

Том 32, №1, 2026



ISSN 2782-6724

Глобальная энергия

Санкт-Петербург

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ГЛОБАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Сергеев В.В., главный редактор, д-р техн. наук, профессор, чл-корр РАН, первый проректор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Александров М.Л., член-корр. РАН, Отделение нанотехнологий и информационных технологий РАН, Москва, Российская Федерация;
Кищенко А.В., академик РАН, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», НИТУ «МИСиС», Москва, Российская Федерация;
Костюк В.В., академик РАН, Российская академия наук, Москва, Российская Федерация;
Лагарьков А.Н., академик РАН, Институт теоретической и прикладной электродинамики ОИВТ РАН, Москва, Российская Федерация;
Окрепилов В.В., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Рудской А.И., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Федоров М.П., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Сергеев В.В., главный редактор, д-р техн. наук, профессор, чл-корр РАН, первый проректор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Кондратьев С.Ю., зам. главного редактора, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Аксёнов Л.Б., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Башкарёв А.Я., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Боровков А.И., к.т.н., проректор по цифровой трансформации, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Гордеев С.К., д-р техн. наук, ст. научн. сотр. Центральный научно-исследовательский институт материалов, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Забонин В.Н., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Каляев И.А., д-р техн. наук, академик РАН, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация;
Колсун Михал, профессор, Технический университет, Кошице, Словакия;
Коровкин Н.В., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Куколев М.И., д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Митяков А.В., д-р техн. наук, профессор, Университет Турку, Турку, Финляндия;
Михайлов В.Г., д-р техн. наук, профессор, Бранденбургский технический университет, Бранденбург, Германия;
Райчик Ярослав, д-р техн. наук, профессор, Ченстоховский политехнический университет, Ченстохова, Польша;
Рамасуббу С., PhD, Директор по исследованиям BISS Division, ITW-India (P) Ltd, Бангалор, Индия;
Тендлер М.Б., PhD, ин. член РАН, KTH Royal Institute of Technology, Стокгольм, Швеция;
Титков В.В., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Толочко О.В., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Фокин Г.А., д-р техн. наук, генеральный директор ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург», Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Цемко В.Н., д-р техн. наук, зав. каф., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Журнал «Глобальная Энергия» (ранее «Материаловедение. Энергетика») с 1995 года издается под научно-методическим руководством Российской академии наук.

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Сетевое издание открытого доступа публикует статьи высокого научного уровня, освещающие передовой опыт, результаты НИР, теоретические и практические проблемы энергетики, электротехники, материаловедения и металлургии.

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich`s Periodical Directory», в базах данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), Google Scholar, EBSCO, ProQuest, ROAD, Index Copernicus, CNKI, RSCI (WoS), DOAJ, в научной электронной библиотеке КиберЛенинка.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство Эл № ФС 77-78004 от 27.03.2020 г.)

Учредитель и издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Редакция журнала

О.А. Матенев – ответственный секретарь;

А.А. Кононова – компьютерная вёрстка; И.Е. Лебедева – перевод на английский язык; Ф.К.С. Бастиан – редактор.

Адрес редакции: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Тел. редакции +7 (812) 294-22-86, e-mail редакции: ntv-nauka@spbstu.ru

Дата выхода: 31.03.2026

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2026

32 (1) 2026



ISSN 2782-6724

Global Energy

St. Petersburg

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great

GLOBAL ENERGY

EDITORIAL COUNCIL

Sergeev V.V. — head of the editorial council, Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, corresponding member of the RAS, Russia;

Aleksandrov M.L. — corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Klimenko A.V. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Kostiuk V.V. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Lagar'kov A.N. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Okrepilov V.A. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Rudskoy A.I. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Fedorov M.P. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia.

