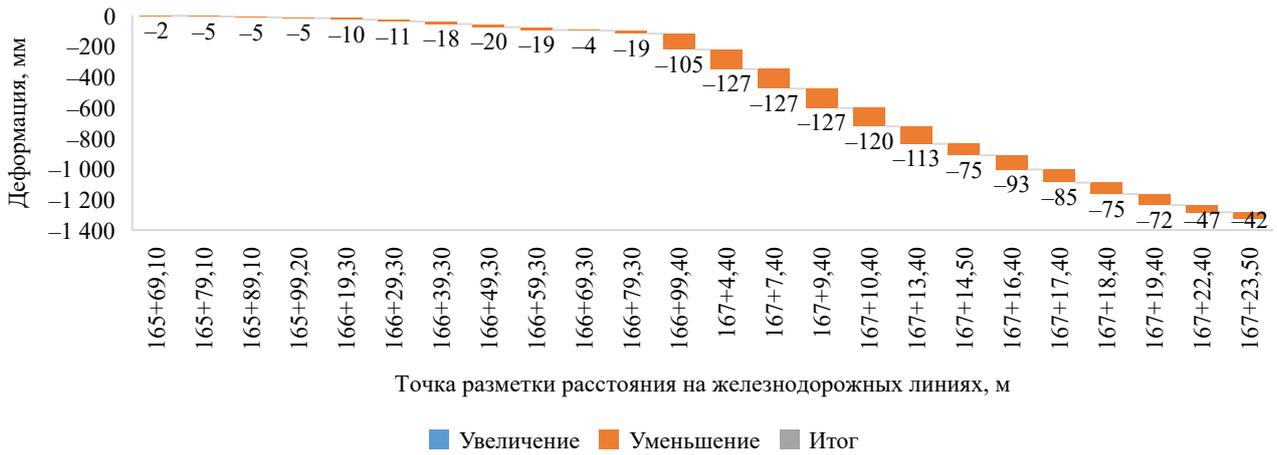


Рис. 18. График деформации обделки II пути 7 отм.

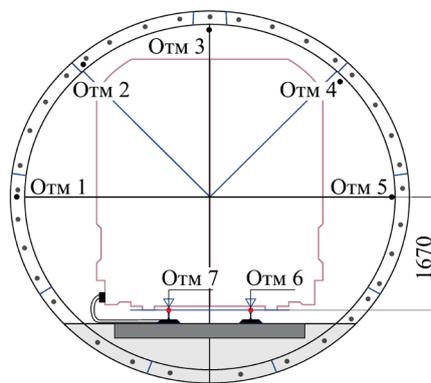


Рис. 19. Положение характерных точек

По данным таблиц 2 и 3 можно заключить, что деформационные процессы пагубно сказываются на состоянии обделки, вызывая ее разрушение [13]. Увеличение притока подземных вод к обделке тоннеля приводит к потере ее антикоррозионных и прочностных свойств, давая возможность водным массам проникать в заобделочное пространство в виде течей и выноса рыхлого заполнителя на путевые участки. Это нашло отражение в составленной автором карте дефектов (рис. 20).

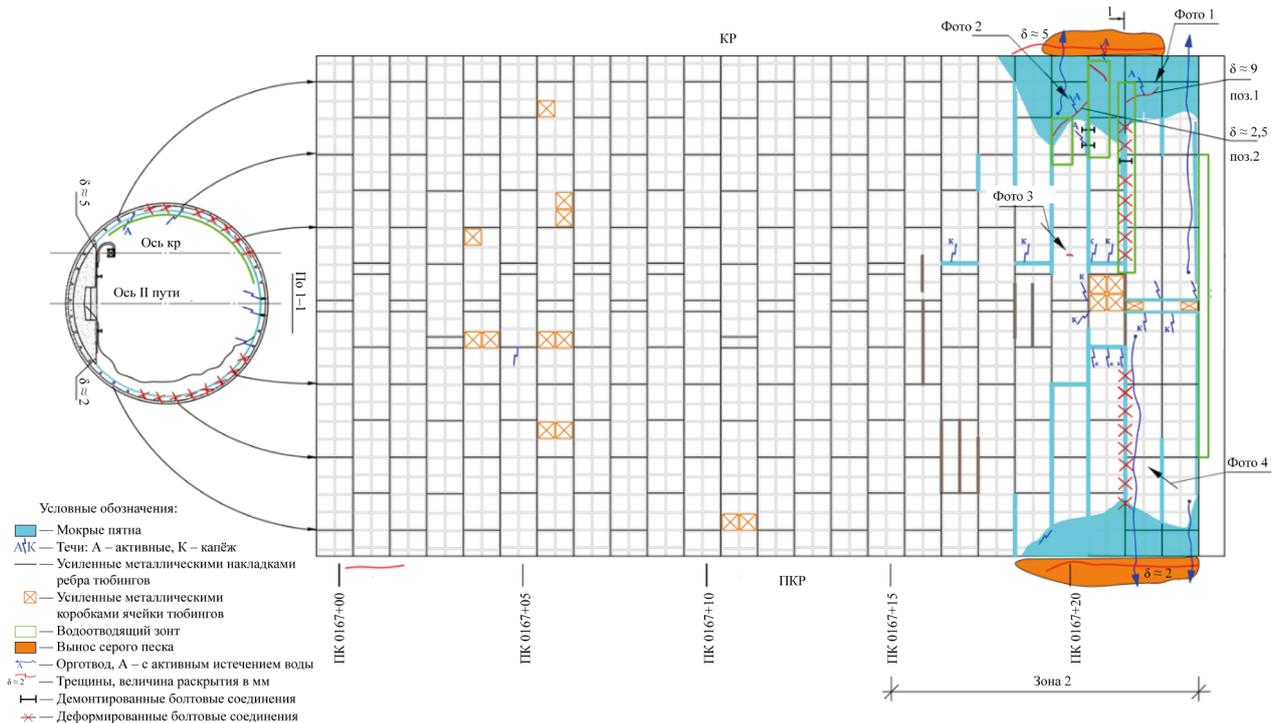


Рис. 20. Карта дефектов обделки, составленная по натурным обследованиям

При использовании метода сейсмоакустического обследования обделки тоннеля [14] с помощью ударного возбуждения (также называемого виброакустическим или сейсмоакустическим методом) выявлены зоны ослабленного контакта «обделка — грунтовый массив». На поверхности тубинга на специальной досылочной штанге монтировался электродинамический датчик и плотно прижимался к нему. На некотором расстоянии от сейсмодатчика производилось возбуждение обделки с помощью ударника, смонтированного на другой досылочной штанге. Возникала упругая волна, которая при превышении определенного порога регистрировалась. В буфере прибора хранился архив сигналов и откликов, что позволяло фиксировать полную длину отклика обделки. Результаты обследования приведены на рис. 21.



Рис. 21. Результаты сейсмоакустического контроля

Геофизическое обследование закрепного пространства тоннелей позволило выявить зоны с ослабленным контактом «обделка — грунтовый массив»:

- на ПК0166 + 10,0 в лотковой зоне с левой стороны перегонного тоннеля;
- на ПК0166 + 20,0 на уровне горизонтального диаметра с левой стороны перегонного тоннеля;
- на ПК0166 + 30,0 в лотковой зоне с левой стороны перегонного тоннеля;
- на ПК0166 + 40,0 в лотковой зоне с левой стороны перегонного тоннеля;
- от ПК0166 + 87,0 до ПК0166 + 96,0 ниже уровня горизонтального диаметра в правой части перегонного тоннеля;
- на ПК0167 + 10,0 в лотковой зоне с правой стороны перегонного тоннеля;
- от ПК0167 + 19,0 до ПК0167 + 24,1 по всему сечению тоннеля.

В заобделочном пространстве правого перегонного тоннеля на участке от ПК0166 + 00,0 до ПК0167 + 24,1 по II пути зон с ослабленным контактом «обделка — грунтовый массив» менее 3 %.

Обсуждение и заключение. Натурные изыскания показали, что дефекты тоннельной обделки (трещины, выщелачивание бетона и нарушение гидроизоляции) оказывают прямое влияние на уровень экологической безопасности. Эти дефекты способствуют утечке загрязненных вод и химически активных веществ в грунт, что угрожает биоразнообразию и качеству воды, используемой населением. Таким образом, поддержание целостности тоннельной обделки является ключевым элементом обеспечения экологической безопасности в городских условиях.

Полученные результаты данного исследования планируется использовать как основу для разработки предложений по улучшению качества мониторинга и поддержанию структурной целостности тоннельных конструкций, что позволит минимизировать экологические риски и повысить уровень безопасности городского подземного транспорта.

Список литературы / References

1. Куликова Е.Ю., Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Комплексная оценка геотехнических рисков в шахтном и подземном строительстве. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(1):7–16. <http://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16>
- Kulikova EYu, Balovtsev SV, Skopintseva OV. Complex Estimation of Geotechnical Risks in Mine and Underground Construction. *Sustainable development of mountain territories*. 2023;15(1):7–16. (In Russ.) <http://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16>
2. Куликова Е.Ю. Управление безопасностью и риском в подземном строительстве как сложный информационный процесс. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021;2(1):134–143. <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-134-143>
- Kulikova EYu. Safety and Risk Management in Underground Construction as a Complex Information. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2021;2(1):134–143. (In Russ.) <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-134-143>
3. Xi-Cun He, Ye-Shuang Xu, Shui-Long Shen, An-Nan Zhou. Geological Environment Problems during Metro Shield Tunnelling in Shenzhen, China. *Arabian Journal of Geosciences*. 2020;13(2):87. <http://doi.org/10.1007/s12517-020-5071-z>

4. Ye-Shuang Xu, Jack Shuilong Shen, An-Nan Zhou, Arul Arulrajah. Geological and Hydrogeological Environment with Geohazards during Underground Construction in Hangzhou: A Review. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018;11:544. <http://doi.org/10.1007/s12517-018-3894-7>
5. Xing-Tao Lin, Ren-Peng Chen, Huai-Na Wu, Hong-Zhan Cheng. Deformation Behaviors of Existing Tunnels Caused by Shield Tunneling Undercrossing with Oblique Angle. *Tunneling and Underground Space Technology*. 2019;89:78–90. <http://doi.org/10.1016/j.tust.2019.03.021>
6. Merisalu J, Sundell J, Rosén L. Probabilistic Cost-Benefit Analysis for Mitigating Hydrogeological Risks in Underground Construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023;131:104815. <http://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104815>
7. Конюхов Д.С. Критериальный анализ современных технологий подземного строительства. *Геотехника*. 2021;1:40–55.
Konyukhov DS. Criteria Analysis of Modern Technologies of Underground Construction. *Geotechnics*. 2021;1:40–55. (In Russ.)
8. Konyukhov DS. Analysis of Mechanized Tunneling Parameters to Determine the Overcutting Characteristics. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(1):49–56 <http://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-49-56>
9. Lebedev MO. Choosing a Calculation Method for Stress-Strain of Supports and Lining of Transport Tunnels. In: *16th World Conference of the Associated Research Centers for the Urban Underground Space (ACUUS 2018)*. Hong Kong; 2018, P. 678–687.
10. Гарбер В.А. Нештатные ситуации в подземных транспортных сооружениях. *Подземные горизонты*. 2018;16:20–25.
Garber VA. Non-Standard Situations in Underground Transport Facilities. *Underground Horizons*. 2018;16:20–25. (In Russ.)
11. Куликова Е.Ю. Методические основы повышения эколого-технологической надежности городских подземных сооружений. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020;6(1):176–185. <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-176-185>
12. Kulikova EYu, Balovtsev SV. Risk Control System for the Construction of Urban Underground Structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;962(4):042020. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/962/4/042020>
13. Потапова Е.В. Типология сооружений метрополитена для задач классификации геотехнических рисков. *Горные науки и технологии*. 2021;6(1):52–60. <http://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-52-60>
14. Potapova EV. Typology of Metro Structures for the Tasks of Geotechnical Risk Classification. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):52–60. (In Russ.) <http://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-52-60>
14. Kuepferle J, Röttger A, Theisen W, Alber M. Wear Prediction for Soft-Ground Tunneling Tools — A New Approach Regarding the Dominant Influencing Factors in the Tribological System of Tunneling Tools. In: *Proceeding of the World Tunnel Congress 2017 — Surface challenges — Underground solutions*. Bergen, Norway; 2017.

Об авторе:

Сергей Анатольевич Жуков, генеральный директор АО «Мосинжпроект» (101000, Российская Федерация, г. Москва, пер. Сверчков, 4/1), [ORCID](https://orcid.org/), fragrante@mail.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Sergey A. Zhukov, CEO, Mosinzhprouekt AO (4/1, Sverchkov Lane, Moscow, 101000, Russian Federation), [ORCID](https://orcid.org/), fragrante@mail.ru

Conflict of Interest Statement: the author does not have any conflict of interest.

The author has read and approved the final version of manuscript.

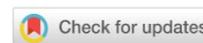
Поступила в редакцию / Received 06.08.2024

Поступила после рецензирования / Revised 21.08.2024

Принята к публикации / Accepted 08.09.2024

МАШИНОСТРОЕНИЕ

MACHINE BUILDING



УДК 620.179

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-29-38>

Определение оптимального объема элементов строительных и машиностроительных конструкций при неразрушающем контроле их прочности



EDN: YIVEUL

Н.Л. Вернези

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ vernezin@mail.ru

Аннотация

Введение. Перед ремонтом или реконструкцией стальных сооружений необходимо получить информацию о прочностных возможностях металла. Расчетные сроки службы металлоконструкций составляют десятки лет, при этом известно, что механические характеристики исходного металла за это время претерпевают изменения. Кроме того, многие объекты работают с превышением этих сроков. Как отмечают некоторые исследователи, проблема получения таких характеристик связана с тем, что, во-первых, в большинстве случаев вырезание образцов из действующих конструкций невозможно, во-вторых, применение неразрушающих методов контроля должно обеспечить достаточную точность оценки, в-третьих, неразрушающий контроль из-за конструктивных особенностей объекта физически возможен не в любой точке, в-четвертых, обследовательские работы эксплуатируемой конструкции весьма трудоёмки, дороги и требуют снижения как объёмов, так и стоимости, в-пятых, при оценке механических характеристик исследуемого металла необходимо применение подхода, позволяющего обеспечить точность результатов с минимизацией объёмов работ за счет использования ранее полученной информации о характеристиках металла подобной конструкции. Вследствие изложенного возникает задача разработки методики, объединяющей методы неразрушающего контроля и учета априорной информации.

При неразрушающем контроле конструкций на практике применяются методы качественной оценки состояния металла или сварных соединений, такие как ультразвуковой, магнитный, радиационный и др. Также имеют место количественные методы оценки механических характеристик, например, с помощью переносных твердомеров. Однако приборное обеспечение большинства методов оценки прочностных характеристик (предела текучести, временного сопротивления разрыву) громоздко или ограничено лишь лабораторными рамками.

Методы уточнения экспериментальной информации на основе использования априорных данных специалистами условно разделены на три группы:

- по приоритету весов априорной и опытной информации;
- экстраполирование прошлых данных на будущие периоды;
- основанных на байесовских процедурах.

В статье описан метод неразрушающего контроля прочности на основе индентирования, разработанный при участии автора и многократно апробированный в реальных обследованиях. Цель данной статьи заключается в обосновании предложенной автором методики минимизации объема необходимой выборки при обследовательских работах, основанной на объединении методов неразрушающего контроля и байесовского учета доопытной информации.

Материалы и методы. План исследования включал в себя анализ доопытной информации о механических характеристиках металлов и разработку алгоритма минимизации объема выборки объектов контроля. Перед измерением металл конструкций зачищался ручной шлифовальной машиной. Использовался метод неразрушающего контроля оценки механических характеристик по параметрам ударного внедрения индентора в исследуемую поверхность. Для минимизации объема работ применялся байесовский подход к сокращению дисперсии апостериорных значений за счет использования доопытной информации о механических характеристиках подобных сталей. Исследовался материал Ст3 класса прочности КП 245 с пределом текучести 245 МПа и временным сопротивлением разрыву 412 МПа, по характеристикам которого на ранее исследованной аналогичной металлоконструкции имелась доопытная информация.

Результаты исследования. Реализован метод неразрушающего контроля прочности металла трубной конструкции. При этом использована априорная информация, полученная при предыдущих обследовательских работах аналогичного материала. На основе байесовского подхода объединена опытная и доопытная информация, в частности, о значениях временного сопротивления разрыву. Предложена методика оценки минимально необходимого объема выборки обследуемых элементов конструкции при условии минимального риска от ошибки оценивания. В результате расчетов установлено, что применение такой методики возможно при объеме выборки в количестве двух-трех элементов.

Обсуждение и заключение. Предложенная методика явилась следствием анализа результатов более 20 проведенных обследовательских работ по оценке прочностных возможностей действующих металлических конструкций. На основе примененного метода неразрушающего контроля одновременно определялись предел текучести, временное сопротивление разрыву, относительное удлинение и твердость. В статье приведены данные для значений временного сопротивления разрыву. Следует отметить, что даже при условии длительности одного измерения в 20–30 сек. в некоторых случаях на обследование крупных сооружений (например, мостов) требовалось значительное время, иногда измеряемое неделями. Выполненный расчет по предложенной методике, объединившей опытную и доопытную информацию об одной из прочностных характеристик стали, временном сопротивлении разрыву, показал высокую эффективность применения такого подхода и возможность дальнейшего его применения при обследовательских работах.

Ключевые слова: механические характеристики, временное сопротивление разрыву, неразрушающий контроль, байесовское оценивание, оптимальный объем выборки при испытаниях

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность и благодарность А.Н. Бескопильному и А.А. Веремеенко, принимавшим вместе с автором участие в обследовании металлоконструкций.

Для цитирования. Вернези Н.Л. Определение оптимального объема элементов строительных и машиностроительных конструкций при неразрушающем контроле их прочности. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(4):29–38. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-29-38>

Original Empirical Research

Determination of the Optimal Volume of Elements of Building and Engineering Structures by Non-Destructive Testing of Their Strength

Nikos L. Vernezi 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ vernezin@mail.ru

Abstract

Introduction. Before repairing or reconstructing steel structures, it is necessary to obtain information about the strength capacities of the metal. The estimated service life of metal structures is tens of years, but it is known that the mechanical properties of the original metal change over time. Additionally, many facilities operate beyond these anticipated lifespans. As some researchers have noted, the challenge of obtaining such information is due to several factors. Firstly, in most cases, it is impossible to cut samples from existing structures. Secondly, the use of non-destructive testing methods needs to ensure sufficient accuracy in assessment. Thirdly, non-destructive testing may not be physically possible due to the design features of the object. Fourthly, survey work on the operating structure can be very laborious and expensive, requiring a reduction in volume and cost. Fifthly, when assessing the mechanical characteristics of the metal, it is important to apply an approach that guarantees the accuracy of results while minimizing work by utilizing previously obtained information on similar metals. Given these challenges, the development of a methodology that combines non-destructive testing with prior information is crucial.

In non-destructive testing of structures, methods for qualitative assessment of the condition of metal or welded joints are used, such as ultrasonic, magnetic, and radiation techniques. There are also quantitative methods for evaluating mechanical characteristics, such as using portable hardness testers. However, most methods for assessing strength characteristics, such as yield strength and temporary tear resistance, are cumbersome and limited to laboratory settings. The methods of clarifying experimental information using a priori data by experts are conventionally divided into three categories:

- according to the priority of the weight of a priori and experimental data;
- extrapolation of past data to future periods;
- based on Bayesian procedures.

This article describes a non-destructive strength testing method based on indentation developed with the author's participation and repeatedly tested in actual surveys. The aim of this article is to justify the author's methodology to minimize the amount of required samples during survey work by combining non-destructive testing methods and Bayesian accounting for experimental information.

Materials and Methods. The research plan involved analyzing experimental data on the mechanical properties of metals and developing an algorithm to minimize the number of samples of control objects. Before measuring, the metal of the structures was cleaned with a hand grinder. The method of non-destructive testing of the evaluation of mechanical characteristics according to the parameters of the impact insertion of the indenter into the surface under study was used. To minimize the amount of work, a Bayesian approach was used to reduce the variability of posterior values by utilizing additional experimental data on the mechanical characteristics of such steels. The material St3 of strength class KP 245 with yield strength of 245 MPa and tensile strength of 412 MPa was studied. Additional experimental data on this material's properties were available from a previously studied metal structure.

Results. The method of non-destructive testing of the strength of metal in pipe structures has been implemented. This method used prior information obtained from previous surveys of similar materials. Based on a Bayesian approach, experimental and previous information was combined, in particular, the values of time resistance to rupture. A method for estimating the minimum required sample size of the examined structural elements was proposed provided there was minimal risk from an estimation error. As a result of calculations, it was shown that the use of such a technique was possible with a sample size of 2–3 elements.

Discussion and Conclusion. The proposed methodology was developed based on an analysis of more than 20 surveys conducted to assess the strength of the existing metal structures. Using the non-destructive testing method, we were able to simultaneously determine the yield strength, tensile strength, elongation, and hardness. The article presents data on the values of tensile strength. It should be noted that although the duration of each measurement was 20–30 seconds, in some cases it took longer to inspect large structures, such as bridges, which could take weeks. The calculation performed using the proposed method, which combined experimental and pre-experimental information about one of the strength characteristics of steel, temporary tear resistance, showed the high efficiency and potential for further application in future surveys.

Keywords: mechanical characteristics, tensile strength, non-destructive testing, Bayesian estimation, optimal sample size during testing

Acknowledgements. The author would like to express his deepest appreciation and gratitude to A.N. Beskopylny and A.A. Veremeenko for their participation in the inspection of metal structures with the author.

For citation. Vernezi NL. Determination of the Optimal Volume of Elements of Building and Engineering Structures by Non-Destructive Testing of Their Strength. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;8(4):29–38. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-29-38>

Введение. Проблема, рассматриваемая в данной статье, связана с тем, что в практике обследовательских работ, предшествующих ремонту или реконструкции стальных сооружений, есть ряд особенностей. К ним относят невозможность вырезания из действующих конструкций образцов для стандартных испытаний, необходимость обеспечения достаточной точности получаемых результатов при проведении неразрушающего контроля, невозможность проведения неразрушающего контроля во всех исследуемых местах конструкции из-за конструктивных особенностей объекта, высокая стоимость и большая трудоемкость обследования крупных сооружений (например, стальных мостов). По этой причине возникает необходимость в разработке такого подхода к исследованию конструкций, который позволил бы обеспечить необходимую точность результатов с минимизацией объемов работ за счет использования ранее полученной информации о характеристиках металла подобной конструкции.