EDITORIAL BOARD

Sergeev V.V. — editor-in-chief, Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, corresponding member of the RAS, Russia;

Kondrat'ev S.Yu. — deputy editor-in-chief, Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Aksenov L.B. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Bashkarev A.Ya. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Borovkov A.I. — PhD in Technical Sciences, Vice Rector for Digital Transformation of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Gordeev S.K. — Doctor of Technical Sciences, prof. CNIIM, Russia;

Zaboin B.N. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Kayaev I.A. — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Kolcun Michal — Ph.D., Technical University of Kosice, Slovak Republic;

Korovkin N.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Kukolev M.I. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Mityakov A.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the University of Turku, Turku, Finland;

Michailov V.G. — Doctor of Technical Sciences, prof. BTU, Germany;

Raychik Ya. — Doctor of Technical Sciences, prof. Czestochova Polytechnic University, Poland;

Ramasubbu S. — PhD, Lifetime Fellow, Indian Academy of Science, Research Director BISS, ITW-India (P) Ltd, India;

Tendler M.B. — foreign member of the Russian Academy of Sciences, KTH Royal Institute of Technology, Sweden;

Titkov V.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Tolochko O.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Fokin G.A. — Doctor of Technical Sciences, General Director of LLC «Gazprom Transgaz St. Petersburg», Russia;

Tsemenko V.N. — Doctor of Technical Sciences, Head of Chair of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

Global Energy (formerly Materials Science. Power Engineering) has been published since 1995 under the scientific and methodical guidance of RAS since 1995.

Since 2002, the journal has been included in the List of leading peer-reviewed scientific journals compiled by the Higher Attestation Commission.

The online fully open-access journal focuses on the latest research in theoretical and practical aspects of power engineering, electrical engineering, materials science and metallurgy, striving to publish high-quality studies in these fields.

The journal is indexed by the following databases: VINITI Database RAS, Ulrich's Periodicals Directory, Russian Science Citation Index (RSCI), Google Scholar, EBSCO, ProQuest, ROAD, Index Copernicus, CNKI, RSCI (WoS), DOAJ, CyberLeninka.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (ROSKOMNADZOR), Certificate ЭЛ № ФС 77-78004 issued March 27, 2020.

Editorial office

O.A. Matenev – editorial manager;

A.A. Kononova – computer layout; I.E. Lebedeva – English translation; Ph.Ch.S. Bastian – editor.

Address: 195251 Polytekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

+7 (812) 294-22-86, e-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

Release date: 31.03.2026

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2026

Содержание

Энергетика. Электротехника

Долбин К.С., Коровкин Н.В., Воронин И.С. Определение оптимальных параметров активно-адаптивных устройств для моделей энергосистем большой размерности.....	7
Политаева Н.А., Шинкевич П.С., Опарина А.М. Биофльтрация дымовых газов ТЭЦ биомассой микроводорослей.....	22
Новичков М.Д., Гурин С.А., Печерская Е.А., Шепелева А.Э., Агафонов Д.В. Электрохимическая активность и долговечность биметаллических каталитических структур с различным количеством Ni.....	35
Имроз М., Басит М.А. Максены: новый чудо-материал.....	44

Металлургия. Материаловедение

Блинов С.А., Левитский А.М., Зотов О.Г., Голубков Н.А. Сравнительные испытания коррозионной стойкости никелевого и цинкового порошковых покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления.....	53
Воеводенко Д.В., Стариков К.А., Попович А.А. Исследование влияния параметров СЛП на микроструктуру жаропрочного никелевого сплава.....	66
Воеводенко Д.В., Стариков К.А., Попович А.А. Влияние параметров селективного лазерного плавления на трещинообразование в жаропрочном никелевом сплаве.....	75
Ермаков Б.С., Ермаков С.Б., Швецов О.В. Производство порошков для изготовления коррозионного слоя биметаллических труб в условиях нефтегазовых месторождений Арктического пояса.....	84

Contents

Energetics. Electrical engineering

Dolbin K.S., Korovkin N.V., Voronin I.S. Determination of optimal parameters of active adaptive devices for large-scale power system models.....	7
Politaeva N.A., Shinkevich P.S., Oparina A.M. Oparina, Biofiltration of thermal power plant flue gases using microalgae biomass.....	22
Novichkov M.D., Gurin S.A., Pecherskaya E.A., Shepeleva A.E., Agafonov D.V. Electrochemical activity and use of bimetallic catalytic structures with different Ni contents.....	35
Имроз М., Басит М.А. Максены: новый чудо-материал.....	44

Metallurgy. Material Science

Blinov S.A., Levitsky A.M., Zotov O.G., Golubkov N.A. Comparative corrosion resistance tests of nickel and zink powder coatings applied by cold gas dynamic spraying.....	53
Voevodenko D.V., Starikov K.A., Popovich A.A. Investigation of the effect of SLM parameters on the microstructure of a heat-resistant nickel alloy.....	66
Voevodenko D.V., Starikov K.A., Popovich A.A. Effect of selective laser melting parameters on cracking in heat-resistant nickel alloy.....	75
Ermakov B.S., Ermakov S.B., Shvetsov O.V. Production of powders for the manufacture of a corrosion layer of bimetallic pipes in Arctic oil and gas fields.....	84

Энергетика. Электротехника Energetics. Electrical engineering

Научная статья

УДК 621.31

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32101>



К.С. Долбин  , Н.В. Коровкин, И.С. Воронин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

 kirill.dolbin.02@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНО-АДАПТИВНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ БОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ

Аннотация. Ключевым направлением оптимизации режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) является внедрение устройств продольной компенсации (УПК). В настоящей работе решается задача определения оптимальных параметров активно-адаптивных устройств в ЭЭС большой размерности. Определение параметров осуществляется для заранее известного множества перспективных мест установки УПК, представленного в виде фронта Парето и полученного с помощью многопоточного генетического алгоритма. Представлен метод формирования целевых функций оптимизации, базирующийся на теории чувствительности электрических цепей. При составлении целевых функций используются критерии статической и динамической устойчивости, а также анализ установившихся режимов ЭЭС, что направлено на комплексное повышение надежности ЭЭС. Практическая значимость подхода демонстрируется на примере расчета типовой сети IEEE с 300 узлами. Результаты представлены в виде множеств Парето-оптимальных решений для различных вариантов расстановки УПК в сети. Предварительно необходимо решить задачу расстановки устройств в ЭЭС, которая была рассмотрена нами ранее.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, многокритериальная оптимизация, генетический алгоритм, устройства продольной компенсации, оптимальные параметры активно-адаптивных устройств, билинейная теорема.

Благодарности: Исследование выполнено за счет субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования на реализацию мероприятий, направленных на поддержку студенческих научных сообществ (Соглашение №075-15-2025-532).

Для цитирования:

Долбин К.С., Коровкин Н.В., Воронин И.С. Определение оптимальных параметров активно-адаптивных устройств для моделей энергосистем большой размерности // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 1. С. 7–21. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32101>



K.S. Dolbin ✉, *N.V. Korovkin*, *I.S. Voronin*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ kirill.dolbin.02@mail.ru

DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF ACTIVE ADAPTIVE DEVICES FOR LARGE-SCALE POWER SYSTEM MODELS

Abstract. A key direction in optimizing the operating modes of electric power systems (EPS) is the introduction of series compensation devices (SCDs). The paper addresses the problem of determining the optimal parameters of active-adaptive devices in large-scale EPS. The parameters are determined for a pre-known set of prospective SCD installation sites, represented as a Pareto front and obtained using a multithreaded genetic algorithm. A method for formulating optimization objective functions based on the theory of sensitivity of electrical circuits is presented. The objective functions are formulated using criteria of static and dynamic stability, as well as an analysis of steady-state operating modes of the EPS, which is aimed at comprehensively improving the reliability of the EPS. The practical significance of the approach is demonstrated by the calculation example for a typical IEEE network with 300 nodes. The results are presented in the form of sets of Pareto-optimal solutions for various options for the placement of SCD in the network. Preliminary work requires solving the problem of arranging devices in the EPS, which was previously addressed by the authors.

Keywords: electric power system, multicriteria optimization, genetic algorithm, series compensation devices, optimal parameters of active adaptive devices, bilinear theorem.

Acknowledgements: The study was carried out using a subsidy from the federal budget to higher education institutions for the implementation of activities aimed at supporting student scientific communities (Agreement No. 075-15-2025-532).

Citation:

Dolbin K.S., Korovkin N.V., Voronin I.S., Determination of optimal parameters of active adaptive devices for large-scale power system models, *Global Energy*, 32 (01) (2026) 7–21, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32101>

Введение. Активно-адаптивные устройства (ААУ) являются одним из ключевых элементов модернизации электроэнергетики, обеспечивающим гибкое управление режимами работы электроэнергетической системы (ЭЭС) [1, 2]. Их способность оперативно изменять параметры сети позволяет решать задачи повышения статической и динамической устойчивости. Среди многообразия ААУ особую роль играют устройства продольной компенсации (УПК), которые посредством изменения реактивного сопротивления линий электропередач (ЛЭП) влияют на напряжения и потоки мощности в ЭЭС [3–5]. Внедрение УПК порождает комплекс задач, среди которых можно выделить следующие: определение оптимальной расстановки УПК, расчет оптимальных параметров УПК для выбранной конфигурации и разработка алгоритмов управления УПК. Настоящая статья рассматривает задачи определения оптимальных параметров УПК при условии, что их местоположение в сети уже известно и предварительно обосновано.