При разработке такого подхода следует ответить на три важных вопроса:

- как изменяются свойства металла в процессе эксплуатации конструкции;
- каким способом следует получать информацию;
- как ее дополнить известной допытной информацией и минимизировать объем обследовательских работ.

Ответы на эти вопросы чрезвычайно важны, поскольку известно, что под воздействием различных факторов (температурного или силового в виде циклических нагружений) у металла возможны изменения прочностных характеристик.

Первый вопрос (как изменяются свойства металла в процессе эксплуатации конструкции) в литературе имеет различное толкование. В.И. Брюшко в работе [1] указывает на увеличение прочностных характеристик и уменьшение пластичности сталей 20, 15Х5М, 19Г. В работе [2] приведены сведения об увеличении прочностных характеристик в течение первых 20 лет эксплуатации трубы из стали 17Г, в последующие 10 лет неуклонном снижении прочности и пластичности. В работе И.В. Горынина и Б.Т. Тимофеева [3] отмечается стабильность механических характеристик металла у конструкций атомной энергетики и трубной стали 17Г1С за 25–40 лет эксплуатации. Автор работы [4] В.В. Киселев обращает внимание на то, что характер изменения прочностных и пластических характеристик сталей главным образом зависит от температурного влияния и параметров нагружения, в первую очередь, циклического. Вследствие этого ориентироваться на значения характеристик исходного материала, указанных в технической документации, не совсем правильно. Более того, такая документация за длительное время эксплуатации может быть попросту утрачена. Поэтому для получения объективной оценки изменений характеристик материала необходимо проводить периодический или постоянный мониторинг состояния конструкций. На сегодняшний день такая практика является крайне редкой.

Решение проблемы получения информации о действующей конструкции, особенно если иметь в виду мониторинг, связано исключительно с неразрушающим контролем. В настоящее время при неразрушающем контроле конструкций применяются методы качественной оценки состояния металла, основанные на использовании ультразвука, акустической эмиссии, радиационной дефектоскопии для металла [5, 6], сварных соединений [7, 8] или в труднодоступных местах [9]. Эти методы дают возможность определять наличие дефектов в металле, но не позволяют количественно охарактеризовать способность материала сопротивляться внешнему воздействию.

Существуют методики и переносные приборы для оценки твердости. Отметим методы для определения механических характеристик построением диаграмм растяжения на основе результатов вдавливания индентора, например, индентированием [10]. В статье [11] рассматривается вопрос оценки механических характеристик пластичных материалов методом индентирования шариком на основе применения конечно-элементной модели. В работе [12] проблема вдавливания пластичных материалов шариковыми инденторами рассматривается с помощью численного моделирования. Исследуется чувствительность численных результатов к упругости индентора. Однако приборное обеспечение в методах количественной оценки механических характеристик, как правило, громоздко или применяется только в лабораторных условиях, а при обследовательских работах не имеет широкого распространения.

Часто подконтрольные места конструкции, о которых необходимо получить информацию, труднодоступны, в связи с чем чрезвычайно важно иметь инструмент, позволяющий минимизировать объем выборки при обследовательских работах. В настоящее время круг методов, позволяющих производить совместную обработку априорных и опытных данных, достаточно ограничен. Собственно, это три основные группы: методы приоритета весов априорной и опытной информации в апостериорных оценках, методы экстраполяции прошлых данных на будущее и методы на основе байесовских процедур.

Авторы статьи В.Н. Арсеньев и П.В. Лабецкий [13] отмечают, что проблема выбора критерия для определения коэффициента значимости априорной информации до сих пор не решена.

Байесовские процедуры позволяют сократить апостериорную дисперсию исследуемой случайной величины за счет объединения опытной и доопытной информации. Доопытная информация может выражаться, например, в знании о виде распределения случайной величины или одного из ее параметров.

Методики, основанные на применении байесовских процедур, сегодня имеют весьма широкое применение. Они используются при описании возможности системного подхода к принятию решений на большом числе примеров, разработанных авторами работы [14]. Авторы статьи [15] применяют байесовский анализ для оценки меры экономической неопределенности при прогнозировании поведения инвесторов. В работе [16] отмечается, что применение байесовских параметрических моделей для оценки выживаемости в медицине не уступает традиционным подходам, но требует меньшей настройки параметров и повышает возможности статистических выводов и прогнозов. В [17] предлагается методология разработки классификатора распространенных стоматологических заболеваний на основе байесовских статистических процедур.

В целом стоит отметить, что методы неразрушающего контроля, как и методы учета априорной информации, освещены и подробно описаны многими авторами. Однако очевидно, что разработка методического подхода к решению вопроса минимизации объема выборки обследуемых элементов проработана не в полной мере, особенно это касается метода, основанного на синтезе неразрушающего контроля механических характеристик путем индентирования и байесовского учета априорной информации.

Таким образом, чрезвычайно необходимым является развитие систем мониторинга состояния металлоконструкций на основе неразрушающего контроля механических характеристик методом индентирования. При этом для снижения материальных и временных затрат следует осуществлять такой мониторинг, используя возможности учета доопытной информации о других подобных объектах.

Цель данной статьи заключается в обосновании предложенной автором методики, заключающейся в синтезе применения оригинального метода неразрушающего контроля и байесовского подхода к расчету минимально необходимого объема обследуемых элементов, осуществленном на конкретном примере.

Материалы и методы. По заказу строительной организации обследовались металлические трубные шпунтовые конструкции при строительстве здания по ул. Горсоветской, 51, в г. Ростове-на-Дону. Большая часть трубных конструкций была уже погружена в грунт, и нужно было провести обследование еще не погруженного небольшого числа труб для оценки их механических характеристик. При этом важно было иметь минимально необходимое их количество из условия минимизации погрешности результата такой оценки.

Для этого была использована доопытная информация о прочности 11 трубных элементов из низкоуглеродистой стали, полученная с помощью неразрушающего контроля при строительстве здания по ул. Суворова, 23, в г. Ростове-на-Дону, а также байесовской оценки оптимального числа элементов, необходимых при данном опытным обследовании трубных элементов аналогичного класса прочности.

В статье изложен оригинальный метод неразрушающего контроля, разработанный при участии автора, позволяющий одновременно получать значения временного сопротивления разрыву, предела текучести, твердости и относительного удлинения на локальном участке любой эксплуатируемой металлической конструкции. Метод особенно эффективен при обследовании металла одного класса прочности однотипных элементов конструкций машин (секций башенного крана), например, при необходимости проведения экспертизы состояния грузоподъемного крана¹, отслужившего срок службы, или при обнаружении деформаций, вызывающих сомнения. При этом нередко обследование элементов металлоконструкции даже неразрушающими методами весьма затруднительно из-за того, что технически сложно подобраться к таким элементам. Вследствие этого возникает вопрос обоснованной минимизации объема выборки увеличением ее информативности априорным знанием.

Примененный метод неразрушающего контроля основан на ударном внедрении конического индентора в испытуемый металл [18] и реализован в системе «Прочность». Она включает в себя пружинный ударный механизм с индукционным датчиком регистрации скорости перемещения индентора, аналого-цифровой преобразователь и ноутбук. Получаемый при ударном внедрении график скорости дифференцируется и интегрируется для построения соответственно графиков ускорения и перемещения. Экстремальные значения трех графиков представляют собой образ металла. Ранее проведенные эксперименты с различными марками стали позволили получить и завести в компьютер корреляционные зависимости между стандартными пределами текучести и временным сопротивлением разрыву, твердости, относительным удлинением, с одной стороны, и максимальными и минимальными значениями скорости и ускорения, глубиной внедрения индентора, с другой. Измерение многократно апробированной системой «Прочность» возможно на участке элемента диаметром более 3 см. Суммарная погрешность приборного обеспечения $\pm 4\%$.

С помощью системы «Прочность» по заказам производственных предприятий обследовались десятки конструкций, таких как стрелы, ходовые колеса, рамы строительных и дорожных машин, различные строительные металлоконструкции трибун стадионов, ферм покрытия, опор линий электропередачи, мостов, труб и др. [19]. В объемных конструкциях с большим числом однотипных элементов предполагается в соответствии, например, с СП 13–102–2003² обследовать не менее 10 % таких элементов от их общего числа. И это для строительной конструкции может составлять несколько десятков элементов, что определяет весьма значительные объем, трудоемкость, стоимость производимых работ.

При обследовании, например, стрелы грузоподъемного крана, в конструкции которой может быть до 100 и более однотипных деталей, также актуальным представляется вопрос объема принимаемой выборки.

Однако, когда в труднодоступных местах бывает сложно произвести даже один-два измерения, оказывается актуальным вопрос минимизации числа обследуемых элементов.

Для решения этого вопроса применен метод байесовского учета априорной информации.

Пусть необходимо получить информацию о механических характеристиках металла конструкции, которая эксплуатируется длительное время (с целью диагностики, мониторинга или последующей реконструкции

¹ РД 10–112–2–09. Краны стреловые общего назначения и краны-манипуляторы грузоподъемные, ч. 2. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293828/4293828984.pdf> (дата обращения: 15.05.2024).

² СП 13–102–2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200034118> (дата обращения: 15.05.2024).

в условиях ограниченного доступа к контролируемым однотипным элементам), когда обследование проводится методом неразрушающего контроля. Для обоснования необходимого объема выборки n обследуемых однотипных элементов используется доопытная информация. При этом будут иметь место среднее значение $\sigma_{вт\ ср}$ измеряемой величины характеристики, дисперсия S^2 ее опытных значений и априорная информация об этой характеристике металла подобного класса прочности.

В доопытном (априорном) знании о распределении $\sigma_{вт}$ есть параметр μ , выражающий математическое ожидание значения временного сопротивления разрыву $\sigma_{вт}$. Из предыдущего опыта известна плотность $H(\mu)$ распределения этого параметра. Пусть $(\sigma_{вт} | \mu)$ представляет собой плотность распределения значений $\sigma_{вт}$, полученных в результате настоящего измерения, при условии, что математическое ожидание $\sigma_{вт}$ действительно есть μ . Тогда апостериорная плотность $K(\mu | \sigma_{вт})$ распределения параметра μ измеряемой случайной величины характеристики $\sigma_{вт}$, в соответствии с теоремой Байеса выразится следующим образом:

$$K(\mu | \sigma_{вт}) \sim H(\mu)g(\sigma_{вт} | \mu), \quad (1)$$

где $K(\mu | \sigma_{вт})$ — плотность апостериорного распределения параметра μ , синтезирующая опытную и априорную информацию, при условии реализации опытных значений $\sigma_{вт}$. В выражении для этой плотности под параметром μ будем понимать математическое ожидание значения временного сопротивления разрыву $\sigma_{вт}$ после реализации измеренных текущих значений $\sigma_{вт}$.

Главное условие практического применения формулы (1) состоит в сопряженности плотностей распределения $H(\mu)$ и $g(\sigma_{вт} | \mu)$ (т. е. в возможности получения удобного результата).

Наилучшим образом сопрягаются плотности двух нормально распределенных случайных величин. Однако многочисленными исследованиями установлено, что распределение механических характеристик наиболее достоверно описывается законом Вейбулла, поскольку он располагает параметром сдвига распределения или минимальным значением характеристики уже не в выборке, а в генеральной совокупности. Это неудобство можно устранить, если принять в качестве $\sigma_{вт}$ не мгновенное, а его среднее значение $\sigma_{вт\ ср}$, тогда в соответствии с центральной предельной теоремой $H(\mu)$ и $g(\sigma_{вт\ ср} | \mu)$ можно принять нормально распределенными, а апостериорная плотность распределения параметра μ выразится как:

$$P(\mu | \sigma_{вт\ ср}, S) \sim P(\mu) \cdot g(\sigma_{вт\ ср} | \mu, S), \quad (2)$$

где $\sigma_{вт\ ср}$ — не текущие, а средние значения измеряемой опытной величины $\sigma_{вт}$, а μ ; S — соответственно их математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение.

При этом $P(\mu | \sigma_{вт\ ср}, S)$ будет также иметь нормальный вид, а апостериорная оценка дисперсии $D[\mu]$ примет вид [20]:

$$D[\mu] = \frac{S_a^2 S_t^2}{S_a^2 + \frac{S_t^2}{n}}, \quad (3)$$

где S_t^2 и S_a^2 — соответственно среднеквадратичные отклонения среднего значения случайной измеряемой величины от μ и μ от μ_a ; μ_a — математическое ожидание μ ; n — необходимое число опытных данных или достаточное число опытных измерений из условия минимального риска от ошибки оценивания. Отсюда

$$n = \frac{S_t^2 (S_a^2 - D[\mu])}{S_a^2 \cdot D[\mu]}. \quad (4)$$

Заметим, что в формуле (4) априорную информацию содержат S_t^2 и S_a^2 , апостериорная информация выражена в апостериорной дисперсии $D[\mu]$ и количестве необходимых опытных измерений n .

В работе исследовался материал трубной стали, предназначенной для устройства шпунтового ограждения строительного котлована.

Результаты исследования. Предложенная выше процедура была применена на основе использования аналогичной информации о механических характеристиках шпунтовых труб, полученная при обследовании подобных стальных свай-труб ограждающего ряда. При первичном обследовании выяснилось, что временное сопротивление разрыву ориентировочно материала труб шпунтового ограждения на Горсоветской, 51, составило 418 МПа.

Среднее значение временного сопротивления разрыву металла партии труб, обследованных ранее (на Суворова, 23) составляла 405 МПа, что свидетельствовало о принадлежности обеих партий труб приблизительно к одному классу прочности. Эта информация была использована в качестве априорной. В таблице 1 приводятся ранжированные по возрастанию значения временного сопротивления разрыву металла ранее обследованных 11 труб.

Таблица 1

Значения временного сопротивления разрыву, полученные измерением на 11 трубах, МПа

393	399	402	408	417
394	399	402	408	418
394	399	402	409	418
394	399	402	411	418
395	400	403	411	419
396	400	403	411	420
396	400	404	412	420
396	400	405	412	421
396	400	405	412	425
396	400	405	412	426
396	400	405	412	426
396	400	405	412	427
397	400	406	413	427
397	401	406	413	430
397	401	406	414	430
397	401	407	414	435
398	401	407	415	436
398	401	407	416	436
398	402	407	416	
398	402	407	416	

На рис. 1 представлена частота n_{zn} значений временного сопротивления разрыву со среднеекватичным отклонением $S\sigma_b = 11,3$ МПа и дисперсией $S^2\sigma_b = 110$ МПа².

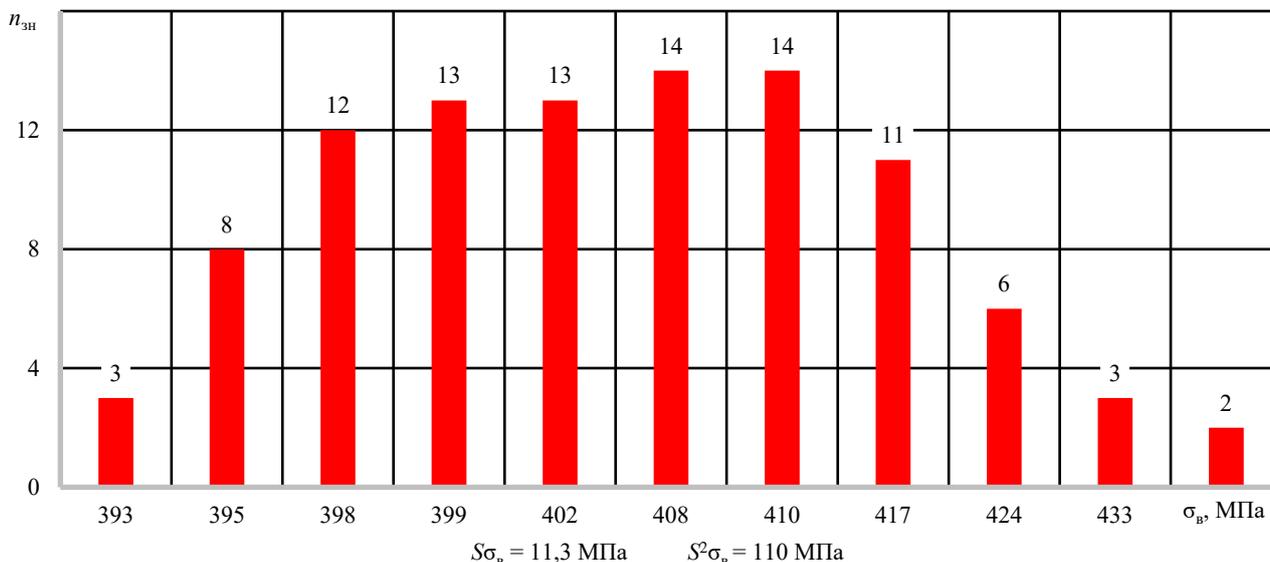


Рис. 1. Распределение значений временного сопротивления разрыву металла свай-труб шпунтового ограждения по ул. Суворова, 23 в Ростове-на-Дону

Средние значения временного сопротивления разрыву $\sigma_{вр_тр}$ по каждой из $m_{тр}$ труб представлены на рис. 2, а на рис. 3 — их распределение со средним значением $\sigma_{вр} = 405$ МПа, среднеекватичным отклонением $S\sigma_b = 3,6$ МПа и дисперсией $S^2\sigma_b = 14$ МПа².

Для расчета достаточного объёма выборки по формуле (4) апостериорная дисперсия $D[\mu]$ определена следующим образом. Для стали Ст3 классов прочности C255–C275, из которой изготовлена труба, предусмотрен диапазон возможных значений временного сопротивления разрыву³ от 380 до 400 Мпа, т. е. исходя из правила трёх сигм нормально распределенной случайной величины допустимый размах в 20 МПа приблизительно соответствует шести среднеекватичным отклонениям.

³ ГОСТ 27772–88. Прокат строительных стальных конструкций. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003192> (дата обращения: 15.05.2024).

Тогда апостериорное среднее квадратичное отклонение выразится как $(20/6) = 3,33$ (МПа).

Поскольку рассуждения касаются средних значений временного сопротивления разрыву, можно воспользоваться соотношением априорных среднее квадратичных отклонений текущих (110 МПа) и средних (14 МПа) значений временного сопротивления разрыву в предположении, что их соотношение в апостериорной оценке останется приблизительно тем же.

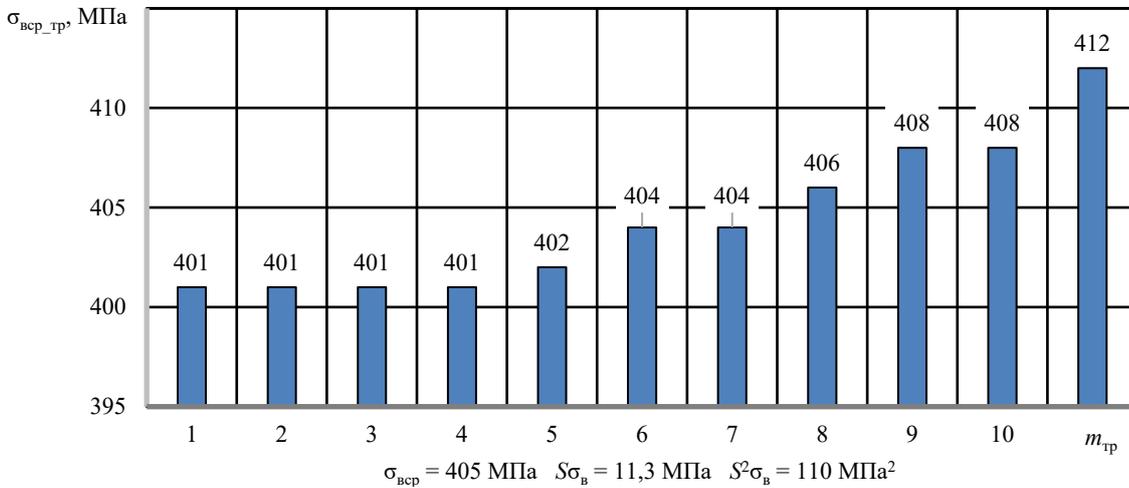
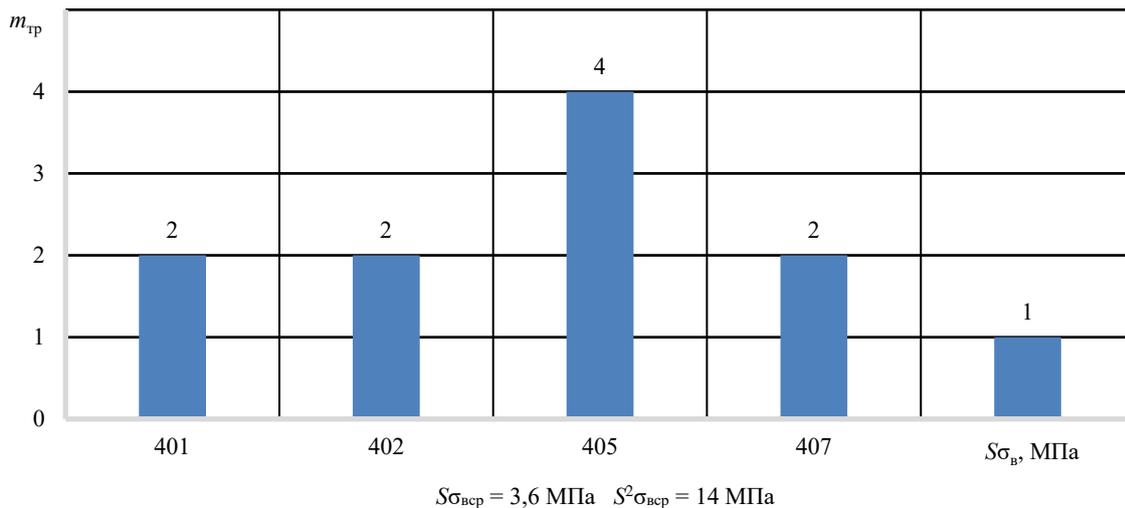


Рис. 2. Средние значения временного сопротивления разрыву металла 11 свай-труб шпунтового ограждения по ул. Суворова, 23 в Ростове-на-Дону



$\sigma_{vsr} = 405$ МПа, среднее квадратичным отклонением $S_{\sigma_{vsr}} = 3,6$ МПа и дисперсией $S^2_{\sigma_{vsr}} = 14$ МПа²

Таким образом, апостериорную дисперсию среднего значения временного сопротивления разрыву можно определить:

$$D[\mu] = \frac{11 \cdot 14}{110} = \frac{11}{7,86} = 1,4 \text{ МПа}^2.$$

Априорная дисперсия среднего значения временного сопротивления разрыву:

$$S^2_t = S^2_{\sigma_{vsr}} = 14 \text{ МПа}^2.$$

Априорная дисперсия параметра μ распределения среднего значения временного сопротивления разрыву S^2_a принимается также в предположении, что отношение S^2_t к S^2_a останется таким же (7,86). Таким образом, в результате исследования определилось минимально необходимое количество обследуемых элементов — две-три трубы-сваи.

$$S^2_a = \frac{14}{7,86} = 1,78 \text{ МПа}^2,$$

$$n = \frac{S^2_t (S^2_a - D[\mu])}{S^2_a \cdot D[\mu]} = \frac{14(1,78 - 1,4)}{1,78 \cdot 1,4} = 2,13.$$

Обсуждение и заключение. При решении задачи минимизации выборки опытной партии труб-свай был применен оригинальный метод неразрушающего контроля на основе индентирования. При этом в качестве априорной информации были использованы механические характеристики, ранее полученные при обследовании 11 труб-свай аналогичной шпунтовой конструкции. В опытной партии количество возможных к обследованию труб-свай было ограничено, и использование байесовских процедур позволило существенно снизить их необходимое число до трех. При этом риск от неточности оценивания был минимизирован.