Актуальность этой задачи обусловлена тем, что традиционные методы оптимизации, основанные на многократном расчете установившихся режимов, требуют значительных вычислительных ресурсов. Поскольку расчет установившегося режима сводится к решению системы

нелинейных уравнений, время определения параметров УПК может на порядок и более превышать время актуальности самого режима ЭЭС, что делает невозможной их настройку в реальном времени. Совершенствование вычислительной техники в обозримой перспективе не позволяет устранить этот разрыв [6, 7]. Это особенно актуально для моделей ЭЭС большой размерности.

Работа направлена на разработку метода, позволяющего быстро (в режиме реального времени) определять параметры предустановленных УПК, обеспечивающие оптимальный по заданным критериям установившийся режим работы ЭЭС. В работе принято обобщенное представление УПК как элемента, изменяющего эквивалентное реактивное сопротивление ЛЭП, что позволяет использовать подход для различных устройств: постоянный (неуправляемый) последовательный конденсатор, тиристорно-управляемый последовательный конденсатор (TCSC), статический синхронный последовательный компенсатор (SSSC), универсальный регулятор потока мощности (UPFC) как устройство, включающее функцию последовательной компенсации. Предварительно решается задача расстановки устройств в ЭЭС, рассмотренная нами в [8], где оптимальная расстановка УПК минимизирует совместное влияние на один элемент нескольких устройств и одновременно максимизирует число элементов ЭЭС, на которые воздействует УПК.

В настоящей работе под оптимальным понимается режим, обеспечивающий электроснабжение потребителей с минимальными потерями в сетевых элементах при соблюдении требований надежности и качества электроэнергии [9]. Эти требования формулируются в виде векторного критерия качества или вектора скалярных критериев [10, 11]:

- отклонение напряжений узлов ЭЭС от их номинальных значений (показатель качества электроэнергии);
- потери активной мощности в линиях электропередачи (экономичность);
- соблюдение допустимой пропускной способности ЛЭП (надежность).

Математическая формулировка этих критериев определяет вектор целевых функций, используемый в многоцелевой оптимизации. Минимизация данных критериев приводит также к повышению статической и динамической устойчивости [12] режима ЭЭС. Задачи такого типа известны ресурсоемкостью, связанной многократными расчетами статических режимов ЭЭС. Для уменьшения объема расчетов режимов в статье применяется теория чувствительности электрических цепей [13], в частности, билинейная теорема (БТ) используется в работе для определения аналитических соотношений между параметрами УПК и параметрами режима ЭЭС [14, 15]. За счет аппроксимации уравнений, описывающих взаимосвязи параметров УПК и характеристик режима ЭЭС, значительно (на порядки!) снижается трудоемкость решения многоцелевой задачи.

Для минимизации векторного критерия качества в работе используется генетический алгоритм (ГА), который, несмотря на простоту, успешно справляется с этой задачей [16]. Большое число работ рассматривает определение наилучшего алгоритма оптимизации [17–19], сокращающего время решения задачи в разы. В данной статье предлагается сосредоточиться на получении эффективных аналитических соотношений, описывающих влияние УПК на ЭЭС и позволяющих уменьшить время решения задачи на несколько порядков.

Целью работы являются разработка и анализ алгоритма определения оптимальных по заданным критериям параметров УПК в ЭЭС большой размерности, основанного на теории чувствительности и методах многокритериальной оптимизации, обеспечивающего возможность регулирования установившихся режимов ЭЭС в реальном времени.

Скалярные целевые функции

Для записи целевых функций необходимо определить соотношения между параметрами УПК и параметрами режима ЭЭС. Вывод этих соотношений подробно описан в [20]. Однако

ранее рассматривались варианты ЭЭС с малым числом устройств. Необходимые выражения для напряжений и мощностей имеют форму (1) и (2) соответственно.

$$\dot{U}_{n,k} = \frac{\dot{a}_{n,k} + \dot{b}_{n,k}x_k}{1 + \dot{c}_{n,k}x_k}. \quad (1)$$

Здесь $\dot{U}_{n,k}$ – комплекс напряжения n -го узла, x_k – сопротивление ЛЭП, в которой установлено УПК, $\dot{a}_{n,k}$, $\dot{b}_{n,k}$, $\dot{c}_{n,k}$ – комплексные константы.

$$\dot{S}_{l,k}^{(b)} = P_{l,k}^{(b)} + jQ_{l,k}^{(b)} = \frac{\dot{a}_{l,k}^{(b)} + \dot{b}_{l,k}^{(b)}x_k + \dot{c}_{l,k}^{(b)}x_k^2}{1 + \dot{d}_{l,k}^{(b)}x_k + \dot{e}_{l,k}^{(b)}x_k^2}. \quad (2)$$

Здесь $\dot{S}_{l,k}^{(b)}$ – комплексная мощность начала ЛЭП под номером l , x_k – сопротивление ЛЭП, в которой установлено УПК, $\dot{a}_{l,k}^{(b)}$, $\dot{b}_{l,k}^{(b)}$, $\dot{c}_{l,k}^{(b)}$, $\dot{d}_{l,k}^{(b)}$, $\dot{e}_{l,k}^{(b)}$ – комплексные константы. Индекс (b) обозначает начало ЛЭП, при записи аналогичного выражения для конца линии используется индекс (e) . Далее из решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) определяются комплексные константы в выражениях (1) и (2). Погрешность определения параметров режима и обусловленности матриц СЛАУ подробно рассмотрены в [20]. Важным преимуществом использования БТ является независимость констант от режима работы ЭЭС, их пересчет выполняется лишь в случае изменения конфигурации сети.

В качестве параметров оптимизации используются сопротивления линий, а параметры УПК определяются как разность значений сопротивлений ЛЭП исходного режима и результата решения задачи оптимизации. Для записи целевых функций используем аналитические выражения критериев оптимальности: девиации D_n напряжения (3), потерь ΔP_l активной мощности (4) в ЛЭП и пропускной способности p_l ЛЭП (5), позволяющие записать вектор $\mathbf{F} = \{f_1; f_2; f_3\}$ целевых функций (6).

$$D_n = \frac{|\dot{U}_{n,k}| - U_{0,n}}{U_{0,n}}; \quad (3)$$

$$\Delta P_l = P_{l,k}^{(b)} - P_{l,k}^{(e)}; \quad (4)$$

$$p_l = \begin{cases} P_{l,k}^{(b)} - 0.8P_{nom}, & P_{l,k}^{(b)} \geq 0.8P_{nom} \\ 0.4P_{nom} - P_{l,k}^{(b)}, & P_{l,k}^{(b)} \leq 0.4P_{nom} \end{cases}, \quad (5)$$

где $U_{0,n}$ – напряжение узла n режима без УПК, P_{nom} – номинальная мощность линии l .

$$\mathbf{F} = \left\{ \sqrt{\frac{\sum_n D_n^2}{card(N)}}, \sqrt{\frac{\sum_l \Delta P_l^2}{card(L)}}, \sqrt{\frac{\sum_l p_l^2}{card(L)}} \right\}, \forall_{n \in N}, \forall_{l \in L}. \quad (6)$$

Финальная запись целевых функций (7.1–7.3) с применением БТ $\forall_{n \in N}, \forall_{l \in L}, \forall_{k \in K \subseteq L}$ имеет вид:

$$f_1 = \sqrt{\frac{1}{card(N)} \sum_n \frac{1}{U_{0,n}^2} \left(\left| \frac{\dot{a}_{n,k} + \dot{b}_{n,k}x_k}{1 + \dot{c}_{n,k}x_k} \right| - U_{0,n} \right)^2}; \quad (7.1)$$

$$f_2 = \sqrt{\frac{1}{\text{card}(L)} \sum_l \left(\Re \left(\frac{\dot{a}_{l,k}^{(b)} + \dot{b}_{l,k}^{(b)} x_k + \dot{c}_{l,k}^{(b)} x_k^2}{1 + \dot{d}_{l,k}^{(b)} x_k + \dot{e}_{l,k}^{(b)} x_k^2} - \frac{\dot{a}_{l,k}^{(e)} + \dot{b}_{l,k}^{(e)} x_k + \dot{c}_{l,k}^{(e)} x_k^2}{1 + \dot{d}_{l,k}^{(e)} x_k + \dot{e}_{l,k}^{(e)} x_k^2} \right) \right)^2}; \quad (7.2)$$