Рассмотренные в статье стали для изготовления труб относятся к классу прочности КП 245, в соответствии с ГОСТ 54157–10⁴ имеют значение предела текучести 245 МПа и временного сопротивления разрыву 412 МПа. Преимущественно они изготавливаются из стали 3сп и 3пс. Эти же стали широко используются при изготовлении машиностроительных конструкций в грузоподъемных кранах, в рамках тракторов, прицепов, полуприцепов и др., для которых изложенный в статье подход также актуален и возможен. Таким образом, использование априорной информации на основе байесовских процедур при неразрушающем контроле механических характеристик низкоуглеродистых сталей, применяемых в конструкциях строительного и машиностроительного назначения, позволяет обосновать минимально необходимое число элементов объекта обследования, существенно сократить объемы, сроки, трудоёмкость и стоимость работ.

Список литературы / References

1. Брюшко В.И. *Оценка состояния металла магистральных и технологических трубопроводов*. Автореф. дис. канд. техн. наук. Тольятти; 2006. 19 с.
Bryushko VI. *Assessment of Metal Condition of Main and Technological Pipelines*. Author's abstract. Tolyatti; 2006. 19 p. (In Russ.)
2. Никифорчин Г.Н., Цирульник О.Т., Звирко О.И., Гредиль М.И., Волошин В.А. Оценка деградации физико-механических свойств сталей длительно эксплуатируемых магистральных газопроводов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2013;79(9):48–55.
Nikiforchin GN, Tsiurul'nik OT, Zvirko OI, Gredil' MI, Voloshin VA. Degradation of the Physical and Mechanical Properties of Steels in Long-Run Gas Pipelines. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2013;79(9):48–55. (In Russ.)
3. Горынин И.В., Тимофеев Б.Т. Деградация свойств конструкционных материалов при длительном воздействии эксплуатационных температур. *Вопросы материаловедения*. 2011;1(65):41–59.
Gorynin IV, Timofeev BT. Degradation of Properties of Structural Materials at Long Time Influence of Operational Temperatures. *Voprosy Materialovedeniya*. 2011;1(65):41–59. (In Russ.)
4. Киселев В.В. Влияние высоких температур на прочностные свойства металлоконструкций. *NovaInfo*. 2018;(82):9–12. URL: <https://novainfo.ru/article/14859> (дата обращения: 15.05.2024).
Kiselev VV. Influence of High Temperatures on the Strength Properties of Metal Structures. *NovaInfo*. 2018;(82):9–12. (In Russ.) URL: <https://novainfo.ru/article/14859> (accessed: 15.05.2024).
5. Pullin R, Holford KM, Lark RJ, Eaton MJ. Acoustic Emission Monitoring of Bridge Structures in the Field and Laboratory. *Journal of Acoustic Emission*. 2008;26:172–181. URL: <https://www.ndt.net/article/ewgae2008/papers/136.pdf> (accessed: 15.05.2024).
6. Anastasopoulos AA, Kourousis DA, Cole PT. Acoustic Emission Inspection of Spherical Metallic Pressure Vessels. In: *The 2nd International Conference on Technical Inspection and NDT*. Tehran, Iran: 2008. URL: <http://www.ndt.net/article/tindt2008/papers/177.pdf> (accessed: 15.05.2024).
7. Gongtian Shen, Zhanwen Wu. Study on Spectrum of Acoustic Emission Signals of Bridge Crane. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2010;52(3):144–148. URL: http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_07_08.pdf (accessed: 15.05.2024).
8. Aljets D, Chong A, Wilcox S, Holford K. Acoustic Emission Source Location in Plate-Like Structures using a Closely Arranged Triangular Sensor Array. In: *Proceedings of the 29th European Conference on Acoustic Emission Testing EWGAE*. Vienna, September; 2010. P. 85–98.
9. Rhys P, Baxter M, Eaton M, Holford K, Evans S. Novel Acoustic Emission Source Location. *Journal of Acoustic Emission*. 2007;(25):194–214.
10. Rong Chen, Xiao Yang Li, Lin Lin Zhang, Xiang Yu Wang. Numerical Simulation of Spherical Indentation Method to Identify Metal Material Properties. *Advanced Materials Research*. 2015;(1119):779–782. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1119.779>
11. Syngellakis S, Habbab H, Mellor BG. Finite Element Simulation of Spherical Indentation Experiments. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2018;6(4):749–763. <http://doi.org/10.2495/CMEM-V6-N4-749-763>

⁴ ГОСТ 54157–10. Трубы стальные профильные для металлоконструкций. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200084959> (дата обращения: 15.05.2024).

12. Matyunin VM, Marchenkov AYu, Karimbekov MA, Demidov AN, Volkov PV, Abusaif N, et al. Express Evaluation of Welded Joints Cool Resistance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;759:012016 <http://doi.org/10.1088/1757-899X/759/1/012016>

13. Арсеньев В.Н., Лабетский П.В. Метод апостериорного оценивания характеристик системы управления летательного аппарата. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2014;57(10):23–28. URL: https://pribor.ifmo.ru/ru/article/10855/metod_aposteriornogo_ocenivaniya_harakteristik_sistemy_upravleniya_letatelno_go_apparata_.htm (дата обращения: 15.05.2024).

Arseniev VN, Labetsky PV. A Method of Posterior Estimation of Characteristics of Flying Vehicle Control System. *Journal of Instrument Engineering*. 2014;57(10):23–28. (In Russ.) URL: https://pribor.ifmo.ru/en/article/10855/metod_aposteriornogo_ocenivaniya_harakteristik_sistemy_upravleniya_letatelno_go_apparata_.htm (accessed: 15.05.2024).

14. Kjørulff UB, Madsen AL. Bayesian. *Networks and Influence Diagrams: A Guide to Construction and Analysis*. Latest edition. New York: Springer VS; 2013. 382 p.

15. Boubekur Baba, Güven Sevil. Bayesian Analysis of Time-Varying Interactions between Stock Returns and Foreign Equity Flows. *Financial Innovation*. 2021;7:51. <https://doi.org/10.1186/s40854-021-00267-9>

16. Paolucci I, Yuan-Mao Lin, Silva JAM, Brock KK, Odisio BC. Bayesian Parametric Models for Survival Prediction in Medical Applications. *BMC Medical Research Methodology*. 2023;23:250. <https://doi.org/10.1186/s12874-023-02059-4>

17. Chattopadhyay S, Davis RM, Menezes DD, Singh G, Acharya RU, Tamura T. Application of Bayesian Classifier for the Diagnosis of Dental Pain. *Journal of Medical Systems*. 2012;36:1425–1439. <https://doi.org/10.1007/s10916-010-9604-y>

18. Belen'kii DM, Vernezi NL, Cherpakov AV. Changes in the mechanical properties of butt welded joints in elastoplastic deformation. *Welding International*. 2004;18:213–215. <https://doi.org/10.1533/wint.2004.3268>

19. Вернези Н.Л. Коэффициент вариации предела текучести металла новых и долгое время эксплуатировавшихся строительных конструкций. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(3):44–54. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54>

Vernezi NL. Variation Coefficient of Metal Yield Strength in New and Long-Used Building Structures. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(3):44–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54>

20. Вернези Н.Л. Метод оценки прочности металла неразрушающим способом с использованием априорной информации. *Инженерный вестник Дона*. 2013;3(26):133. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1898> (дата обращения: 15.05.2024).

Vernezi NL. Method of an Assessment of Durability of Metal in the Nondestructive Way with Use of Aprioristic Information. *Engineering journal of Don*. 2013;3(26):133. (In Russ.) URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1898> (accessed: 15.05.2024).

Об авторе:

Никос Леонидович Вернези, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), vernezin@mail.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Nikos L. Vernezi, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), vernezin@mail.ru

Conflict of Interest Statement: the author does not have any conflict of interest.

The author has read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 20.09.2024

Поступила после рецензирования / Revised 04.10.2024

Принята к публикации / Accepted 15.10.2024

МАШИНОСТРОЕНИЕ

MACHINE BUILDING



УДК 62-192

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-39-46>

Усеченная форма закона Фишера-Типпета для моделирования нагруженности машиностроительных конструкций

А.А. Котесов

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ a.kotesov@yandex.ru

EDN: OXXQDQ

Аннотация

Введение. Статистические данные служат основой для оценки показателей надежности машиностроительных конструкций. Неполнота таких данных или неточность при моделировании случайных величин могут стать причиной завышенной оценки при определении показателей надежности. На практике для моделирования случайных величин, характеризующих несущую способность, нагруженность, ресурс машиностроительных конструкций, обычно применяют законы с бесконечно убывающими или возрастающими функциями распределения экспоненциального семейства. Для повышения точности при моделировании случайных величин часто используют усеченные формы законов распределения, которые позволяют рассматривать случайную величину в заданном интервале, исключая тем самым область невозможных значений. В ряде работ для моделирования случайных величин, характеризующих нагруженность машиностроительных конструкций, предлагается использовать закон Фишера-Типпета с тремя параметрами. Преимуществом данного закона является параметр, ограничивающий область определения рассматриваемой случайной величины справа, но при этом левая часть функции распределения бесконечно убывает, что не совсем корректно для характеристик нагруженности. Поэтому для повышения точности моделирования случайных величин, характеризующих нагруженность, законом Фишера-Типпета целесообразно иметь ограничение слева. В настоящий момент в научной литературе не представлено описание усеченных форм для закона распределения. Поэтому в предлагаемой статье будут рассмотрены обоснование и получение усеченной формы закона Фишера-Типпета с тремя параметрами и последующее использование ее в расчетных методиках. В связи с этим цель автора — получение левосторонней усеченной формы закона Фишера-Типпета с тремя параметрами для моделирования случайных величин в заданном интервале.

Материалы и методы. В статье подробно описана история получения, представлено описание и отличительные особенности закона Фишера-Типпета с тремя параметрами, а также обоснована необходимость получения его усеченной формы.

Результаты исследования. В результате исследования обоснована и получена усеченная форма закона Фишера-Типпета с тремя параметрами в дифференциальном и интегральном виде. Представлены результаты вычислений и графики функций, подтверждающие нормировку случайной величины в заданном интервале.

Обсуждение и заключение. Сделан вывод о преимуществах и недостатках усеченной формы закона Фишера-Типпета. Определена возможность практического применения усеченного закона при схематизации случайных процессов нагружения, возникающих в условиях эксплуатации или испытаний элементов машин и конструкций для оценки усталостной долговечности и определения характеристик сопротивления усталости. Направление дальнейших исследований связывается с практическим применением усеченной формы, в частности с необходимостью разработки методики для оценки параметров усеченного закона и проверки согласия предложенной модели.

Ключевые слова: случайная величина, закон распределения, усеченная форма, нагруженность, надежность

Благодарности. Автор выражает благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и предложения по их совершенствованию способствовали значительному повышению качества изложения результатов исследования, представленных в настоящей статье.

Для цитирования. Котесов А.А. Усеченная форма закона Фишера-Типпета для моделирования нагруженности машиностроительных конструкций. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(4):39–46. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-39-46>

Fisher-Tippett Law Truncated Form for Loading Modeling of Machinery Structures

Anatoly A. Kotesov 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ a.kotesov@yandex.ru

Abstract

Introduction. Statistical data are used as a basis for assessing the reliability of engineering structures. However, incomplete data or inaccurate modeling of random variables may lead to an overestimation of reliability indicators. In practice, laws with infinitely decreasing or increasing distribution functions of an exponential family are usually used to model random variables characterizing the bearing capacity, load, and resource of engineering structures. To improve the accuracy of modeling of random variables, truncated forms of distribution laws are often used. These forms allow us to consider the random variable within a specified interval, excluding impossible values. Several studies have suggested using the Fisher-Tippett law with three parameters for modeling random variables related to the loading of engineering structures. The advantage of this law is that it limits the range of the random variable on the right side, but the left side of the distribution function decreases indefinitely, which is not ideal for load characteristics. To improve the accuracy of predicting random variables that characterize the load, it would be helpful to have a left-sided restriction using the Fisher-Tippett law. Currently, there are no descriptions of truncated forms of the distribution law in scientific literature. This article will explore the justification and development of a three-parameter truncated form of the Fisher-Tippett law and its use in calculation methods. The goal is to create a left-sided truncated version of the Fisher-Tippett distribution with three parameters to model random variables within a specific range.

Materials and Methods. The article provides a detailed description of the history of the Fisher-Tippett law, including its three-parameter form, and justifies the need for obtaining its truncated form.

Results. As a result of the research, a truncated form of the Fisher-Tippett three-parameter law in differential and integral forms was obtained and substantiated. The findings included graphs and calculations that demonstrated the normalization of a random variable within a given range.

Discussion and Conclusion. The conclusion was drawn about the advantages and disadvantages of the truncated form of the Fisher-Tippett law. The possibility of its practical application in the schematization of random loading processes under operating conditions and testing of machine elements and structures to assess fatigue life and determine fatigue resistance characteristics was established. The direction of further research is related to the practical use of the truncated form, particularly with the need to develop a method for evaluating the parameters of the truncated distribution and verifying the consistency of the proposed model.

Keywords: random variable, distribution law, truncated form, loading, reliability

Acknowledgements. The author would like to express his gratitude to the reviewers for their critical assessment of the submitted materials and their suggestions for improvement. These comments have contributed significantly to the enhancement of the quality of the presentation of the research results presented in this paper.

For citation. Kotesov AA. Fisher-Tippett Law Truncated Form for Loading Modeling of Machinery Structures. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;8(4):39–46. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-39-46>

Введение. Обеспечение надежности машиностроительных конструкций не перестает быть актуальной задачей в настоящее время. Отказ несущих элементов машиностроительных конструкций в процессе эксплуатации может представлять опасность и приводить к экономическим потерям. Поэтому вопросы определения показателей надежности, равно как и разработка методов более точной и достоверной оценки этих показателей, а также связанные с ними исследования являются, несомненно, важными и актуальными.

В работах профессора В.Е. Касьянова [1] подчеркивается, что надежная машина — это необязательно дорого или дороже, чем менее надежная. Низкая надежность может быть обусловлена различными факторами, в частности, одной из возможных причин внезапных отказов может являться несовершенство расчетных методов и неполнота статистических данных, используемых при оценке показателей надежности [2].

На практике для моделирования случайных величин, характеризующих несущую способность, нагруженность, ресурс машиностроительных конструкций, обычно применяют законы распределения экспоненциального семейства с убывающими в бесконечность функциями распределения. Об этом подробно излагается в работах В.В. Москвичева и М.А. Ковалева [3], И.А. Паначева и И.В. Кузнецова [4], Г.Ш. Хазановича и Д.С. Апрышкина [5]. Для повышения точности обычно применяют усеченные формы законов распределения, которые позволяют рассматривать случайную величину в заданном интервале, ориен-

тируясь на имеющиеся статистические данные для определения соответствующих границ. В.Е. Касьянов, Л.П. Шулькин [6], Д.Б. Демченко [7], А.А. Котесова [8] для моделирования случайных величин характеризующих нагруженность машиностроительных конструкций, предлагают использовать закон Фишера-Типпета с тремя параметрами. Преимуществом данного закона является параметр, ограничивающий область определения рассматриваемой случайной величины справа, но при этом левая часть функции распределения бесконечно убывает, что не совсем корректно для характеристик нагруженности. Поэтому для повышения точности моделирования случайных величин, характеризующих нагруженность, законом Фишера-Типпета целесообразно иметь ограничение слева. Усеченные формы для наиболее часто применяемых законов известны и используются в расчетных методиках¹, но в настоящий момент в научной литературе не представлено описание усеченных форм для закона Фишера-Типпета. Поэтому в данной статье рассматривается вопрос обоснования и получения усеченной формы закона Фишера-Типпета с тремя параметрами и последующего использования ее в расчетных методиках.

Материалы и методы. При моделировании случайных величин наиболее часто применяется Гауссово распределение (нормальный закон), и это во многом оправдано [9]. Пределы определения случайных величин в данной модели задаются интервалом $(-\infty; \infty)$, что не совсем корректно для характеристик прочности, нагруженности и ресурса. Поэтому для моделирования таких случайных величин в работах В.Е. Касьянова предлагается использовать модель Вейбулла с тремя параметрами, которая отличается от модели Гаусса и двухпараметрического Вейбулла тем, что задает несколько другой интервал для случайной величины $[c; \infty)$, где c — параметр сдвига, который определяет минимальное значение случайной величины, т. е. имеет ограничение слева.

Функция плотности распределения закона Вейбулла с тремя параметрами определяет выражение:

$$f(x|a,b,c) = \frac{b}{a} \left(\frac{x-c}{a} \right)^{b-1} e^{-\left(\frac{x-c}{a}\right)^b}, \quad (1)$$

где x — значение случайной величины; a, b, c — соответственно параметры масштаба, формы и сдвига распределения.

Также для моделирования характеристик нагруженности предлагается использовать одну из трех предельных форм распределений, отнесенного Р. Фишером и К. Типпетом к типу III. Распределения Гумбеля и Фреше были отнесены соответственно к первому и второму типам [10].

Функция плотности распределения третьего типа определяет следующее выражение:

$$f(x|k) = k(-x)^{k-1} e^{-(-x)^k}, \quad (2)$$

где x — значение случайной величины; k — параметр формы.

Очевидно сходство данного распределения с однопараметрическим распределением Вейбулла, которое также является частным случаем обобщенного распределения экстремальных значений [11], только ориентировано на минимальные значения. Задав обозначения и добавив дополнительные параметры в выражение (2) по аналогии с трехпараметрическим законом Вейбулла, а именно параметр масштаба — a и параметр сдвига (положения) — c , получим следующее выражение для функции плотности распределения:

$$f(x|a,b,c) = \frac{b}{a} \left(\frac{c-x}{a} \right)^{b-1} e^{-\left(\frac{c-x}{a}\right)^b}, \quad (3)$$

где x — значение случайной величины; a, b, c — соответственно параметры масштаба, формы и сдвига распределения.

Проинтегрировав выражение (3) относительно x , получим функцию распределения закона:

$$F(x) = \int f(x|a,b,c) dx, \\ F(x) = e^{-\left(\frac{c-x}{a}\right)^b}. \quad (4)$$

Полученное выражение предложено именовать законом Фишера-Типпета с тремя параметрами, который, в отличие от закона Вейбулла, имеет ограничение справа и задает область определения случайной величины в интервале $(-\infty; c]$.

Как видно, закон Фишера-Типпета с тремя параметрами не имеет ограничения слева. Допущение этой модели, заданное интервалом $(-\infty; 0]$, может противоречить физическому смыслу рассматриваемых случайных величин. В частности, для характеристик нагруженности интервал $[0; c]$ будет более корректным. Поэтому возникает необходимость в определении левосторонней усеченной формы закона Фишера-Типпета.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать подход, аналогичный подходу, рассмотренному в работах [12] и [13] для получения правостороннего усеченного закона Вейбулла.

¹ РТМ 24.090.25-76 Краны грузоподъемные. Расчет вероятности безотказной работы элементов. URL: <https://gostrf.com/normadata/1/4293827/4293827795.htm> (дата обращения: 15.05.2024).

Результаты исследования. Для получения левосторонней усеченной формы закона Фишера-Типпета необходимо задать условие, при котором все значения случайной величины x будут больше определенной заданной величины t , которая, в свою очередь, будет определять точку усечения закона слева, т. е. $x \in [t; c]$. Предположим, что $X_t (t \geq 0)$ обозначает усеченную слева случайную величину, распределенную по закону Фишера-Типпета, такую, что $F_t = c - x \mid c - x \geq t$, где $x \in W(a, b)$, $a, b > 0$ и $c > t$. Так как $t \geq 0$, то значение интеграла от функции плотности распределения $f(x)$ в интервале $[t; c]$ будет меньше, чем в интервале $[-\infty; c]$:

$$\int_t^c f(x | a, b, c) dx < \int_{-\infty}^c f(x | a, b, c) dx = 1.$$

Поэтому для получения усеченной формы необходимо перераспределить случайную величину в интервале $[-\infty; t]$, определив нормирующий коэффициент, зависящий от t :

$$K_{[t; c]} \cdot \int_t^c f(x | a, b, c) dx = \int_{-\infty}^c f(x | a, b, c) dx,$$

$$K_{[t; c]} \cdot \int_t^c f(x | a, b, c) dx = 1,$$

$$K_{[t; c]} = \frac{1}{\int_t^c f(x | a, b, c) dx},$$

$$K_{[t; c]} = \frac{1}{F(c) - F(t)},$$

где $F(c)$ и $F(t)$ — функция распределения закона Фишера-Типпета с тремя параметрами, соответственно при $x = c$ и $x = t$.