$$f_3 = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{\text{card}(L)} \sum_l \left(\Re \left(\frac{\dot{a}_{l,k}^{(b)} + \dot{b}_{l,k}^{(b)} x_k + \dot{c}_{l,k}^{(b)} x_k^2}{1 + \dot{d}_{l,k}^{(b)} x_k + \dot{e}_{l,k}^{(b)} x_k^2} \right) - 0.8P_{nom} \right)^2}, & P_l \geq 0.8P_{nom} \\ \sqrt{\frac{1}{\text{card}(L)} \sum_l \left(0.4P_{nom} - \Re \left(\frac{\dot{a}_{l,k}^{(b)} + \dot{b}_{l,k}^{(b)} x_k + \dot{c}_{l,k}^{(b)} x_k^2}{1 + \dot{d}_{l,k}^{(b)} x_k + \dot{e}_{l,k}^{(b)} x_k^2} \right) \right)^2}, & P_l \leq 0.4P_{nom} \end{cases}. \quad (7.3)$$

Здесь N и L – множества узлов и ветвей графа ЭЭС, находящихся под воздействием УПК. Множество $K \subseteq L$ является множеством номеров ЛЭП, в которых установлены УПК. Для работы алгоритма и записи целевых функций узлы перенумеровываются, так как в исходных данных схемы IEEE-300 номера имеют техническое значение¹.

Алгоритм определения параметров УПК

Для определения оптимальных параметров УПК рассмотрены пять вариантов расстановки устройств, отличающиеся числом и положением устанавливаемых УПК. Предлагаемый алгоритм исследуется на неоднократно рассмотренной различными группами исследователей схеме IEEE-300², используемой здесь в качестве тестовой для верификации подхода авторов и оценки возможности его использования в режиме реального времени. Варианты расстановки УПК представлены в табл. 1, где порядковые номера ветвей соответствуют указанным выше данным³, на рис. 1 обозначены темно-коричневым цветом. Зеленым цветом выделены позиции УПК при расстановке шести УПК, красными и синими треугольниками – варианты расстановки для семи УПК, а окружностями тех же цветов – для восьми УПК (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Варианты расстановки устройств

Table 1

Device placement options

Расстановка УПК	Номера ветвей с устройствами	Обозначение на схеме
6	60, 82, 128, 214, 317, 332	зеленый
7.1	60, 82, 128, 185, 214, 317, 332	красный треугольник
7.2	53, 82, 128, 164, 214, 317, 332	синий треугольник
8.1	53, 82, 128, 164, 185, 214, 317, 332	красная окружность
8.2	53, 82, 128, 164, 175, 214, 317, 332	синяя окружность

Все рассматриваемые расстановки УПК не имеют узлов и(или) ветвей, находящихся под воздействием более чем одного УПК, метод получения таких расстановок рассмотрен нами в [8].

¹ Отдел энергетики Института социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми научного центра УрО Российской АН. Тестовые схемы. Режим доступа: http://energy.komisc.ru/dev/test_cases#Link_3 (дата обращения: 11.10.2025).

² Там же.

³ Там же.

Это позволяет использовать однопараметрическую запись БТ, что значительно упрощает оценку целевых функций и позволяет использовать рассматриваемый подход для моделей относительно большой размерности. Именно поэтому в качестве схемы для исследования предлагаемого подхода выбрана IEEE-300 узловая схема, в то время как большинство исследователей решает аналогичные задачи на схемах в несколько десятков узлов [6, 7, 9].

Для снижения вычислительной сложности задачи, помимо определения констант БТ, одновременно определяется и зона влияния УПК. Как показано в [15], для моделей ЭЭС малой размерности зоны действия устройств на напряжения узлов и мощности, передаваемые по линиям, существенно различаются. При фиксированной расстановке УПК рассчитываются и хранятся данные о зонах влияния устройства. Для определения зоны влияния УПК рассчитываются режимы ЭЭС при установке одного устройства с нулевым и максимальным значениями его параметра, из которых определяются отклонения напряжений в узлах и изменения активных мощностей линий. Отклонения напряжения вычисляются по формуле (3), аналогично вычисляются и отклонения активной мощности в начале линии. Формально каждое устройство влияет на всю систему, поэтому введем понятие «слабого» влияния, когда относительное изменение мощности и напряжения при действии УПК не превосходит 1%. Величина такого порога обоснована в [15] и уже для схем малой размерности существенно упрощает расчеты, не снижая их валидности. Информация о зонах влияния хранится в матрицах размерности $card(K)*card(L)$ и $card(K)*card(N)$ для мощности и напряжения соответственно, а элементы матриц определяются формулами (8).

$$\Delta_{k,l} = \begin{cases} 1, & D_l \geq 1\% \\ 0, & D_l < 1\% \end{cases}, \quad \forall_{k \in K}, \forall_{l \in L}; \quad \Delta_{k,n} = \begin{cases} 1, & D_n \geq 1\% \\ 0, & D_n < 1\% \end{cases}, \quad \forall_{k \in K}, \forall_{n \in N}. \quad (8)$$

В работе использованы относительные значения функций цели, нормирование выполнено с помощью вектора $\mathbf{F}_0 = \{f_{1,0}; f_{2,0}; f_{3,0}\}$, при подстановке значений сопротивления ЛЭП из исходных данных ЭЭС, соответственно, минимизируемая вектор функцию имеет вид:

$$\mathbf{F} = \{f_1/f_{1,0}; f_2/f_{2,0}; f_3/f_{3,0}\}. \quad (9)$$

Результаты применения алгоритма

Выполненные расчеты показали, что для определения оптимальных по выбранным критериям параметров УПК достаточно $\sim 2 \cdot 10^5$ оценок скалярных целевых функций. При стандартном подходе, не использующем БТ, столько же раз необходимо рассчитать установившийся режим в исследуемой цепи посредством специализированного программного обеспечения. Эта оценка справедлива при существенном дистанцировании рассчитываемых режимов от границ устойчивости, в противном случае число необходимых расчетов режима дополнительно увеличится. При использовании описанного в статье алгоритма число расчетов режима для шести одновременно установленных УПК составляет 30, для семи – 35 и для восьми – 40. Некоторое уменьшение времени оценки скалярных целевых функций с ростом числа устройств связано с лучшей сходимостью ГА. Повышение скорости сходимости ГА с увеличением числа устройств можно связать с повышением регулируемости ЭЭС, а именно – с увеличением числа элементов сети, зависимых от УПК. Число расчетных режимов определяется исключительно числом констант и числом УПК, следовательно, никак не зависит от изменения настроек ГА. Поэтому суммарная трудоемкость задачи поиска наилучших параметров УПК многократно снижается, позволяя управлять УПК в реальном времени. Полученные в результате работы алгоритма множества Парето-оптимальных решений представлены на рис. 2.