Следовательно, усеченную функцию распределения будет определять следующее выражение:

$$f_{[t; c]}(x | a, b, c) = K_{[t; c]} \cdot f(x | a, b, c),$$

$$f_{[t; c]}(x | a, b, c) = \frac{f(x | a, b, c)}{F(x = c) - F(x = t)},$$

так как $F(c) = 1$, то получим:

$$f_{[t; c]}(x | a, b, c) = \frac{f(x | a, b, c)}{1 - F(t)}.$$

В результате получаем функцию плотности распределения для левосторонней усеченной формы закона Фишера-Типпета с тремя параметрами в интервале $[t; c]$:

$$f_{[t; c]}(x | a, b, c) = \frac{\frac{b}{a} \left(\frac{c-x}{a} \right)^{b-1} e^{-\left(\frac{c-x}{a} \right)^b}}{1 - e^{-\left(\frac{c-t}{a} \right)^b}}, \quad (5)$$

где x — значение случайной величины; a, b, c — соответственно параметры масштаба, формы и сдвига распределения; t — точка усечения распределения (минимальное возможное значение случайной величины).

Очевидно, что, приняв $t = 0$, получим следующее выражение для интервала $[0; c]$:

$$f_{[0; c]}(x | a, b, c) = \frac{\frac{b}{a} \left(\frac{c-x}{a} \right)^{b-1} e^{-\left(\frac{c-x}{a} \right)^b}}{1 - e^{-\left(\frac{c}{a} \right)^b}}. \quad (6)$$

С целью демонстрации полученного результата произвольно заданы параметры распределения ($a = 10$; $b = 2,5$; $c = 15$), построены графики функций плотностей распределения исходной (3) и усеченной формы (6) закона Фишера-Типпета (рис. 1). По заданным параметрам произведено вычисление определённых интегралов от исходной функции плотности (3) и функции плотности усеченной формы (6) в интервалах $(-\infty; c]$, $(-\infty; 0]$, $[0; c]$. Вычисления выполнены в программном комплексе Mathcad 14.0.0.163 с допустимой сходимостью $1 \cdot 10^{-5}$, результаты вычислений представлены в таблице 1.

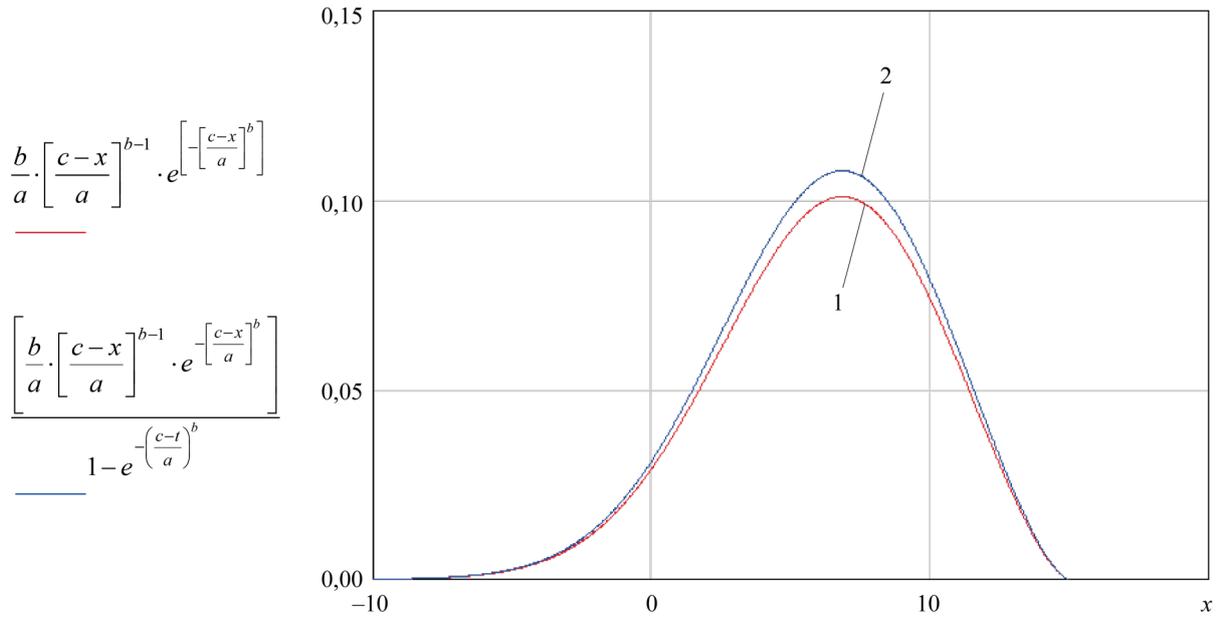


Рис. 1. Графики плотности распределения закона Фишера-Типпета с тремя параметрами ($a = 10; b = 2,5; c = 15$):
1 — исходная функция плотности; 2 — функция плотности усеченного закона

Таблица 1

Результаты вычисления определенных интегралов от функций плотностей исходной и усеченной формы закона Фишера-Типпета

Интервал случайной величины	Пределы интегрирования		Функция и переменная интегрирования	
	нижний	верхний	$f(x a, b, c) dx$	$f_{[0;c]}(x a, b, c) dx$
$(-\infty; c]$	$-\infty$	c	0,9999999997581260	1,06788096063614480
$(-\infty; 0]$	$-\infty$	0	0,06356603700150229	0,06788096066197107
$[0; c]$	0	c	0,93643395954036040	0,99999999631045600

Графики функций на рис. 1 и результаты численного решения, представленные в таблице 1, позволяют сделать вывод о том, что полученная аналитическим путем функция плотности распределения для левосторонней усеченной формы закона Фишера-Типпета с тремя параметрами (6) корректна и нормирует случайную величину в интервале $[0; c]$:

$$\int_0^c f_{[0;c]}(x|a, b, c) dx = 1.$$

Но при этом функция сохраняет область определения левее точки усечения, т. е. в интервале $(-\infty; 0]$, что необходимо учитывать при использовании усеченной формы закона в расчетных методиках:

$$\int_{-\infty}^0 f_{[0;c]}(x|a, b, c) dx + \int_0^c f_{[0;c]}(x|a, b, c) dx = \int_{-\infty}^c f_{[0;c]}(x|a, b, c) dx > 1.$$

Для получения функции распределения усеченного закона Фишера-Типпета проинтегрируем выражение (5):

$$F_{[t;c]}(x) = \int_{[t;c]} f_{[t;c]}(x|a, b, c) dx,$$

$$F_{[t;c]}(x) = \frac{e^{-\left(\frac{c-x}{a}\right)^b}}{1 - e^{-\left(\frac{c-t}{a}\right)^b}}. \tag{7}$$

Графики исходной (4) и усеченной (7) функций распределения представлены на рис. 2.

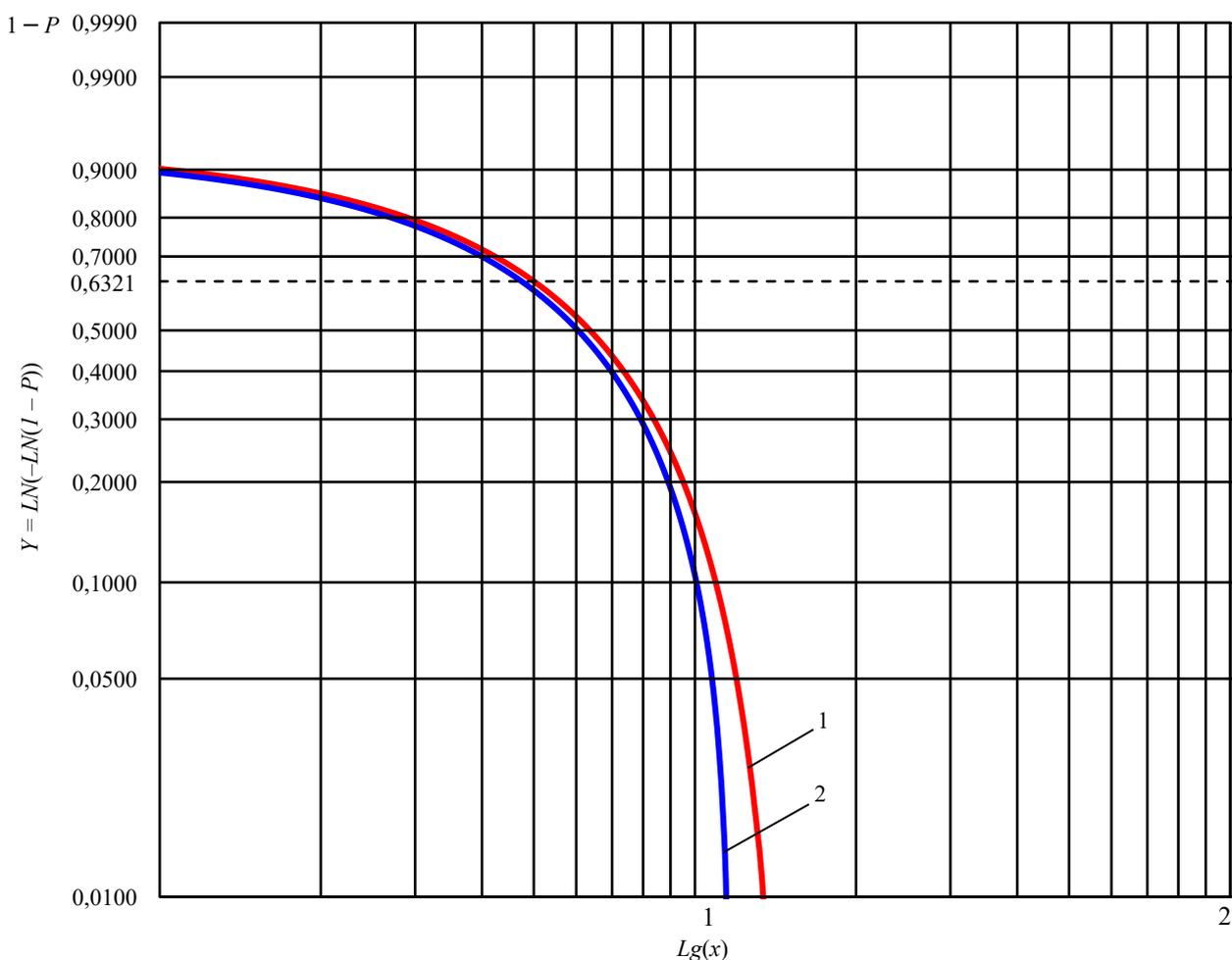


Рис. 2. Графики функций распределения закона Фишера-Типпета с тремя параметрами: 1 — исходная форма; 2 — усеченная форма ($t = 0$); P — вероятность; x — случайная величина

Из выражения (7) получаем обратную функцию:

$$F_{[t;c]}^{-1}(x) = c - a \sqrt[b]{ - \ln \left(F_{[t;c]}(x) \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{c-t}{a}\right)^b} \right) \right) } \quad (8)$$

Обсуждение и заключение. Таким образом, получена левосторонняя усеченная форма закона Фишера-Типпета с тремя параметрами, которую можно использовать при схематизации случайных процессов нагружения, возникающих в условиях эксплуатации или испытаний элементов машин и конструкций совместно с ГОСТ 25.101². Применение усеченной формы закона дает возможность ограничить интервал случайной величины и исключить область невозможных значений левее точки усечения, что позволяет повысить точность при использовании в расчетных методиках оценки усталостной долговечности элементов машиностроительных конструкций по критериям накопления усталостных повреждений, моделирования процесса нагружения при испытаниях на усталость и расчетном определении характеристик сопротивления усталости. Результаты вычислений показали, что функция плотности распределения усеченного закона корректна и нормирует случайную величину в заданном интервале, но при этом сохраняет область определения левее точки усечения, что является недостатком полученной модели. Поэтому для адекватного применения усеченного закона в расчетных методиках необходимо вводить соответствующее ограничение. Предметом будущих исследований являются вопросы практического применения усеченного закона, в частности, для обработки статистических данных необходимо определить методику оценки параметров усеченного закона и определения доверительных интервалов, в том числе получить выражения для оценки математического ожидания и дисперсии, а также рассмотреть возможность применения существующих критериев согласия.

² ГОСТ 25.101-83 *Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012857> (дата обращения: 15.05.2024).

Список литературы / References

1. Касьянов В.Е. Метод обеспечения абсолютной безотказности деталей и машин и расчет увеличения их цены. *Инженерный вестник Дона*. 2016;1(40):19.
Kasyanov VE. A Method of Ensuring the Absolute Reliability of Parts and Machines and Calculating the Increase of their Prices. *Engineering journal of Don*. 2016;1(40):19. (In Russ.)
2. Труханов В. М. Прогнозирование ресурса деталей, узлов, механизмов и технического объекта в целом на стадии проектирования. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2013;3:38–42.
Trukhanov VM. Prediction of the Life of Details, Units, Mechanisms, and the Devices in General at the Design Stage. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2013;3:38–42. (In Russ.)
3. Москвичев В.В., Ковалев М.А. Оценка показателей эксплуатационной надежности карьерных гидравлических экскаваторов. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2020;13(6):745–756. <http://doi.org/10.17516/1999-494X-0263>
Moskvichev VV, Kovalev MA. Assessment of Operational Reliability Indicators of Mine Hydraulic Excavators. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2020;13(6):745–756. (In Russ.) <http://doi.org/10.17516/1999-494X-0263>
4. Паначев И.А., Кузнецов И.В. Обоснование нагруженности элементов металлоконструкций большегрузных автосамосвалов при транспортировании горной массы на разрезах Кузбасса. В: *Труды международной научно-практической конференции «Новые подходы к развитию угольной промышленности»*. Кемерово; 2013:61–64.
Panachev IA, Kuznetsov IV. Substantiation of the Loading of Elements of Metal Structures of Heavy-Duty Dump Trucks during the Transportation of Rock Mass in the Kuzbass Sections. In: *Proceedings of the International Scientific and practical Conference “New Approaches to the Development of the Coal Industry”*. Кемерово; 2013. P. 61–64. (In Russ.)
5. Хазанович Г.Ш., Апрышкин Д.С. Оценка нагруженности силовых элементов пассажирского лифта по результатам регулярного. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2020;1:32–42. <http://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-1-32-42>
Khazanovich GS, Apryshkin DS. Assessment of Load of Load-Bearing Elements of the Passenger Elevator Based on Regular Monitoring Results. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2020;(1):32–42. (In Russ.) <http://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-1-32-42>
6. Касьянов В.Е., Шулькин Л.П. Определение максимальной нагруженности деталей с помощью моделирования. *Научное обозрение*. 2014;10(3):671–674.
Kasyanov VE, Schulkin LP. Determination of the Maximum Loading of Parts with the Help of Modeling. *Science Review*. 2014;10(3):671–674. (In Russ.)
7. Демченко Д.Б., Касьянов В.Е. Оптимизационный метод статического расчета строительных конструкций с применением вероятностных законов с ограничениями. *Инженерный вестник Дона*. 2013;2(25):84.
Demchenko DB, Kasyanov VE. Optimization Method for Static Calculation of Construction Designs with the Use of Probabilistic Laws with Restrictions. *Engineering journal of Don*. 2013;2(25):84. (In Russ.)
8. Котесов А.А., Касьянов В.Е., Котесова А.А. Методика обеспечения безотказности металлоконструкций грузоподъемных кранов в течение срока службы. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2020;4(80):30–39. http://doi.org/10.46973/0201-727X_2020_4_30
Kotesov AA, Kasyanov VE, Kotesova AA. Model for Ensuring the Reliability of Metal Structures of Lifting Cranes during Their Service Period. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. 2020;4(80):30–39. (In Russ.) http://doi.org/10.46973/0201-727X_2020_4_30
9. Horrace WC. Moments of the Truncated Normal Distribution. *Journal of Productivity Analysis*. 2015;43:133–138. <https://doi.org/10.1007/s11123-013-0381-8>
10. Fisher RA, Tippett LHC. Limiting Forms of the Frequency Distribution of the Longest of Smallest Member of Sample. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 1928;24(2),180–190. <https://doi.org/10.1017/S0305004100015681>
11. Bashir Ahmed Albashir Abdulali, Mohd Aftar Abu Bakar, Kamarulzaman Ibrahim, Noratiqah Mohd Ariff. Extreme Value Distributions: An Overview of Estimation and Simulation. *Journal of Probability and Statistics*. 2022;5449751. <https://doi.org/10.1155/2022/5449751>
12. Salman Abbas, Muhammad Farooq, Jumanah Ahmed Darwish, Saman Hanif Shahbaz, Muhammad Qaiser Shahbaz. Truncated Weibull–Exponential Distribution: Methods and Applications. *Scientific Reports*. 2023;13:20849. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48288-x>
13. Crénin F. Truncated Weibull Distribution Functions and Moments. *Journal of Productivity Analysis*. 2015;43:133–138. <http://doi.org/10.2139/ssrn.2690255>

Об авторе:

Анатолий Анатольевич Котесов, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), a.kotesov@yandex.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Anatoly A. Kotesov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Operation of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), a.kotesov@yandex.ru

Conflict of Interest Statement: the author does not have any conflict of interest.

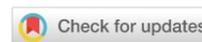
The author has read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 14.08.2024

Поступила после рецензирования / Revised 10.09.2024

Принята к публикации / Accepted 17.09.2024

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 621.793

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-47-53>

Микродуговое молибденирование стали с использованием молибдата аммония

М.С. Степанов , Ю.М. Домбровский 

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ stepanovms@yandex.ru

EDN: AFQAPG

Аннотация

Введение. Одной из актуальных проблем современного материаловедения является повышение надежности и долговечности инструмента и деталей машин. Для ее решения целесообразно создание высокотвердых покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками. Как правило, для этого используется высокоэнергетическое воздействие на материал. Однако оно требует использования сложного и дорогостоящего оборудования и не получило широкого распространения. Поэтому в настоящее время проблема создания таких покрытий остается актуальной. Эффективным и недорогим методом создания таких покрытий на стальных изделиях является микродуговое поверхностное легирование из обмазки, предварительно наносимой на поверхность упрочняемых изделий. Целью работы являлась оценка возможности создания таких покрытий с помощью диффузионного молибденирования с использованием молибдата аммония в качестве источника диффузанта.

Материалы и методы. Для достижения цели исследования использовали термодинамический анализ химических реакций, протекание которых возможно в температурном диапазоне процесса микродугового нагрева. Для каждой реакции рассчитывали изменение стандартной энергии Гиббса, что позволило определить возможность и диапазон их протекания. Экспериментальное исследование процесса микродугового молибденирования с использованием молибдата аммония выполнено с использованием лабораторной установки на образцах из стали 20; поверхностная плотность тока составляла 0,53 А/см²; продолжительность процесса — 6 минут.

Результаты исследования. Рассчитаны зависимости изменения свободной энергии Гиббса для химических реакций, протекание которых возможно при термическом разложении молибдата аммония. Экспериментально установлено формирование молибденированного покрытия и определена концентрация молибдена в диффузионном слое. На поверхности образцов обнаружены карбиды Mo₂C и Fe₃Mo₃C. Определена зависимость глубины покрытия от содержания диффузанта в обмазке и от ее толщины.

Обсуждение и заключение. Анализ полученных уравнений показал возможность образования атомарного молибдена прямым восстановлением или через промежуточное образование диоксида. Результаты экспериментальных исследований подтвердили образование диффузионного покрытия на стали после микродугового насыщения молибденом. Глубина такого покрытия зависит от содержания диффузанта в обмазке и от ее толщины. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов микродугового молибденирования стальных изделий.

Ключевые слова: микродуговое поверхностное легирование, диффузионное насыщение молибденом, формирование высокотвердого покрытия

Благодарности. Авторы благодарят рецензентов за внимание, проявленное к публикации и ценные замечания, которые позволили улучшить ее содержание.

Для цитирования. Степанов М.С., Домбровский Ю.М. Микродуговое молибденирование стали с использованием молибдата аммония. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(4):47–53. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-47-53>

Microarc Molybdenum Steel Saturation Using Ammonium Molybdate

Makar S. Stepanov  , Yuriy M. Dombrovskii 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 stepanovms@yandex.ru

Abstract

Introduction. One of the most significant challenges in modern materials science is increasing the reliability and durability of tools and machine parts. To address this issue, it is essential to develop high-hardness coatings with enhanced properties. Typically, high-energy techniques are employed for this purpose, but they require complex and costly equipment, limiting their widespread use. Therefore, problem of creating such coatings remains a significant challenge. An effective and affordable approach to creating these coatings on steel products is microarc surface alloying from a coating pre-applied to the surface of the hardened products. The aim of the work was to assess the potential of diffusion molybdenum saturation for creating such coatings. Ammonium molybdate was used as the diffusant agent.

Materials and Methods. To achieve the aim of this study, we used thermodynamic analysis of chemical reactions that can occur within the temperature range of the microarc heating process. For each reaction, we calculated the change in standard Gibbs energy, which allowed us to determine the feasibility and range of occurrence. An experimental study of the microarc molybdenum saturation process was conducted using ammonium molybdate on steel 20 samples using a laboratory setup. The surface current density was set at 0.53 A/cm², and the duration of the process was 6 minutes.

Results. The Gibbs free energy changes for chemical reactions that can occur during the thermal decomposition of ammonium molybdate have been calculated. An experimental study has shown the formation of a molybdenum coating, and the concentration of molybdenum in the diffusion layer has been determined. On the surface of the samples, carbides Mo₂C and Fe₃Mo₃C have been found. The dependence of the coating depth on the content of diffusant in the coating and its thickness has been determined.

Discussion and Conclusion. Thermodynamic analysis has shown that atomic molybdenum can be formed through direct reduction or with the intermediate formation of molybdenum dioxide. The research has confirmed the formation of a diffusion coating on steel after microarc saturation with molybdenum, and the depth of this coating depends on the amount of diffusant in the coating and its thickness. These findings will be used to develop technological processes for microarc molybdenum plating of steel products.

Keywords: microarc surface alloying, diffusion molybdenum saturation, formation of a high-hardness coating

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial team and the reviewers for their attention and valuable recommendations, which made it possible to improve the quality of the paper.

For citation. Stepanov MS, Dombrovskii YuM. Microarc Molybdenum Steel Saturation Using Ammonium Molybdate. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;8(4):47–53. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-47-53>

Введение. Формирование высокотвердых покрытий на стальных изделиях является одной из важнейших задач материаловедения [1], поэтому в настоящее время предложены методы получения покрытий за счет высококонцентрированного потока энергии на материал: лазерной обработки [2], плазменного нагрева [3], электрохимико-термической обработки [4], нагрева в электролите [5], микродугового оксидирования [6], ионно-плазменной обработки [7], электроискрового легирования [8], а также комбинаций этих методов [9]. Однако эти методы не получили широкого распространения из-за высокой энергоемкости и необходимости использования сложного и дорогостоящего оборудования. Поэтому проблема создания упрочняющих покрытий на стальных изделиях остаётся актуальной.

Эффективным методом поверхностного упрочнения является микродуговое легирование, при осуществлении которого изделия погружаются в металлический контейнер, заполненный угольным порошком с дальнейшим пропуском через контейнер электрического тока. Между изделием и порошковой средой возникают микродуговые разряды, в результате чего протекает диффузионное насыщение поверхности стали углеродом и легирующим элементом [10]. Наблюдается ускорение диффузионных процессов и значительное сокращение продолжительности насыщения по сравнению с ранее известными методами, а при его реализации не требуется применения сложного и энергоёмкого оборудования [11]. Данный метод может использоваться для создания карбидных покрытий, а источником легирующих элементов является обмазка, наносимая на обрабатываемую поверхность [12]. Возможно создание диффузионных покрытий в результате поверхностного насыщения молибденом, в качестве источника которого в составе обмазки следует использовать недорогие и распространенные его соединения. Например, может использоваться недорогое комплексное микроэлементное удобрение — молибдат аммония (NH₄)₂MoO₄. Возможность его применения в составе обмазки можно определить только с помощью термодинамического анализа.

Цель исследования — определение возможности и условий применения молибдата аммония при поверхностном молибденировании стали.

Материалы и методы. Для достижения цели исследования использовали метод термодинамического анализа, в соответствии с которым изменение свободной энергии химической реакции представляется в виде суммы энтальпий образования веществ, получаемых в результате ее протекания, минус сумму энтальпий образования первоначальных веществ [13]. Возможность протекания реакции определяли в диапазоне температуры, при котором изменение энергии Гиббса имеет отрицательное значение, при этом учитывали зависимость теплоемкости от температуры [14]:

$$C_p = a_1 + b_1 \cdot T + d_1 \cdot T^{-2}. \quad (1)$$

Энергию Гиббса ΔG_T^0 рассчитывали как:

$$\frac{\Delta G_T^0}{T} = \frac{\Delta H_{298}^0}{T} - \Delta S_{298}^0 - (M_0 \Delta a + M_1 \Delta b + M_{-2} \Delta d), \quad (1)$$

где $\Delta a, \Delta b, \Delta d$ — алгебраические суммы коэффициентов a_i, b_i и d_i в формуле (1); M_0, M_1 и M_{-2} — интегральные функции [13].

Исходные данные [15] для расчётов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для термодинамических расчётов

Вещество	$-\Delta H_{298}^0$, кДж/моль	S_{298}^0 , Дж/мольК	C_{p298} , Дж/мольК	$C_p = a_1 + b_1 T + d_1 T^{-2}$, Дж/моль		
				a	$b \cdot 10^3$	$d \cdot 10^{-5}$
C	0,000	5,744	8,540	17,170	4,270	-8,790
CO	110,600	197,680	29,130	28,430	4,100	-0,460
CO ₂	393,777	213,820	37,140	44,170	9,040	-8,540
H ₂	0,000	130,520	28,830	27,300	3,270	0,500
H ₂ O	241,990	188,850	33,599	30,020	10,720	0,330
CH ₄	74,850	186,190	35,710	14,320	74,660	-17,430
Mo	0,000	28,600	24,100	21,670	6,950	–
MoO ₂	589,100	46,280	55,980	67,800	12,600	-13,000
MoO ₃	745,200	77,740	75,020	56,900	56,500	–
NH ₃	45,940	192,660	35,630	29,800	25,480	-1,670
N ₂	0,000	199,900	29,100	27,880	4,270	–
NO ₂	33,500	240,200	37,500	42,160	9,550	-6,990

Для экспериментальной проверки результатов расчетов проводили микродуговое легирование стальных цилиндрических образцов диаметром 12 мм и длиной 35 мм. Для изготовления обмазки использовали электропроводный гель с добавлением порошка молибдата аммония.

Микродуговое легирование выполняли по методике [10], поверхностная плотность электрического тока составляла 0,53 А/см², продолжительность нагрева — 6 мин. После обработки образцы подвергали шлифовке и полировке по стандартной методике с последующим травлением реактивом Ржешотарского. Для металловедческих исследований использовали микроскоп Neophot-21, дифрактометр ARL X'TRA-435 в Cu-Kα излучении, электронный микроскоп ZEISS CrossBeam 340 с микроанализатором Oxford Instruments X-max 80.

Результаты исследования. При нагревании молибдата аммония происходит реакция:



При термическом разложении угольного порошка выделяются газообразные вещества [16], которые могут являться восстановителями атомарного молибдена по схемам $MoO_3 \rightarrow Mo$ или $MoO_3 \rightarrow MoO_2 \rightarrow Mo$.

Химические реакции и результаты расчетов по вышеописанной методике представлены в таблице 2. Для каждой реакции рассчитана зависимость $\Delta G_T^0(T)$, определена возможность (Да/Нет) и температурный диапазон протекания в процессе микродугового нагрева.

Результаты расчетов и возможность протекания химических реакций в процессе микродугового нагрева

№	Реакция	Зависимость $\Delta G_T^0(T)$	Возможность протекания
1	$\text{MoO}_3 + 3\text{C} = \text{Mo} + 3\text{CO}$	$383,100 - 0,490 \cdot T$	Да, > 509 °С
2	$2\text{MoO}_3 + 3\text{C} = 2\text{Mo} + 3\text{CO}_2$	$130,600 - 0,230 \cdot T$	Да, > 295 °С
3	$\text{MoO}_3 + \text{C} = \text{MoO}_2 + \text{CO}$	$33,500 - 0,147 \cdot T$	Да, весь диапазон
4	$2\text{MoO}_3 + \text{C} = 2\text{MoO}_2 + \text{CO}_2$	$-41,550 - 0,061 \cdot T$	Да, весь диапазон
5	$\text{MoO}_3 + 3\text{CO} = \text{Mo} + 3\text{CO}_2$	$-103,550 + 0,008 \cdot T$	Нет
6	$\text{MoO}_3 + \text{CO} = \text{MoO}_2 + \text{CO}_2$	$-134,760 + 0,026 \cdot T$	Нет
7	$\text{MoO}_3 + 3\text{H}_2 = \text{Mo} + 3\text{H}_2\text{O}$	$-24\,830,000 - 61,180 \cdot T$	Да, весь диапазон
8	$4\text{MoO}_3 + 3\text{CH}_4 = 4\text{Mo} + 3\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	$463\,800,000 - 903,200 \cdot T$	Да, > 240 °С
9	$4\text{MoO}_3 + \text{CH}_4 = 4\text{MoO}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$-221\,800,000 - 238,200 \cdot T$	Да, весь диапазон
10	$3\text{MoO}_3 + \text{CH}_4 = 3\text{MoO}_2 + \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$	$-863\,000,000 - 263,800 \cdot T$	Да, весь диапазон
11	$7\text{MoO}_3 + 2\text{NH}_3 = 7\text{MoO}_2 + 2\text{NO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	$-258\,000,000 + 554,200 \cdot T$	Да, < 190 °С
12	$3\text{MoO}_3 + 2\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{MoO}_2 + \text{N}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	$-446\,900,000 + 143,800 \cdot T$	Да, весь диапазон
13	$\text{MoO}_2 + \text{C} = \text{Mo} + \text{CO}_2$	$181,070 - 0,169 \cdot T$	Да, > 799 °С
14	$\text{MoO}_2 + 2\text{C} = \text{Mo} + 2\text{CO}$	$350,500 - 0,353 \cdot T$	Да, > 720 °С
15	$\text{MoO}_2 + 2\text{CO} = \text{Mo} + 2\text{CO}_2$	$76,050 - 0,094 \cdot T$	Да, > 536 °С
16	$\text{MoO}_2 + 2\text{H}_2 = \text{Mo} + 2\text{H}_2\text{O}$	$77\,612,000 - 56,472 \cdot T$	Да, > 1100 °С

Таким образом, термодинамическим анализом подтверждена возможность использования молибдата аммония в составе обмазки при молибденировании. Реакции 1, 2, 7, 8 обеспечивают прямое восстановление, реакции 3, 4, 9, 10, 11, 12 — восстановление с промежуточной стадией образования диоксида и дальнейшим протеканием реакций 13, 14, 15, 16.

Для экспериментальной проверки полученных результатов выполнили микродуговое поверхностное легирование образцов с использованием обмазки, содержащей молибдат аммония. Анализ образцов подтвердил формирование на их поверхности слоя α -твердого раствора молибдена, далее — зона с повышенным содержанием углерода и исходная структура (рис. 1).

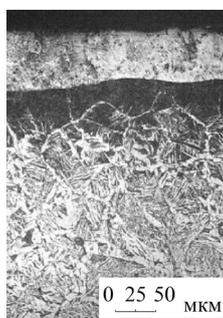


Рис. 1. Микроструктура поверхности стали 20 после насыщения молибденом

Содержание молибдена в стали по глубине слоя представлено на рис. 2.

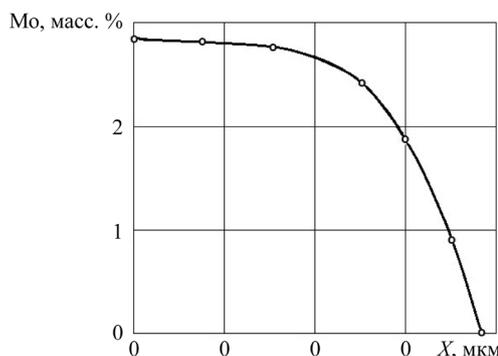


Рис. 2. Распределение Mo по глубине диффузионного слоя.

Содержание порошка диффузанта в обмазке 50 %, ее толщина — 1,0 мм

Рентгеновским фазовым анализом на поверхности образцов установлено образование карбидов Mo_2C и $\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C}$ (рис. 3).

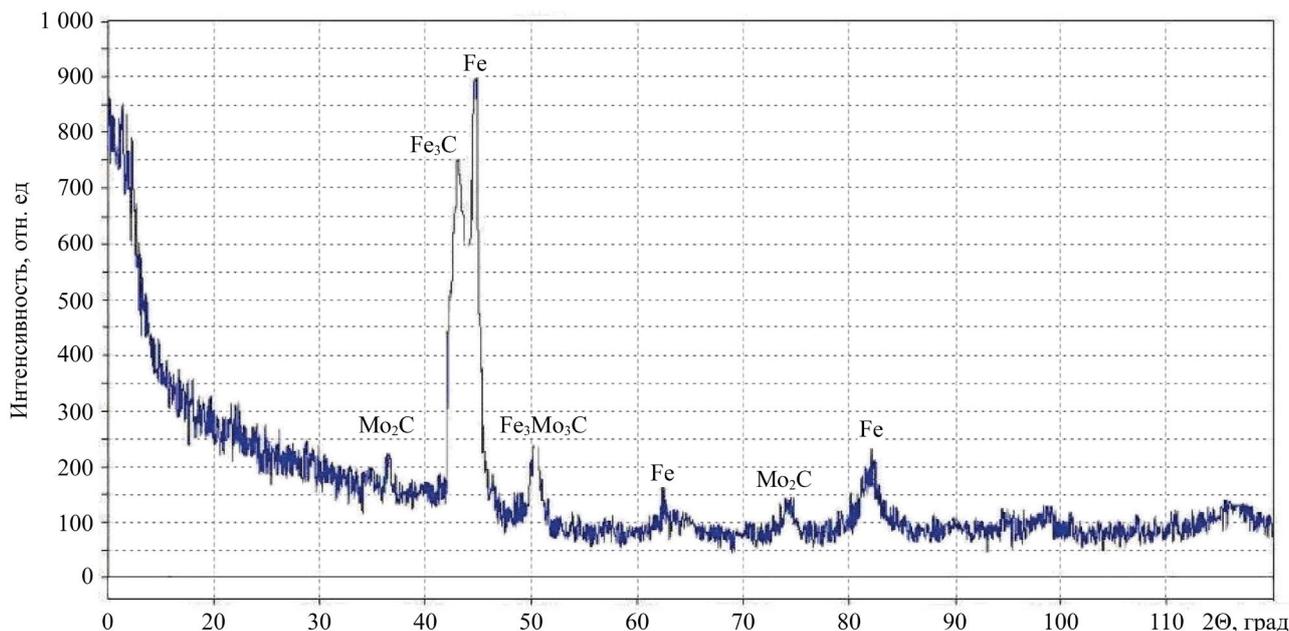


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма поверхности

На рис. 4 представлена зависимость толщины покрытия от количества порошка диффузанта в обмазке.

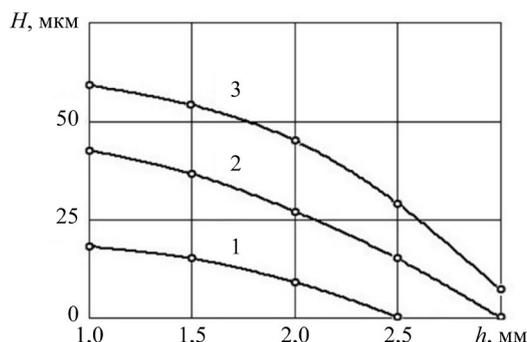


Рис. 4. Зависимость глубины H диффузионного слоя от толщины h слоя обмазки и содержания порошка диффузанта: зависимости 1, 2, 3 соответствуют 10; 30; 50 (об. %)

Для достижения наибольшего покрытия содержание диффузанта в обмазке должно составлять 50 об. %, а толщина слоя обмазки на обрабатываемой поверхности — 1 мм.

Обсуждение и заключение. Результаты расчетов показали, что для проведения процесса микродугового молибденирования стали может быть использована обмазка, в состав которой входит порошок молибдата аммония и связующее. В результате микродугового насыщения образуется молибденированное покрытие, состоящее из α -твердого раствора молибдена с включениями карбидов, далее расположена науглероженная зона, переходящая в исходную структуру. Толщины покрытия определяются содержанием диффузанта в обмазке и ее толщиной. Наибольшая толщина покрытия (50–55 мкм) получена при содержании диффузанта 50 об. % и толщине обмазки 1 мм. Использование результатов исследования планируется при разработке технологических процессов микродугового молибденирования стальных изделий.

Список литературы / References

1. Mittermeijer EJ, Somers MAJ. (eds). *Thermochemical Surface Engineering of Steels*. Woodhead Publishing; 2015. 827 p.
2. Liexin Wu, Li Meng, Yueyue Wang, Shuhuan Zhang, Wuxia Bai, Taoyuan Ouyang, et al. Effects of Laser Surface Modification on the Adhesion Strength and Fracture Mechanism of Electroless-Plated Coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2022;429:127927. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127927>

3. Zhen Huang, Zi-Xin Guo, Lei Liu, Yuan-Yuan Guo, Jun Chen, Ze Zhang, et al. Structure and Corrosion Behavior of Ultra-Thick Nitrided Layer Produced by Plasma Nitriding of Austenitic Stainless Steel. *Surface and Coatings Technology*. 2021;405:126689. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126689>
4. Czerwinski F. Thermochemical Treatment of Metals. In book: *Heat Treatment – Conventional and Novel Applications*. London: InTechOpen; 2012. 422 p. <https://doi.org/10.5772/51566>
5. Belkin PN, Kusmanov SA. Plasma Electrolytic Carburising of Metals and Alloys. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2021;57(1):19–50. <https://doi.org/10.3103/S1068375521010038>
6. Venugopal A, Rajiv Panda, Sushant Manwatkar, Sreekumar K, Rama Krishna L, Sundararajan G. Effect of Microarc Oxidation Treatment on Localized Corrosion Behavior of AA7075 Aluminum Alloy in 3.5% NaCl Solution. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2012;22(3):700–710. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61234-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61234-X)
7. Nie X, Tsotsos C, Wilson A, Yerokhin AL, Leyland A, Matthews A. Characteristics of a Plasma Electrolytic Nitrocarburising Treatment for Stainless Steels. *Surface and Coatings Technology*. 2001;139(2–3):135–142. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01025-8](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01025-8)
8. Wang RJ, Qian YY, Liu J. Structural and Interfacial Analysis of WC92–Co8 Coating Deposited on Titanium Alloy by Electrospark Deposition. *Applied Surface Science*. 2024;228(1–4):405–409. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.01.043>
9. Александров В.А., Петрова Л.Г., Сергеева А.С., Александров В.Д., Ахметжанова Э.У. Комбинированные плазменные способы химико-термической обработки для создания модифицированных покрытий на инструменте. *СТИН*. 2019;(3):13–16.
Aleksandrov VA, Petrova LG, Sergeeva AS, Aleksandrov VD, Akhmetzhanova EU. Combined Plasma Methods of Chemical and Thermal Treatment to Create Modified Coatings on the Instrument. *STIN*. 2019;(3):13–16. (In Russ.)
10. Степанов М.С., Домбровский Ю.М., Давидян Л.В. Структура, фазовый состав, механические свойства и износостойкость стали после микродугового борованадирования. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2019;62(6):446–451. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-6-446-451>
Stepanov MS, Dombrovskii YuM, Davidyan LV. Structure, Phase Composition, Mechanical Properties and Wear Resistance of Steel after Microarc Boriding and Vanadation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(6):446–451. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-6-446-451>
11. Степанов М.С., Домбровский Ю.М. Создание покрытий карбидного типа при микродуговом термодиффузионном вольфрамирании стали. *Материаловедение*. 2018;(1):20–25.
Stepanov MS, Dombrovskiy YuM. Deposition of Carbide-Type Coatings during Micro-Arc Thermomdiffusion Tungstening of Steel. *Material Science*. 2018;(1):20–25. (In Russ.)
12. Stepanov M.S., Dombrovskii Yu.M., Pustovoi V.N. Diffusion Saturation of Carbon Steel under Microarc Heating. *Metal Science and Heat Treatment*. 2017;59(1–2):55–59. <https://doi.org/10.1007/s11041-017-0102-4>
13. Пономарев С.В., Мищенко С., Дивин А., Вертоградский В., Чуриков А. *Теоретические и практические основы теплофизических измерений*. Пономарев С.В. (ред.). Москва: ФИЗМАТЛИТ; 2008. 408 с.
Ponomarev SV, Mishchenko S, Divin A, Vertogradskii V, Churikov A. *Theoretical and Practical Foundations of Thermophysical Measurements*. Ponomarev SV. (ed.). Moscow: FIZMATLIT; 2008. 408 p. (In Russ.)
14. Исаев С.И., Кожин И.А., Кофанов В.И., Леонтьев А.И., Миронов Б.М., Никитин В.М. и др. *Теория теплообмена*. Леонтьев А.И. (ред.). Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2018. 462 с.
Isaev SI, Kozhinov IA, Kofanov VI, Leontev AI, Mironov BM, Nikitin VM, et al. *The Theory of Heat and Mass Transfer*. Leontev AI (ed.). Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University; 2018. 462 p. (In Russ.)
15. Лидин Р.А. (ред.), Молочко В.А., Андреева Л.Л. *Константы неорганических веществ: справочник*. 3-е изд., стер. Москва: Дрофа; 2006. 685 с.
Lidin RA (ed.), Molochko VA, Andreeva LL. *Constants of Inorganic Substances: Reference Book*. 3d ed., ster. Moscow: Drofa; 2006. 685 p. (In Russ.)
16. Гюльмалиев А.М., Головин Г.С., Гладун Т.Г. *Теоретические основы химии угля*. Москва: МГТУ; 2003. 556 с.
Gyulmaliev AM, Golovin G., Gladun TG. *Theoretical Foundations of Coal Chemistry*. Moscow: MSUH; 2003. 556 p. (In Russ.)

Об авторах:

Макар Степанович Степанов, доктор технических наук, профессор кафедры управления качеством Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), stepanovms@yandex.ru

Юрий Маркович Домбровский, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), yurimd@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

М.С. Степанов: сбор исходных данных для термодинамических расчетов, проведение термодинамических расчетов, анализ полученных результатов.

Ю.М. Домбровский: экспериментальные исследования, определение технологических параметров процесса поверхностного легирования, анализ полученных результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Makar S. Stepanov, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Quality Management Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), stepanovms@yandex.ru

Yuriy M. Dombrovskii, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Materials Science and Technologies of Metals Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), yurimd@mail.ru

Claimed Contributorship:

MS Stepanov: collection of initial data for thermodynamic calculations, carrying out thermodynamic calculations, analysis of the results obtained.

YuM Dombrovsky: experimental studies, determination of technological parameters of the surface alloying process, analysis of the results obtained.

Conflict of Interest Statement: the authors do not have any conflict of interest.

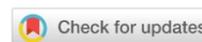
All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 29.08.2024

Поступила после рецензирования / Revised 16.09.2024

Принята к публикации / Accepted 25.09.2024

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 669.1:66.04

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-54-61>

Формирование эпюры остаточных напряжений после закалки в магнитном поле

В.Н. Пустовойт , Ю.В. Долгачев  

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

 yuridol@mail.ru

EDN: AKVGXS

Аннотация

Введение. После закалки в изделии имеются остаточные напряжения: структурные и тепловые. Величина суммарных напряжений в готовой детали определяет её трещиностойкость под действием эксплуатационных нагрузок. Закалка в постоянном магнитном поле оказывает влияние на процесс зарождения мартенсита, кинетику мартенситного превращения, а также процессы распада мартенсита. В настоящее время отсутствуют данные о том, как указанные изменения в структуре влияют на эпюру напряжений в термически обработанном изделии. Цель работы — исследование влияния постоянного магнитного поля при закалке железоуглеродистых сплавов на распределение напряжений по сечению деталей.

Материалы и методы. Исследования проводили на образцах технического железа, стали 45 и ферритного ковкого чугуна. Применялись цилиндрические образцы диаметром 16 мм и кольцевые образцы с наружным диаметром 20 и 55 мм. Образцы нагревали в электропечи или индукционным нагревом токами высокой частоты от лампового генератора ЛЗ-13. Закалку проводили в воде или минеральном масле. Постоянное магнитное поле напряжённостью от 768 до 1600 кА/м при закалке создавалось в зазоре электромагнита ФЛ-1. Определение остаточных напряжений осуществлялось по оригинальной методике В.А. Блиновского, основанной на измерении деформации изгиба в полых телах вращения.

Результаты исследования. Получено изменение температуры на поверхности, в сердцевине и перепад температур по сечению цилиндрического образца при охлаждении в воде без поля и в магнитном поле. Изучено распределение напряжений по сечению после закалки в поле и без поля технического железа в спокойной воде. Исследовано распределение напряжений по сечению после закалки в поле и без поля в спокойной воде, а также при спреерном охлаждении с различной скоростью стали 45 и ферритного ковкого чугуна.

Обсуждение и заключение. Полученные расчетные и экспериментальные данные позволили оценить возможные изменения под действием магнитного поля эпюр остаточных напряжений после заварки с объемным и поверхностным нагревом. Исследование кинетики охлаждения в воде под действием магнитного поля показало, что перепад температуры по сечению оставался практически неизменным, но наблюдалось снижение охлаждающей способности воды, что способствовало снижению уровня тепловых напряжений. Закалка в магнитном поле способствовала снижению остаточных напряжений в железоуглеродистых сплавах. Изменение распределения суммарных остаточных напряжений при магнитном отпуске обусловлено изменением их структурной составляющей. Магнитное поле оказывает влияние на распределение структурных, тепловых и суммарных остаточных напряжений. Причиной наблюдаемых эффектов является изменение под действием магнитного поля структурного состояния стали и чугуна и охлаждающей способности закалочных жидкостей на водной основе. Снижение уровня остаточных напряжений при термической обработке в магнитном поле уменьшает вероятность хрупкого разрушения и трещинообразования, приводит к снижению деформаций и коробления закаленных сталей, создает благоприятные условия для работы деталей в условиях знакопеременных нагрузок и абразивного трения.

Ключевые слова: закалка, сталь, чугун, остаточные напряжения, магнитное поле, структурные напряжения, тепловые напряжения

Благодарности. Авторы благодарят редакцию журнала за ценные замечания и сотрудников кафедры «Материаловедение и технологии металлов» ДГТУ: заведующего кафедрой М.С. Егорова, профессора Ю.М. Домбровского и доцента С.А. Гришина за помощь в получении и обсуждении результатов

Для цитирования. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. Формирование эпюры остаточных напряжений после закалки в магнитном поле. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;8(4):54–61. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-54-61>

Original Empirical Research

Formation of Residual Stress Diagram after Quenching in a Magnetic Field

Viktor N. Pustovoit , Yuri V. Dolgachev  

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

 yuridol@mail.ru

Abstract

Introduction. After hardening, a product has residual stresses: structural and thermal. The magnitude of the total stresses in the finished part determines its crack resistance under the influence of operational loads. Quenching in a constant magnetic field affects the process of martensite nucleation, and the kinetics of martensite transformation, as well as the processes of martensite decomposition. However, there is currently no data available on how these changes in structure affect the stress diagram in a heat-treated product. The aim of this study was to investigate the influence of a constant magnetic field during hardening of iron-carbon alloys on the stress distribution across the cross-sectional area of parts.

Materials and Methods. The studies were conducted on samples of technical iron, steel 45, and ferritic malleable cast iron. Cylindrical samples with a diameter of 16 mm and ring samples with an outer diameter of 20 and 55 mm were used. The samples were heated in an electric furnace or an induction heating lamp generator LZ-13, and quenched in water or mineral oil. A constant magnetic field with strength of 768 to 1600 kA/m during hardening was created in the bore of a FL-1 electromagnet. Residual stresses were determined using the original method developed by V.A. Blinovskii based on measuring bending deformations in hollow bodies of revolution.

Results. The change in temperature on the surface, in the core, and the temperature difference across the cross-section of a cylindrical sample during cooling in water with and without a magnetic field was obtained. The distribution of stresses over the cross-section after quenching with and without a field for industrial iron in still water was studied. The stress distribution over the cross-section was studied after quenching in a field and without a field in calm water, as well as during spray cooling of steel 45 and ferritic ductile cast iron at different rates.

Discussion and Conclusion. The obtained calculated and experimental data allowed us to evaluate possible changes in the residual stress diagrams under the influence of a magnetic field after quenching with volumetric and surface heating. A study of the kinetics of cooling in water under the influence of a magnetic field showed that the temperature difference across the cross-section remained practically unchanged, but there was a decrease in the cooling capacity of the water, which contributed to a reduction in the level of thermal stress. Hardening in a magnetic field led to a reduction of residual stresses in iron-carbon alloys. The change in the distribution of total residual stresses during magnetic tempering was due to a change in their structural component. The magnetic field influenced the distribution of structural, thermal and total residual stresses. The reason for the observed effects was the change in the structural state of steel and cast iron and the cooling ability of water-based quenching liquids under the influence of a magnetic field. The reduction of the level of residual stresses during heat treatment in a magnetic field reduced the likelihood of brittle fracture and cracking, led to a decrease in deformation and warping of hardened steels, and created favorable conditions for the operation of parts under conditions of alternating loads and abrasive friction.

Keywords: hardening, steel, cast iron, residual stresses, magnetic field, structural stresses, thermal stresses

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to the Editorial team of the Journal for their valuable comments and to the staff of the Department of Materials Science and Technology of Metals at Don State Technical University, particularly Head of the Department M.S. Egorov, Professor Yu.M. Dombrovsky and Associate Professor S.A. Grishin, for their assistance in obtaining and reviewing the results.

For citation. Pustovoit VN, Dolgachev YuV. Formation of Residual Stress Diagram after Quenching in a Magnetic Field. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;8(4):54–61. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-54-61>

Введение. Имеющиеся после закалки остаточные напряжения принято разделять на структурные [1, 2] и тепловые [3, 4]. Тепловые напряжения возникают из-за одновременного влияния двух факторов: изменения удельного объёма металла с температурой и наличия градиента температур в изделии подвергающемся термической обработке. Напряжения структурного характера обусловлены дилатационными эффектами от фазовых переходов, особенно при протекании фазовых превращений неоднородно по объёму детали. Таким образом результирующие напряжения в обрабатываемом изделии формируются сложением напряжений структурного и теплового характера. Известно [5, 6], что главным фактором, определяющим величину значений напряжений после закалки, оказывается момент смены знака тепловых напряжений относительно момента возникновения напряжений структурного характера. Появление структурных напряжений после смены знака тепловых напряжений приводит к увеличению результирующих напряжений в изделии. Соответственно возникновение структурных напряжений до изменения знака тепловых напряжений понижает суммарные напряжения. Величина суммарных напряжений в готовой детали определяет надёжность машиностроительной продукции в процессе эксплуатации [7, 8]. Влияние постоянного магнитного поля в процессе закалки сталей и чугунов проявляется в процессе зарождения мартенсита, изменении кинетики мартенситного превращения, а также в изменении отпусковых процессов, протекающих непосредственно при закалочном охлаждении. В настоящее время неизвестно, как влияние магнитного поля может сказаться на эпюре остаточных напряжений в термически обработанном изделии. Цель работы — исследование влияния постоянного магнитного поля при закалке железоуглеродистых сплавов на распределение напряжений по сечению деталей.

Материалы и методы. В настоящей работе проводили исследования на образцах технического железа, стали 45 и ферритного ковкого чугуна. Применялись цилиндрические образцы диаметром 16 мм и кольцевые образцы с наружным диаметром 20 и 55 мм. Образцы нагревали в электропечи или индукционным нагревом токами высокой частоты от лампового генератора ЛЗ-13. Закалку проводили в воде или минеральном масле. Постоянное магнитное поле напряжённостью от 768 до 1600 кА/м при закалке создавалось в зазоре электромагнита ФЛ-1.

Определение остаточных напряжений осуществлялось по оригинальной методике, созданной В.А. Блиновским [9]. Методика основана на измерении деформации изгиба в полых телах вращения. Она предусматривала вырез из образца кольцевого сектора и измерение возникающих при этом изменений диаметра. Получаемая деформационная кривая служила исходной информацией для расчёта остаточных напряжений с помощью ЭВМ.

Результаты исследования и их обсуждение. При закалке стали температурный градиент, приводящий к неоднородным изменениям удельного объёма по сечению детали, оказывает влияние на формирование эпюры остаточных напряжений. При большом перепаде температур между поверхностью и сердцевиной в момент прохождения мартенситного превращения (например, при сквозной закалке с охлаждением водой после нагрева в печи) на поверхности сплошного цилиндра возникают сжимающие тангенциальные и осевые напряжения. Наоборот, закалка в масле, когда мала разница температур между сердцевиной и поверхностью в момент прохождения мартенситного превращения, приводит к возникновению на поверхности растягивающих напряжений. При этом формирование эпюры напряжений происходит в следующей последовательности. Быстрое охлаждение на поверхности приводит к уменьшению объёма, однако внутри сохраняется высокая температура, что противодействует уменьшению объёма и приводит к возникновению растягивающих напряжений наружного слоя. При этом до температур $T_{упр}$ (~500–550 °С) возможна пластическая деформация наружных слоёв. При дальнейшем охлаждении пластичность снижается, возрастает σ_T и остаётся возможность только для упругих деформаций, что приводит к росту растягивающих напряжений. Их рост продолжается до момента охлаждения внутренних слоёв, что смещает максимумы растягивающих напряжений к центру и несколько снижает поверхностные растягивающие напряжения. При достаточной глубине прогрева (практически более 2 мм) сокращение в объёме центральных слоёв приводит не только к полному устранению начальных растягивающих напряжений, но и к появлению на поверхности сжимающих напряжений, сохраняющихся после окончания охлаждения.

Когда поверхностные слои охлаждаются до точки M_n , то процесс закалочного превращения приводит к увеличению объёма. При этом внутренние слои, не испытывающие закалки, препятствуют этому увеличению, что формирует во внутренних слоях напряжения растяжения, а в поверхностном — сжатия. С перемещением фронта закалки от поверхности сжимающие напряжения уменьшаются, а их максимум сдвигается к центру. В результате после закалки напряжения на поверхности могут иметь различный знак (хотя могут остаться неизменными). Величина сжимающих напряжений в поверхностном слое растёт с уменьшением глубины закаленного слоя.

На рис. 1 приведены результаты исследования кинетики охлаждения в воде образца диаметром 16 мм из армкожелеза. Как видно, в условиях действия магнитного поля перепад температуры по сечению образцов остаётся практически неизменным, однако временная зависимость Δt смещается в сторону больших длительностей охлаждения. Это происходит в результате снижения охлаждающей способности воды в магнитном поле [10, 11] и способствует

более интенсивной релаксации напряжений путем пластической деформации, в результате чего наблюдается снижение уровня тепловых напряжений (рис. 2). Следовательно, магнитное поле, действующее при закалке, влияет на формирование как структурной, так и тепловой составляющей остаточных напряжений.

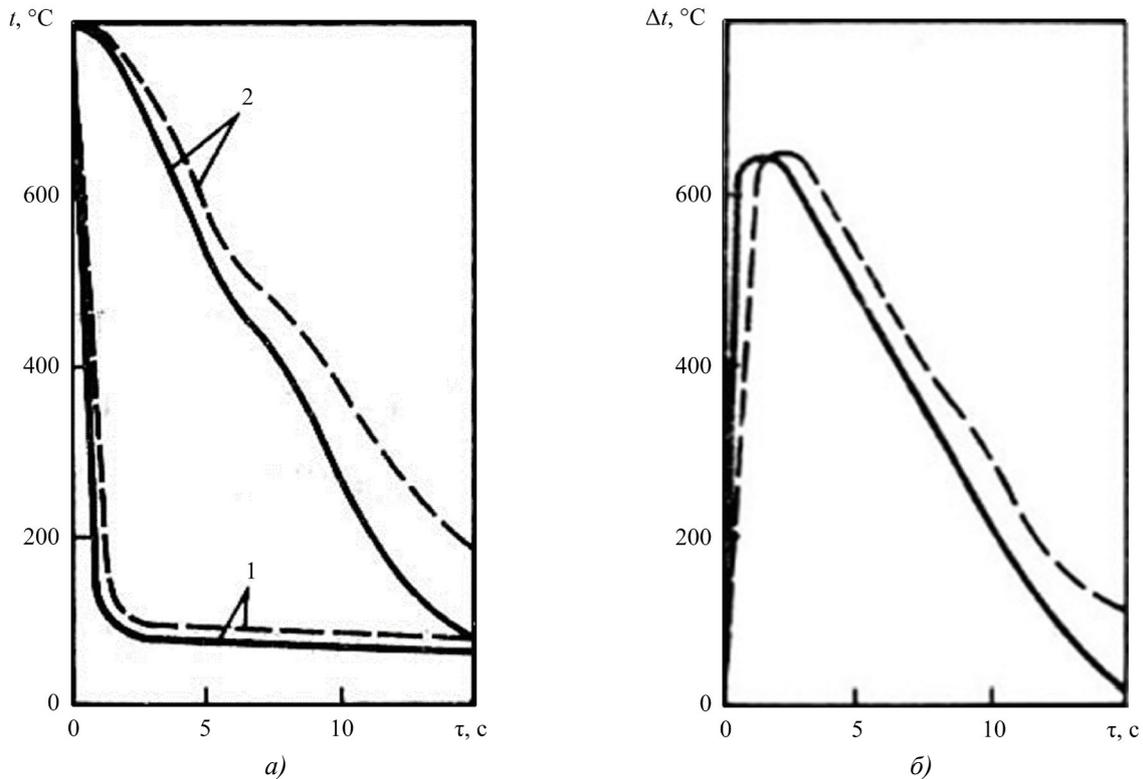


Рис. 1. Температурные изменения в цилиндрическом образце при охлаждении в воде: сплошная линия — без поля; штриховая линия — в магнитном поле напряженностью 1,6 МА/м; а — на поверхности 1 и в сердцевине 2; б — перепад по сечению

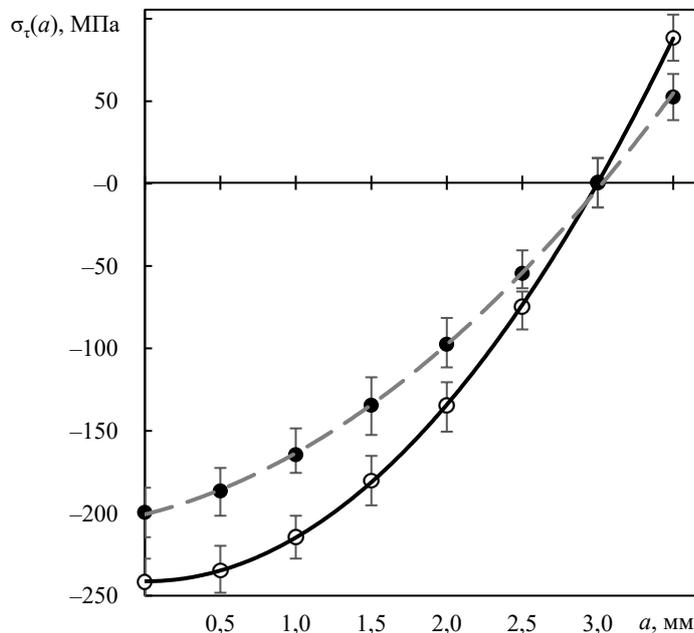


Рис. 2. Распределение напряжений по сечению после закалки технического железа от 800 °С в спокойной воде: сплошная линия — без поля; штриховая линия — в магнитном поле напряженностью 1,4 МА/м

Для оценки влияния магнитного поля на распределение суммарных остаточных напряжений в закаленных и отпущенных сплавах были проведены эксперименты, результаты которых приведены на рис. 3. После обычной закалки кольцевых образцов с наружным диаметром 20 мм на поверхности наблюдались растягивающие напряжения. Это объясняется малым температурным перепадом между периферией и центром во время протекания мартенситного превращения, поэтому преобладающее влияние на распределение суммарных остаточных напряжений оказывает их структурная составляющая. Закалка в магнитном поле способствует снижению оста-

точных напряжений в сплавах как с отрицательным (сталь 45), так и с положительным (ковкий ферритный чугун) изменением объемного эффекта мартенситного превращения. Это указывает на то, что основная причина снижения остаточных напряжений — их интенсивная релаксация в условиях действия магнитного поля. Усиление под влиянием магнитного поля степени распада мартенсита [12] вызывает возрастание этого эффекта.

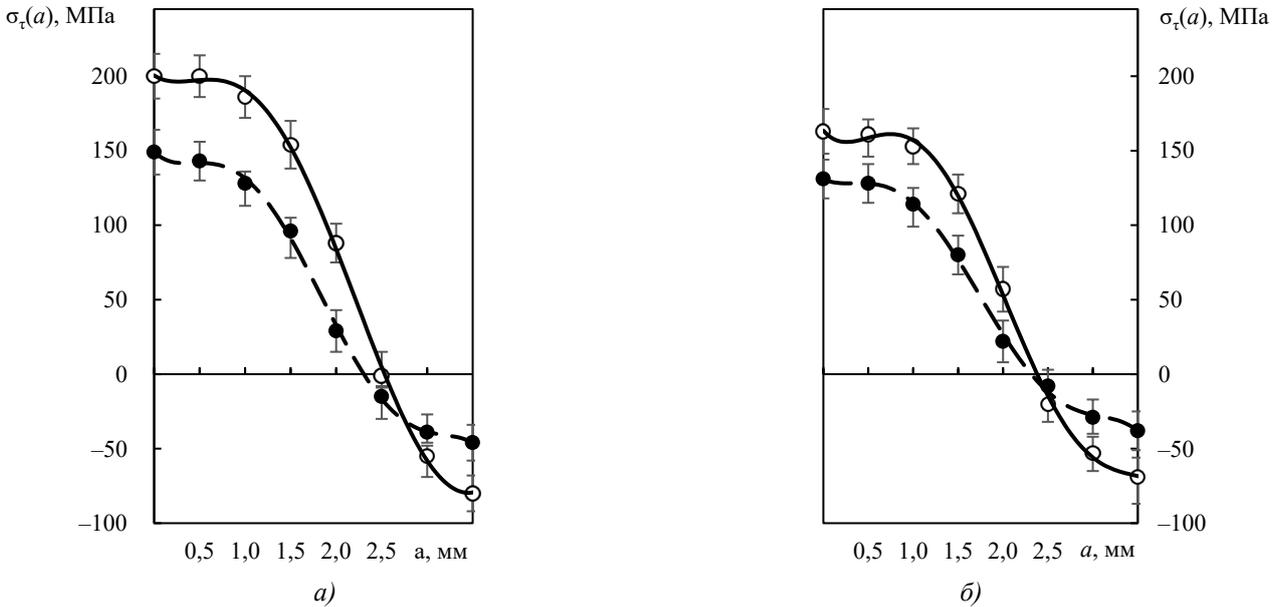


Рис. 3. Распределение напряжений по сечению после закалки от 1000 °С в спокойной воде сплошная линия — без поля; штриховая линия — в магнитном поле напряженностью 1,4 МА/м; а — сталь 45; б — ферритный ковкий чугун

Аналогичные закономерности наблюдались при спреерном охлаждении водой кольцевых образцов диаметром 55 мм (рис. 4). Отличие заключается в том, что воздействие магнитным полем вызывало снижение поверхностных сжимающих напряжений, обусловленных превалирующим влиянием на суммарную эпюру тепловой составляющей остаточных напряжений.

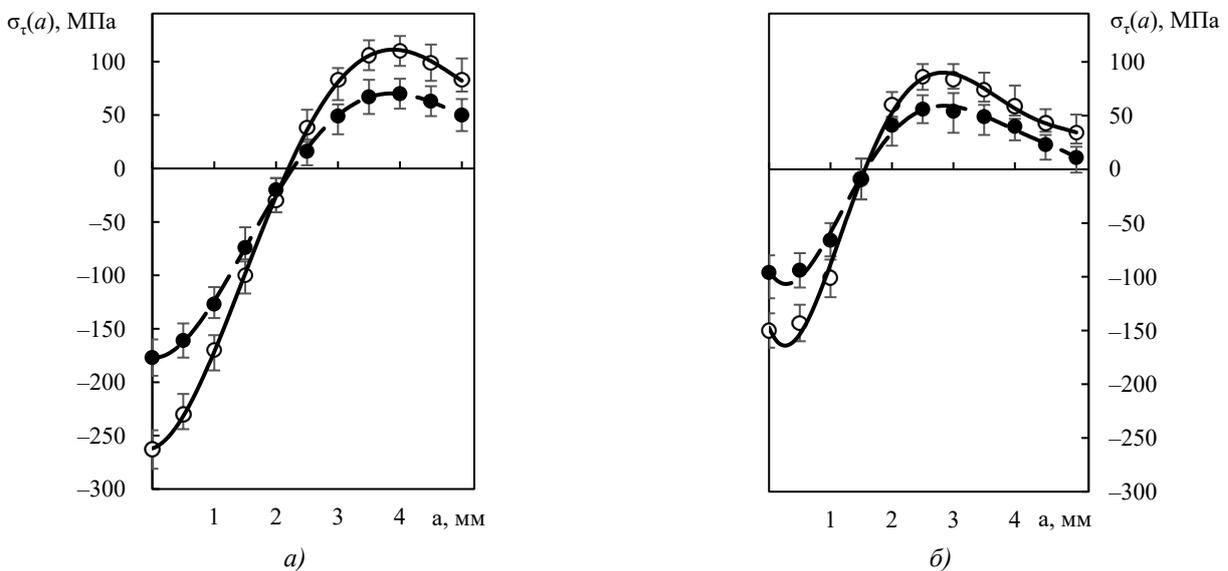


Рис. 4. Распределение напряжений после закалки от 1000 °С со спреерным охлаждением водой $v = 2$ м/с: сплошная линия — без поля; штриховая линия — в магнитном поле напряженностью 768 кА/м; а — сталь 45; б — ферритный ковкий чугун

Увеличение скорости течения воды через спреер до $v = 10$ м/с приводит при обычной закалке к повышению величины поверхностных сжимающих напряжений. При такой скорости течения охлаждающая способность и степень «закалочной» релаксации напряжений под действием магнитного поля изменяются незначительно. Поэтому наблюдаемые изменения обусловлены в основном структурным фактором: усилением степени распада мартенсита в стали 45 и увеличением количества мартенсита в ковком чугуне.

Таблица 1

Влияние охлаждения в магнитном поле после нагрева в печи на уровень остаточных напряжений

Параметры	Безуглеродистые сплавы		Среднеуглеродистые сплавы		Высокоуглеродистые сплавы	
	Охлаждающая среда					
	вода	масло	вода	масло	вода	масло
Напряжения на поверхности сплошного цилиндра после обычного охлаждения	сжимающие	сжимающие, но меньшие, чем при охлаждении в воде	сжимающие	растягивающие	сжимающие	растягивающие
Изменение напряжений на поверхности сплошного цилиндра после охлаждения в магнитном поле в результате: – снижения охлаждающей способности закалочных жидкостей; – увеличения количества мартенсита – усиления процессов распада мартенсита («in statu nascendi»)	уменьшение сжимающих	–	уменьшение сжимающих	–	уменьшение сжимающих	–
	–	–	–	–	увеличение сжимающих	увеличение растягивающих
	–	–	уменьшение сжимающих	уменьшение растягивающих	уменьшение сжимающих	уменьшение растягивающих

Таблица 2

Влияние охлаждения в магнитном поле после индукционного (поверхностного) нагрева на уровень остаточных напряжений

Параметры	Безуглеродистые сплавы		Среднеуглеродистые сплавы		Высокоуглеродистые сплавы	
	Глубина закаленного слоя					
	малая	большая	малая	большая	малая	большая
Напряжения на поверхности сплошного цилиндра после обычного охлаждения	растягивающие	сжимающие	сжимающие		сжимающие	
Изменение напряжений на поверхности сплошного цилиндра после охлаждения в магнитном поле в результате: – снижения охлаждающей способности закалочных жидкостей; – увеличения количества мартенсита; – усиления процессов распада мартенсита («in statu nascendi»)	уменьшение растягивающих	уменьшение сжимающих	уменьшение сжимающих		уменьшение сжимающих	
	–	–	–		увеличение сжимающих	
	–	–	уменьшение сжимающих		уменьшение сжимающих	

Обсуждение и заключение. Полученные расчетные и экспериментальные данные позволили оценить возможные изменения под действием магнитного поля эпюры остаточных напряжений после заковки с объемным (таблица 1) и поверхностным нагревом (таблица 2). Изменение распределения суммарных остаточных напряжений при магнитном отпуске обусловлено изменением их структурной составляющей.

Таким образом, магнитное поле оказывает влияние на распределение структурных (при закалке и отпуске), тепловых (при закалке) и суммарных остаточных напряжений. Причиной наблюдаемых эффектов является изменение под действием магнитного поля структурного состояния стали и чугуна и охлаждающей способности закалочных жидкостей на водной основе. Усиление явлений распада мартенсита вызывает снижение, а увеличение полноты мартенситного превращения — повышение уровня структурных напряжений. Снижение охлаждающей способности закалочных жидкостей на водной основе ведет к уменьшению остаточных напряжений в результате интенсивной релаксации путем пластической деформации. Усиление под действием магнитного поля процессов релаксации в большинстве случаев является основным фактором изменения эпюры остаточных напряжений. В свою очередь, снижение уровня остаточных напряжений при термической обработке в магнитном поле уменьшает вероятность хрупкого разрушения и трещинообразования, приводит к снижению деформаций и коробления закаленных сталей, создает благоприятные условия для работы деталей в условиях знакопеременных нагрузок и абразивного трения.

Список литературы / References

1. Samuel A, Prabhu KN. Residual Stress and Distortion during Quench Hardening of Steels: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022;31(7):5161–5188. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06667-x>
2. Villa M, Niessen F, Somers MAJ. In Situ Investigation of the Evolution of Lattice Strain and Stresses in Austenite and Martensite During Quenching and Tempering of Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2018;49:28–40. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4387-0>
3. Ali Tabatabaiean, Ahmad Reza Ghasemi, Mahmood M. Shokrieh, Bahareh Marzbanrad, Mohammad Baraheni, Mohammad Fotouhi. Residual Stress in Engineering Materials: A Review *Advanced Engineering Materials*. 2022;24(3):2100786. <https://doi.org/10.1002/adem.202100786>
4. Bhadeshia HKDH, Honeycombe RWK. *Steels: Structure, Properties, and Design*. Elsevier; 2024. 550 p. URL: <https://books.google.ru/books?id=U9PKAAAAQBAJ&hl=ru&lr> (accessed: 20.08.2024).
5. Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М., Кузовлева О.В. *Основы формирования состояния высокой деформационной способности металлических систем*. Монография. Тула: Тульский государственный университет; 2018. 382 с.
Gvozdev AE, Zhuravlev GM, Kuzovleva OV. *Fundamentals of the Formation of State of High Deformation Capability of Metal Systems*. Monograph. Tula: Tula State University; 2018. 382 p. (In Russ.)
6. Bhadeshia HKDH, Honeycombe RWK. *Steels: Microstructure and Properties*. Butterworth-Heinemann; 2017. 488 p. URL: <https://books.google.ru/books?id=4Rt5CgAAQBAJ&hl=ru> (accessed: 20.08.2024).
7. Касьянов В.Е., Демченко Д.Б., Косенко Е.Е., Теплякова С.В. Метод оптимизации надежности машин с применением интегрального показателя. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2020;(1):23–31. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-1-23-31>
- Kasyanov VE, Demchenko DB, Kosenko EE, Teplyakova SV. Method of Machine Reliability Optimization Using Integral Indicator. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2020;(1):23–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-1-23-31>
8. Вернези Н.Л. Коэффициент вариации предела текучести металла новых и долгое время эксплуатировавшихся строительных конструкций. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;(3):44–54. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54>
- Vernezi NL. Variation Coefficient of Metal Yield Strength in New and Long-Used Building Structures. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;(3):44–54. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54> (In Russ.)
9. Блиновский В.А. *Исследование превращений, особенностей структуры и остаточных напряжений при закалке и отпуске железоуглеродистых сплавов в магнитном поле*. Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Ростов-на-Дону: РИСХМ; 1978. 28 с.
Blinovskii VA. *Investigation of Transformations, Structural Features and Residual Stresses during Quenching and Tempering of Iron-Carbon Alloys in a Magnetic Field*. Author's abstract. Rostov-on-Don: Rostov-on-Don Institute of Agricultural Engineering; 1978. 28 p. (In Russ.)
10. Pustovoyt VN. Cooling Capacity of Quenching Liquids in Magnetic Field. *Metal Science and Heat Treatment*. 1978;20(2):131–133. <https://doi.org/10.1007/BF00670306>
11. Youkai Wang, Huinan Wei, Zhuangwen Li. Effect of Magnetic Field on the Physical Properties of Water. *Results in Physics*. 2018;8:262–267. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.12.022>
12. Pustovoyt V.N., Dolgachev Yu., Dombrovskii Yu.M. Use of the Superplasticity Phenomenon of Steel for “Internal” Magnetic Correcting a Product. *Solid State Phenomena*. 2017;265:745–749. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.265.745>

Об авторах:

Виктор Николаевич Пустовойт, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), pustovoyt45@gmail.com

Юрий Вячеславович Долгачев, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), yuridol@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

В.Н. Пустовойт: формирование основной концепции, цели и задач исследования, научное руководство, доработка текста, корректировка выводов.

Ю.В. Долгачев: получение экспериментальных данных, расчеты, анализ результатов исследований, подготовка текста, формулирование выводов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Viktor N. Pustovoyt, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Materials Science and Technologies of Metals Department, Don State Technical University, (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), pustovoyt45@gmail.com

Yuri V. Dolgachev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Materials Science and Technologies of Metals Department, Don State Technical University, (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), yuridol@mail.ru

Claimed Contributorship:

VN Pustovoyt: formulation of the basic concept, goals and objectives of the research, academic advising, revision of the text, correction of the conclusions.

YuV Dolgachev: obtaining experimental data, calculations, analysis of the research results, preparation of the text, formulation of the conclusions.

Conflict of Interest Statement: the authors do not have any conflict of interest.

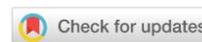
All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 22.08.2024

Поступила после рецензирования / Revised 17.09.2024

Принята к публикации / Accepted 21.09.2024

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 621.785: 669.14.018.29

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-62-71>

Морфология и свойства лазернооблученной композиции «хромовое покрытие – медная подложка»

Г.И. Бровер¹  , Е.Е. Щербакова¹ , Е.Б. Борисенко²¹ Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация² Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук, г. Черноголовка, Российская Федерация✉ brover@mail.ru

EDN: APWCZN

Аннотация

Введение. При проведении импульсной лазерной обработки и модифицирования поверхности цветных сплавов и покрытий на их основе возникает ряд до сих пор не решенных проблем. В частности, не увязаны экстремальные термодиформационные условия лазерной обработки с особенностями структурообразования и формирования свойств в облученных композициях «покрытие – медная подложка». Недостаточно аргументированно обоснован и доказательно проведен металлофизический анализ возможности и причин повышения прочности сцепления покрытий с металлической (медной) подложкой при высокоскоростной лазерной обработке. Для обоснованного выбора технологических параметров режима поверхностного упрочнения изделий из цветных сплавов, а также для получения на их поверхности качественных работоспособных композиционных слоев требуется решение приведенных выше вопросов и задач. Целью данной статьи явилось определение возможности и условий повышения прочности сцепления хромового покрытия с медной подложкой при лазерном облучении композиции.

Материалы и методы. Металлофизические исследования в работе проводились на образцах цветных сплавов системы Cu–Zn с хромовым электрохимическим покрытием толщиной 20 мкм. Композиция «медная подложка — хромовое покрытие» облучалась на установке «Квант-16» с плотностью мощности излучения 70–250 МВт/м². В работе использовались металлографический структурный анализ, сканирующая зондовая микроскопия, дюротметрические исследования.

Результаты исследования. Расчетным путем установлено, что возникающие в лазернооблученных композициях «хромовое покрытие – медная подложка» динамические и термические напряжения составляют около 320 МПа. Металлофизическими исследованиями обнаружено, что в экстремальных термодиформационных условиях лазерной обработки на границе покрытия с медной основой проявляется эффект контактного плавления. В поверхностных облученных слоях медного сплава Л62 обнаружен эффект динамической рекристаллизации. Это выражается в формировании на поверхности сплава с исходным размером зерна 25 мкм мелких зерен размером 4,5–5,0 мкм.

Обсуждение и заключение. Установлено, что прочность сцепления хромового покрытия с подложкой из медных сплавов повышает лазерное облучение с плотностью мощности излучения 150 МВт/м². Это происходит за счет формирования в зоне контакта переходной области глубиной 2–4 мкм со структурой, состоящей из участков взаимно нерастворимых твердых растворов на основе хрома и меди. На основании анализа диаграммы состояния «медь — хром» и модели температурного поля при лазерном облучении хромового покрытия высказано предположение о протекании в переходной зоне от покрытия к медной подложке контактного плавления. Показано, что инициирующее влияние на наблюдаемые процессы структурообразования в зонах лазерного облучения оказывают термострикционные напряжения, расчетные количественные значения которых составили около 320 МПа. Установлено, что такой уровень возникающих в медных сплавах при лазерном облучении напряжений достаточен для пластической деформации и динамической рекристаллизации металла и способствует формированию

мелкозернистой структуры (4,5–5,0 мкм) при исходном размере зерен 25 мкм. Анализ результатов исследований облученных композиций «покрытие – медная подложка» позволил сделать вывод, что они расширяют технологические возможности лазерного метода упрочнения материалов и позволяют гарантированно обеспечивать высокую работоспособность облученных изделий с покрытиями.

Ключевые слова: медные сплавы, покрытия, лазерное облучение, структура, свойства

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их усовершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

Для цитирования. Бровер Г.И., Щербакова Е.Е., Борисенко Е.Б. Морфология и свойства лазернооблученной композиции «хромо-вое покрытие – медная подложка». *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;8(4):62–71. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-62-71>

Original Empirical Research

Morphology and Properties of the Laser-Irradiated Composition “Chrome Coating — Copper Substrate”

Galina I. Brover¹  , Elena E. Shcherbakova¹ , Elena B. Borisenko²

¹ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

² Osipyan Institute of Solid State Physics RAS, Chernogolovka, Russian Federation

 brover@mail.ru

Abstract

Introduction. During pulsed laser processing and modification of the surface of non-ferrous alloys and coatings based on them, several still unresolved issues arise. In particular, the extreme thermal deformation conditions of laser processing are not linked to the peculiarities of structure formation and formation of properties in irradiated “coating — copper substrate” compositions. A metal physical analysis of the possibility and reasons for increasing the adhesion strength of coatings to a metal (copper) substrate during high-speed laser processing is insufficiently substantiated and evidence-based. To make a reasonable choice of technological parameters for the surface hardening mode of non-ferrous alloy products, as well as for obtaining high-quality workable composite layers on their surface, it is necessary to solve the above issues and tasks. The aim of this article is to determine the possibility and conditions for increasing the adhesion strength of a chrome coating to a copper substrate under laser irradiation of the composition.

Materials and Methods. Metal physical studies in the work were carried out on samples of non-ferrous alloys of the Cu–Zn system with a chrome electrochemical coating with a thickness of 20 μm. The “copper substrate — chrome coating” composition was irradiated at a Kvant-16 installation with a radiation power density of 70–250 MW/m². Metallographic structural analysis, scanning probe microscopy, and durometric studies were used in the work.

Results. It has been calculated that the dynamic and thermal stresses arising in the laser-irradiated compositions “chrome coating — copper substrate” were about 320 MPa. Metal physical studies revealed that, in extreme thermal deformation conditions of laser treatment, the effect of contact melting was manifested at the boundary of the coating with the copper base. Dynamic recrystallization occurred in the surface layers of the irradiated L62 copper alloy, resulting in the formation of grains with a size of 4.5–5.0 μm on the surface of the alloy with an initial grain size of 25 μm.

Discussion and Conclusion. It has been found that the adhesion strength of a chrome coating to a copper alloy substrate increased laser irradiation at a radiation power density of 150 MW/m². This was due to the formation of a transition region 2–4 μm deep in the contact zone with a structure consisting of sections of mutually insoluble solid solutions based on chromium and copper. Based on the analysis of the copper — chromium state diagram and the model of the temperature field under laser irradiation of the chromium coating, it was suggested that contact melting occurred in the transition zone from the coating to the copper substrate. It was shown that thermostrictive stresses, the calculated quantitative values of which were about 320 MPa, had an initiating effect on the observed processes of structure formation in the laser irradiation zones. It was found that such a level of stresses arising in copper alloys under laser irradiation was sufficient for plastic deformation and dynamic recrystallization of the metal and contributed to the formation of a fine-grained structure (4.5–5.0 μm) with an initial grain size of 25 μm. An analysis of the results of studies of irradiated compositions “coating — copper substrate” allowed us to conclude that they expanded the technological capabilities of the laser method of hardening materials and ensure guaranteed high performance of irradiated products with coatings.

Keywords: copper alloys, coatings, laser irradiation, structure, properties

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to the reviewers for their critical assessment of the submitted materials and their suggestions that improved the quality of the article.

For citation. Brover GI, Shcherbakova EE, Borisenko EB. Morphology and Properties of the Laser-Irradiated Composition “Chrome Coating — Copper Substrate”. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;8(4):62–71. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-62-71>

Введение. В работе Г.В. Ломаева и Е.В. Харанжевского «Упрочняющая обработка поверхности методом высокоскоростной лазерной перекристаллизации» [1] и в некоторых других исследованиях [2, 3] показано, что в процессе лазерного облучения из-за высоких градиентов температур в поверхностных слоях упрочняемого материала появляются термострикционные напряжения разного происхождения, релаксация которых приводит к локальной пластической деформации, а также возникают явления динамического возврата, полигонизации, рекристаллизации металла в облученных зонах. Практическое значение имеет появляющаяся при этом возможность получения достаточно высокой плотности дефектов кристаллического строения и требуемого уровня механических свойств поверхностных слоев материалов [4].

Следует отметить, что при импульсной лазерной обработке [5], упрочнении [6] и модифицировании [7] поверхности цветных, в частности, медных сплавов, возникает ряд проблем [8]. К примеру, не увязаны экстремальные термодформационные условия импульсной лазерной обработки с особенностями структурообразования и формирования свойств в облученных композициях «покрытие – медная подложка» [8]. Недостаточно обоснованы причины повышения прочности сцепления покрытий с металлической (медной) подложкой при высокоскоростной лазерной обработке [9].

Решение перечисленных выше проблем имеет большое значение, поскольку позволяет обоснованно назначать технологические режимы поверхностного упрочнения и микролегирования изделий из медных сплавов. Это будет способствовать получению качественных работоспособных композиционных поверхностных слоев на медных деталях и создаст условия для безотказной работы облученных узлов механизмов, расположенных в труднодоступных для ремонта местах. В связи с этим цель данной статьи — получение, количественная оценка и анализ массива результатов металлофизических исследований, а также оценка степени влияния импульсной лазерной обработки на формирование структуры и свойств облученной композиции «хромовое покрытие – медная подложка».

Материалы и методы. Металлофизические исследования проводились на образцах цветных сплавов системы Cu–Zn с хромовым электрохимическим покрытием толщиной 20 мкм. Композиция «медная подложка – хромовое покрытие» облучалась на установке «Квант-16» с плотностью мощности излучения 70–250 МВт/м².

В процессе работы применялся металлографический структурный анализ, использовалась сканирующая зондовая микроскопия, проводились дюротметрические исследования. При металлографическом анализе использовались микроскопы МИМ-7 и Neophot-21. На приборе ПМТ-3 проводились измерения микротвердости с использованием нагрузки на индентор 0,49 Н.

Адгезионные свойства покрытий определяли на основании результатов косвенных экспериментов по определению микротвердости покрытий при различных нагрузках вдавливания индентора в покрытие. Наблюдаемые на поперечном шлифе композиции «покрытие – подложка» следы разрушения или отслаивания покрытий от поверхности медной подложки считались критерием недостаточной адгезионной прочности.

Результаты экспериментов. В результате проведенных металлографических и дюротметрических исследований замечено, что лазерная обработка повышает прочность сцепления хромового покрытия с медной подложкой (рис. 1). Этот вывод сделан в связи с отсутствием сколов покрытия при вдавливании в него индентора микротвердомера, то есть при приложении нагрузки.

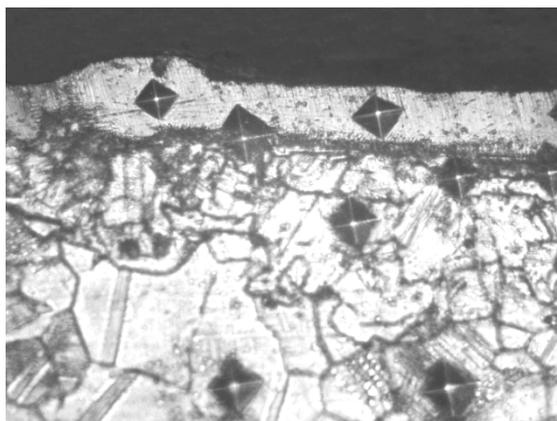


Рис. 1. Строение хромового покрытия на медном сплаве (латуни Л62) с отпечатками индентора микротвердомера

При этом, как видно на рис. 2, в переходной зоне на границе между хромовым покрытием и медной подложкой, то есть на глубине 20 мкм, после лазерной обработки хорошо заметны локальные участки твердых растворов, видимо, на основе хрома и меди, проникающие друг в друга на расстояние 2–4 мкм.

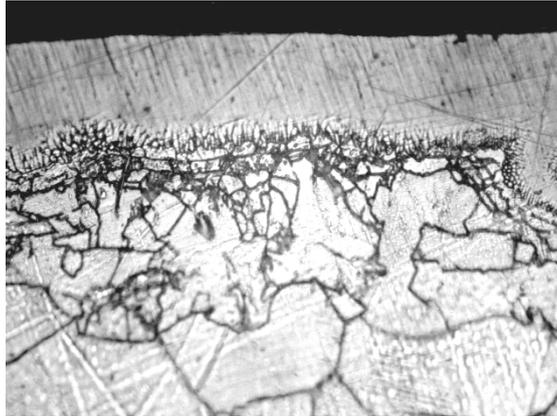


Рис. 2. Микроструктура зоны контакта хромового покрытия с латунью после лазерного облучения

Для изучения особенностей структурообразования на границе покрытия с подложкой был проведен анализ диаграммы состояния системы Cr–Cu [10]. Замечено, что при температуре 1767 °С наблюдается монотектическое равновесие, происходит расслоение жидкой фазы с образованием двух жидкостей разного химического состава. Можно предположить, что наблюдаемая на рис. 2 структура зоны контакта покрытия с подложкой также формировалась из расплавленного при лазерном воздействии состояния, то есть в переходной зоне образовалась область несмешиваемости меди и хрома в жидком состоянии, в которой после скоростной кристаллизации зафиксировались два твердых раствора на основе Cu и Cr. Но проведенный с использованием пакета программ Mathcad количественный анализ температурного поля при лазерном облучении хромового покрытия [11] исключил возможность достижения температур плавления на глубине расположения покрытия, то есть на глубине 20 мкм (рис. 3).

Композиция «хромовое покрытие – медная подложка» облучалась с плотностью мощности излучения 150 МВт/м². Эти энергетические условия не приводили к испарению покрытия и к образованию на поверхности «кратеров». Тепловые расчеты, результаты которых приведены на рис. 3, позволили определить, что в переходной зоне достигается температура 900–1000 °С. Этой температуры недостаточно для оплавления и зафиксированного при исследованиях формирования двух твердых растворов на основе компонентов композиции «хромовое покрытие – медная подложка». Возможная причина описываемого эффекта требует отдельного обсуждения.

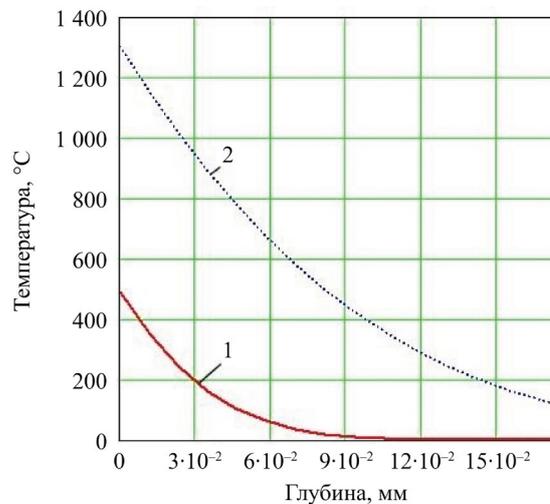


Рис. 3. Распределение температуры по глубине хромового покрытия на стадии нагрева: 1 — начало действия лазерного импульса; 2 — конец действия

Слой медного сплава на глубине 5–10 мкм подвергались плавлению и последующей скоростной кристаллизации. Особенностью строения оплавленного поверхностного слоя латуни, как показали результаты исследований на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ), является однородная дисперсная структура, состоящая из дендритов твердого раствора с поперечным сечением до 25 нм (рис. 4) и имеющая достаточно высокую твердость — около 1 ГПа.

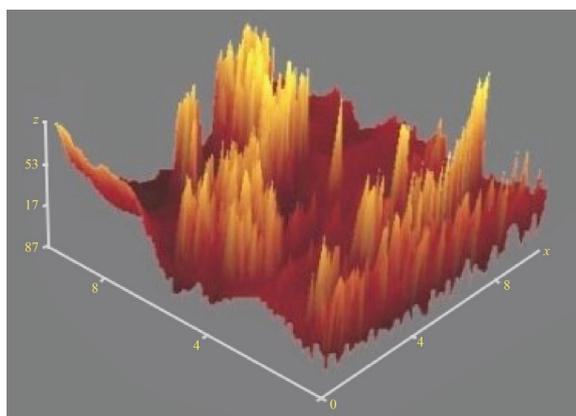
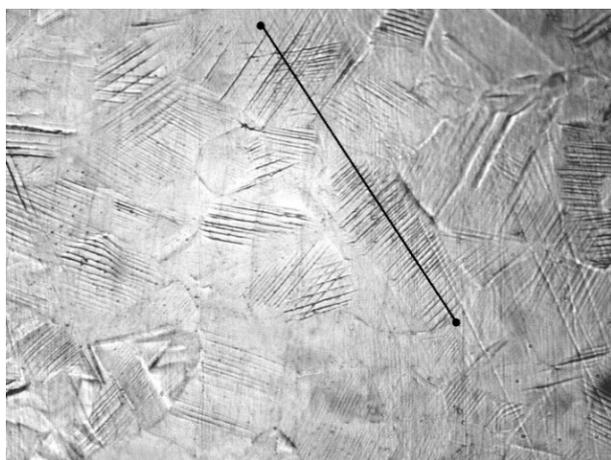


Рис. 4. Сканированное изображение поверхности медного сплава Л62 (СЗМ)

Под действием только температур нагрева за время действия лазерного импульса (10^{-3} с) зафиксированные структурные превращения произойти не могли. Дополнительный и существенный вклад в ускорение процессов структурообразования, видимо, вносят термострикционные напряжения.

С целью определения уровня действующих в облучаемых зонах сплавов напряжений и локальных пластических деформаций определены их количественные оценки с использованием «модельных» медных однокомпонентных образцов. Как было показано выше, в зоне контакта покрытия с подложкой не достигается температура плавления, поэтому облучение медных образцов без покрытия проводилось на режиме, не приводящем к оплавлению поверхности (с плотностью мощности излучения 100 МВт/м^2). После лазерного облучения, как видно на рис. 5 а, на предварительно полированных поверхностях медных образцов появляются линии скольжения, то есть следы локальной пластической деформации металла.



а)



б)

Рис. 5. Микроструктура и распределение высот формирующегося рельефа поверхности на меди после лазерного облучения: а — линии скольжения; б — распределение высот рельефа поверхности

Следует отметить, что линии скольжения формируются за счет перемещения дислокаций в облученных зонах металла [12]. Вследствие выхода на поверхность образцов разного количества дислокаций на облученной поверхности образуется рельеф с разной высотой профиля поверхности [13] (ступеньки сдвига h на рис. 6).

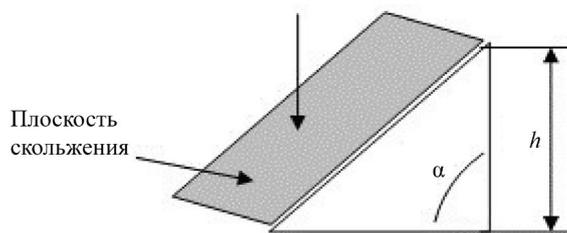


Рис. 6. Схема ступеньки сдвига на линиях скольжения [14]

Анализ картины расположения линий скольжения и рельефа облученной поверхности проводился с использованием компьютерной программы обработки изображений Gwiddion. Как видно на рис. 5 б, средняя высота профиля облученной поверхности медного образца, следовательно, и высота площадки сдвига h , составила 6,5–8,5 нм. По результатам измерений этой высоты можно судить о степени достигаемой при обработке металла пластической деформации и уровне вызывающих ее напряжений.

Учитывая, что при пластической деформации высота ступеньки h пропорциональна величине nb , где n — количество дислокаций, вышедших на поверхность; b — вектор Бюргерса облучаемого материала, можно записать:

$$nb = h. \quad (1)$$

Для упрощения расчета напряжений сдвига принимали, что предшествующую скольжению упругую деформацию в кристалле можно определить как t/G , где t — приложенное напряжение, G — модуль сдвига материала. Учитывали также, что упругая деформация при протекании скольжения может релаксировать в области диаметром $2L$, где L — длина линий скольжения дислокаций.

Сделав допущение о полном переходе упругой деформации ($2L\tau/G$) в пластическую, равную величине nb , получим [14]:

$$nb = 2L\tau / G. \quad (2)$$

Расчетным путем определяем напряжение сдвига (τ), вызывающее пластическую деформацию, с использованием выражений (1), (2) и, принимая $L = 10^{-3}$ мм, из выражения [15]:

$$\tau = h \left(\frac{G}{2L} \right),$$

где h — высота площадки сдвига, при лазерной обработке составляла 6,5–8,5 нм; G — модуль сдвига, для меди $G = 4,3 \times 10^4$ Мпа; L — длина линий скольжения дислокаций, принимаем $L = 10^{-3}$ мм.

Напряжения сдвига составили около 320 МПа, что превышает условный предел текучести меди (40–80 МПа) и приводит к пластической деформации поверхностных слоев облучаемого металла.

В работе была проведена также оценка степени локальной остаточной пластической деформации, которая составила в случае лазерной обработки меди от 5 до 9 %.

Возможные структурные процессы в зонах лазерного облучения композиции «покрытие – металлическая подложка», в частности, в медной подложке, детально изучались с помощью программы Mathcad. Построено температурное поле, которое распространяется по глубине после облучения поверхности латунного образца (рис. 7).

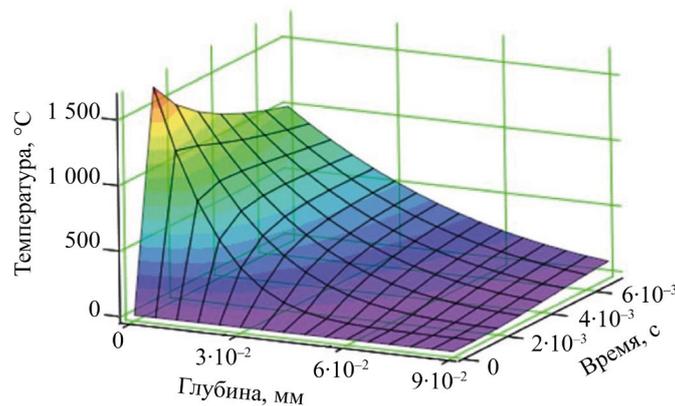


Рис. 7. Температурное поле в медном сплаве при лазерном облучении поверхности

Как видно на рис. 7, на глубине 15 мкм температура понижается до 800 °С. При этой температуре в термодинамических условиях импульсной обработки несмотря на чрезвычайно малое время теплового воздействия лазерного излучения существует вероятность протекания динамических эффектов релаксации напряжений, сопутствующих процессу высокоскоростного лазерного облучения, то есть возможны процессы полигонизации и рекристаллизации в облученных зонах на медных сплавах. Последствия рекристаллизации облученной латуни Л62 представлены на рис. 8 а в виде измельчения зерен твердого раствора.

Аналогичный процесс рекристаллизации наблюдается в латунной подложке под хромовым покрытием после лазерного облучения. Обнаружено, что в присутствии покрытия зерно металла было крупнее, чем на медном образце без покрытия. Видимо, рекристаллизация в этом случае доходила до стадии собирательной рекристаллизации. Можно сделать вывод о меньшем уровне остаточных напряжений и об уменьшении опасности трещинообразования в композиции при лазерном облучении.

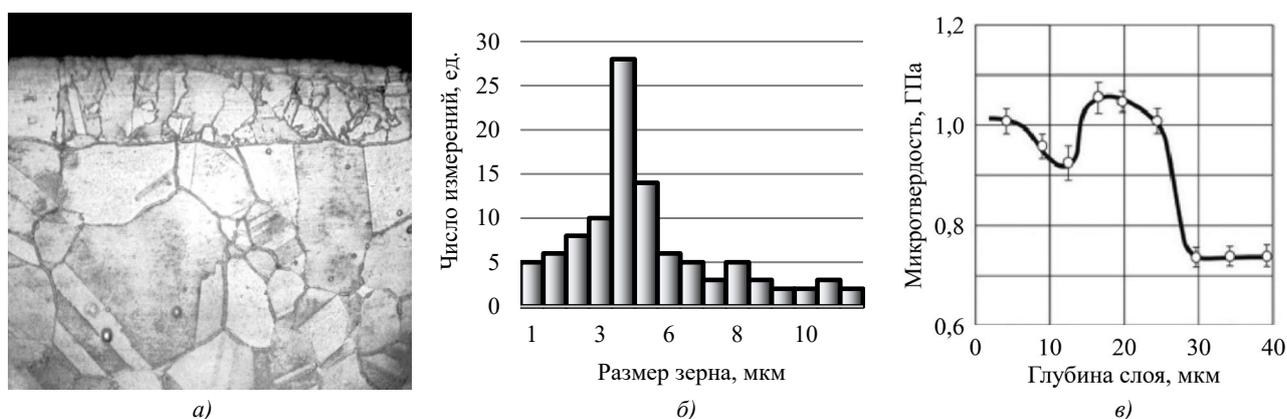


Рис. 8. Микроструктура, гистограмма распределения размеров субзерен и распределение твердости по глубине облученной зоны на медном сплаве Л62: *а* — микроструктура; *б* — распределение размеров субзерен; *в* — распределение твердости по глубине сплава Л62

Средний размер рекристаллизованных зерен, как видно на рис. 8 б, оставлял 4–5 мкм при исходном размере зерна 25 мкм. При этом в рассматриваемой зоне облученного пятна на латуни достигается самая высокая твердость (рис. 8 в).

Обсуждение и заключение. О повышении адгезионных свойств композиции «хромовое покрытие – медная подложка» после лазерной обработки можно косвенно судить по результатам дюрометрических исследований. Заметно, что при внедрении индентора микротвердомера в покрытие не наблюдается его отслаивания от медной матрицы, тогда как непосредственно после нанесения покрытие имело недостаточно высокую прочность сцепления с металлической (медной) подложкой.

Положительное влияние на адгезионные эффекты в облученной композиции оказывают измельчение зерна, то есть рекристаллизация, в медной подложке, а также формирующиеся в переходной зоне на границе покрытия с подложкой локальные структурные ансамбли из участков твердых растворов на основе хрома и меди.

Наблюдаемые процессы структурообразования при действии «мгновенного» теплового источника возможны только в условиях совместного действия на облучаемую композицию высоких температур и напряжений.

Для оценки параметров этих термосиловых факторов и определения степени их влияния на формирование структуры и свойств облучаемых материалов прежде всего был проведен анализ диаграммы состояния системы $\text{Cu}-\text{Cr}$, который показал, что наблюдаемые структурные превращения возможны только в случае оплавления зоны контакта хромового покрытия с медной подложкой, то есть при нагреве до температуры 1767°C . При этой температуре, как следует из диаграммы, наблюдается образование двух жидкостей, то есть в переходной зоне между покрытием и подложкой должна сформироваться область несмешиваемости меди и хрома в жидком состоянии, а после скоростной кристаллизации два твердых раствора на основе Cu и Cr . Проведенный с использованием пакета программ Mathcad количественный анализ температурного поля при лазерном облучении хромового покрытия исключил возможность достижения температур плавления на глубине 20–30 мкм, то есть на глубине расположения исследуемой зоны контакта в композиции. С другой стороны, анализ структурных процессов в зоне лазерного облучения медного латунного образца показал, что на глубине 5–10 мкм происходит плавление и последующая скоростная кристаллизация меди. Исследования на сканирующем зондовом микроскопе подтвердили, что поверхностный оплавленный слой медного образца имеет дисперсное строение и достаточно высокую твердость — около 1 ГПа.

Принципиальное значение имеет тот факт, что строение тонкого оплавленного слоя на медном сплаве аналогично строению участков твердого раствора на основе меди в зоне контакта медной подложки с хромовым покрытием. Это косвенно подтверждает, что в переходной зоне от покрытия к медной подложке несмотря на нагрев до температур ниже температуры плавления все-таки присутствовала жидкая фаза. Можно предположить, что на исследуемой границе в экстремальных термомеханических условиях лазерной обработки протекает контактное плавление, приводящее к описанному структурообразованию и в результате к повышению адгезионных свойств композиции «хромовое покрытие – медная подложка».

Следует отметить, что полученные результаты связаны, в первую очередь, с экстремальными термосиловыми условиями лазерного облучения. Значительные градиенты температур в совокупности с высокой скоростью лазерной обработки приводят к формированию в облучаемых зонах сплавов высокого уровня термомеханических напряжений и локальных пластических деформаций. Для подтверждения их существования и выполнения количественной оценки достигаемых ими величин, а также для чистоты эксперимента исследования в работе

проводили не только на медных сплавах, но и на медных однокомпонентных образцах [11]. После лазерного облучения на предварительно полированных поверхностях медных образцов появляются линии скольжения, то есть следы локальной пластической деформации металла. Анализ картины расположения линий скольжения и рельефа облученной поверхности позволил определить, что средняя высота профиля поверхности облученного медного образца, а, следовательно, и высота площадки сдвига составила 6,5–8,5 нм.

По результатам измерений этой высоты и проведенных расчетов определили, что напряжения сдвига составляли около 320 МПа. Эти величины превышают условный предел текучести меди (40–80 МПа) и приводят к пластической деформации поверхностных слоев облучаемого металла, которая составила от 5 до 9 % [3].

Следует отметить, что возникающие в процессе действия мощного теплового удара лазерного импульса на локальных участках металлов реально достигаемые значения напряжений и пластической деформации будут, несомненно, иметь гораздо большие величины.

Появляющиеся в зонах лазерного облучения сплавов термомодеформационные эффекты, несмотря на чрезвычайно малое время лазерного импульса (10^{-3} с), приводят при релаксации напряжений не только к локальной пластической деформации, но и к динамической полигонизации и рекристаллизации структуры в поверхностных слоях металлов.

Как показали результаты количественной оценки температур в облучаемой медной подложке, на глубине слоя в 15 мкм температура понижается до 800 °С, то есть начинается зона лазерной обработки медного образца в твердом состоянии. Можно сделать вывод, что при этой температуре в термомодеформационных условиях лазерного облучения, несмотря на чрезвычайно малое время теплового воздействия, появляется возможность проявления динамической полигонизации и рекристаллизации в облученных зонах на меди. В результате происходит измельчение зерна меди от исходного размера 25 мкм до 4–5 мкм в рекристаллизованном металле. Свидетельством диспергирования структуры поверхностных облученных слоев сплава являются результаты дюрOMETрического анализа, которые свидетельствуют, что в рекристаллизованной зоне достигается самая высокая твердость.

Описанный рекристаллизационный процесс приводит к повышению трещиностойкости облученных композиций «хромо-вое покрытие — медная подложка». Это связано со снятием напряжений, появляющихся в покрытии в процессе его нанесения и скоростной лазерной обработки, что понижает вероятность хрупкого разрушения композиции.

Таким образом, в работе установлено, что лазерная обработка с плотностью мощности излучения 150 МВт/м² способствует повышению прочности сцепления хромо-вого покрытия с металлической (медной) подложкой за счет формирования на границе покрытия и основного материала переходного слоя специфической морфологии, а также за счет протекания в поверхностных слоях медного сплава рекристаллизационных процессов.

Анализ результатов исследований облученных композиций «покрытие — медная подложка» позволил сделать вывод, что они расширяют технологические возможности лазерного метода упрочнения материалов и позволяют гарантированно обеспечивать высокую работоспособность облученных изделий с покрытиями.

Список литературы / References

1. Ломаев Г.В., Харанжевский Е.В. Упрочняющая обработка поверхности методом высокоскоростной лазерной перекристаллизации. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2002;3:27–32.
1. Lomaev GV, Kharanzhevskii EV. Hardening Surface Treatment Using High-Speed Laser Overcrystallization. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2002;3:27–32. (In Russ.)
2. Kumar H, Bhaduri GA, Manikandan SGK, Kamaraj M, Shiva S. Effect of Laser Surface Processing on the Microstructure Evolution and Multiscale Properties of Atmospheric Plasma Sprayed High-Entropy Alloys Coating. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2023;32:831–850. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01491-0>
3. Brover GI, Shcherbakova EE. Morphology and Properties of Chemical Coatings on Steels after Extreme Thermal Laser Radiation Effects. *Metallurgist*. 2023;66:1105–1113. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01423-5>
4. Brover AV. Adaptation of Structures of Steel Laser Hardening Zones to Friction Conditions. *Vestnik of Don State Technical University*. 2020;20(1):87–92. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-87-92>
5. Decheng Kong, Chaofang Dong, Xiaoqing Ni, Liang Zhang, Cheng Man, Guoliang Zhu, et al. Effect of TiC Content on the Mechanical and Corrosion Properties of Inconel 718 Alloy Fabricated by a High-Throughput Dual-Feed Laser Metal Deposition System. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;803:637–648. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.317>
6. Soumya Sobhan Dash, Daolun Chen. A Review on Processing–Microstructure–Property Relationships of Al-Si Alloys: Recent Advances in Deformation Behavior. *Metals*. 2023;13(3):609. <https://doi.org/10.3390/met13030609>
7. Xu Yang, Yang Qi, Wenqi Zhang, Yilong Wang, Haihong Zhu. Laser Powder Bed Fusion of C18150 Copper Alloy with Excellent Comprehensive Properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2023;862:144512. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144512>

8. Xiangpeng Tang, Xiaohong Chen, Fujia Sun, Lei Li, Ping Liu, Honglei Zhou, et al. A Study on the Mechanical and Electrical Properties of High-Strength CuCrZr Alloy Fabricated Using Laser Powder Bed Fusion. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022;924:166627. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166627>
9. Plat J, Rainer DBSc, Leitner H, Turk C, Galbusera FMSc, Ali Gökhan Demir, et al. Potential Causes for Cracking of a Laser Powder Bed Fused Carbon-free FeCoMo Alloy. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*. 2022;167:325–331. <https://doi.org/10.1007/s00501-022-01238-y>
10. Лякишев Н.П. *Диаграммы состояния двойных металлических систем*. Москва: Машиностроение; 1996–2000. 350 с.
Lyakishev NP. *Diagrams of the State of Double Metal Systems*. Moscow: Mashinostroenie; 1996–2000. 350 p. (In Russ.)
11. Sambit Sahoo, Rajat Mishra, Nishkarsh Srivastava, Amit Arora. FEM Simulation of Pulsed Laser Welding of High-Carbon Alloy Steel: Using Different Heat Source Models. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2023;66:1005–1013. <https://doi.org/10.1007/s12666-023-03008-x>
12. Матюнин В.М., Кудряков О.В., Варавка В.Н., Марченков А.Ю. Микромеханика малых деформаций в металлических сплавах при лазерном облучении. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2022;88(10):66–72. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-10-66-72>
Matyunin VM, Kudryakov OV, Varavka VN, Marchenkov AYU. Micromechanics of Small Deformations in Metal Alloys under Laser Irradiation. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2022;88(10):66–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-10-66-72>
13. Pustovoit VN, Dombrovskii YuM, Dolgachev YuV. Structural Identification of the Phenomenon of “White Zone”. *Metal Science and Heat Treatment*. 2017;59:3–7. <https://doi.org/10.1007/s11041-017-0092-2>
14. Фролов В.А., Якивчук О.В., Фролов В.Ф., Ворошилов Д.С. Исследование структуры литых и деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, экономно легированных скандием. В: *Материалы XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов — молодых ученых*. Екатеринбург: УрФУ; 2017. С. 627–631.
Frolov VA, Yakivchuk OV, Frolov VF, Voroshilov DS. The Study of the Structure of Cast and Deformed Semifinished Products from Aluminum Alloys Doped with Scandium Economically. In: *Materials of the XVIII International Scientific and Technical Ural School-Seminar of Metal Scientists — Young Researches*. Yekaterinburg: UrFU; 2017. P. 627–631. (In Russ.)
15. Смитлз К.Дж. *Металлы: справочник*. Москва: Metallurgiya; 1980. 448 с.
Smitlz KDzh. *Metals: Reference Book*. Moscow: Metallurgiya; 1980. 448 p. (In Russ.)

Об авторах:

Галина Ивановна Бровер, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), brover@mail.ru

Елена Евгеньевна Щербакова, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), sherbakovaee@mail.ru

Елена Борисовна Борисенко, ведущий научный сотрудник лаборатории физико-химических основ кристаллизации Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН (142432, Российская Федерация, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 2), [SPIN-код](#), borisenko@issp.ac.ru, tura@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Г.И. Бровер: постановка задачи, выбор методов и методик исследований, планирование экспериментов, участие в проведении металлофизических исследований и в обсуждении их результатов.

Е.Е. Щербакова: критический обзор литературных источников по теме исследования, участие в проведении металлофизических экспериментов и в обсуждении их результатов.

Е.Б. Борисенко: участие в проведении металлофизических экспериментов и в обсуждении их результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Galina I. Brover, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Materials Science and Technology of Metals Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), brover@mail.ru

Elena E. Shcherbakova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Materials Science and Technology of Metals Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), sherbakovae@mail.ru

Elena B. Borisenko, Leading Researcher at the Laboratory of Physical and Chemical Bases of Crystallization, Osipyan Institute of Solid State Physics RAS (2, Academician Osipyan Str., Chernogolovka, Moscow region, 142432, Russian Federation), [SPIN-code](#), borisenko@issp.ac.ru, tura@mail.ru

Claimed Contributorship:

GI Brover: problem statement, choice of research methods and techniques, planning of experiments, participation in conducting metal physical research and in discussing their results.

EE Shcherbakova: critical review of literature sources on the research topic, participation in conducting metal physical experiments and in discussing their results.

EB Borisenko: participation in conducting metal physical experiments and in discussing their results.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 17.10.2024

Поступила после рецензирования / Revised 11.11.2024

Принята к публикации / Accepted 15.11.2024