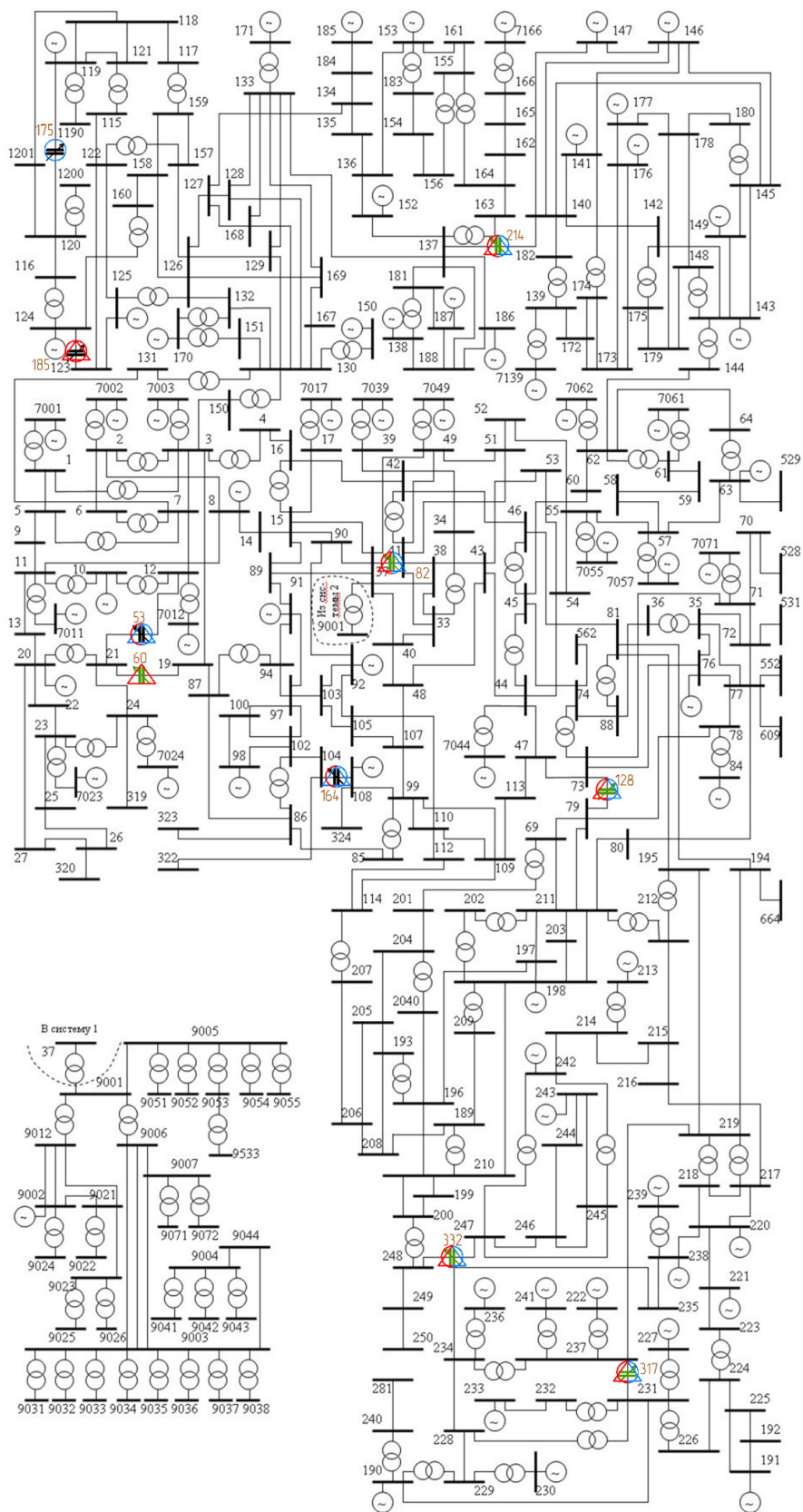


Рис. 1. Расстановка УПК на схеме IEEE-300

Fig. 1. IEEE-300 scheme with indication of the SCD arrangement

Решения, полученные с помощью ГА, представляют собой множество поверхностей (рис. 2). Детальный анализ подобных неструктурированных множеств обычно выполняется с применением методов кластеризации, что выходит за рамки настоящей статьи. Здесь для визуализации решений была выбрана поверхность с минимальными значениями целевых функций f_1 и f_2 .

Отметим ряд характерных свойств полученных фронтов Парето:

- снижение значений целевых функций в целом не превышает 3% и ожидаемо усиливается с увеличением количества УПК; для ряда вариантов расстановки изменение превышает 3% и 4%, что определяет наилучшие положения УПК;

- размерность всех полученных множеств Парето далека от 2D, ближе к 1D, что, во-первых, существенно сужает область поиска наилучшего режима и, во-вторых, несет важную количественную информацию о неочевидных функциональных связях критериев – так, снижение девиации напряжений узлов ведет к увеличению потерь в сетевых элементах (см. зависимости $f_2(f_1)$ на рис. 3–7);

- фронт Парето для шести УПК имеет три компоненты связности, для семи УПК – две, а для восьми УПК является односвязным, что, по нашему мнению, соответствует повышению управляемости режимом с увеличением количества УПК.

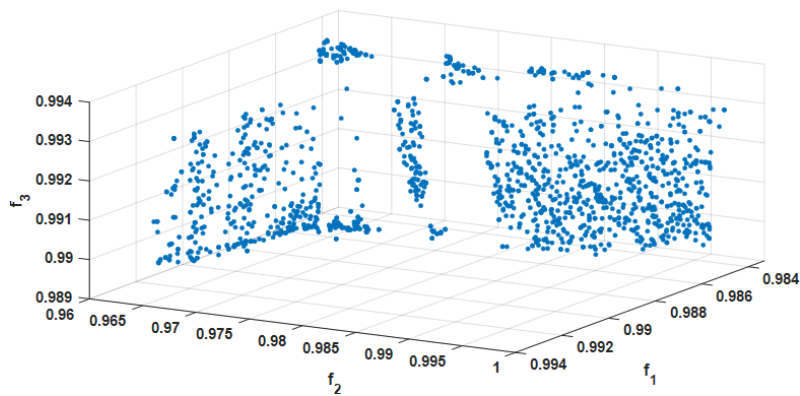


Рис. 2. Фронт Парето при установке восьми УПК (вариант 1)

Fig. 2. Pareto Front for eight SCDs (option 1)

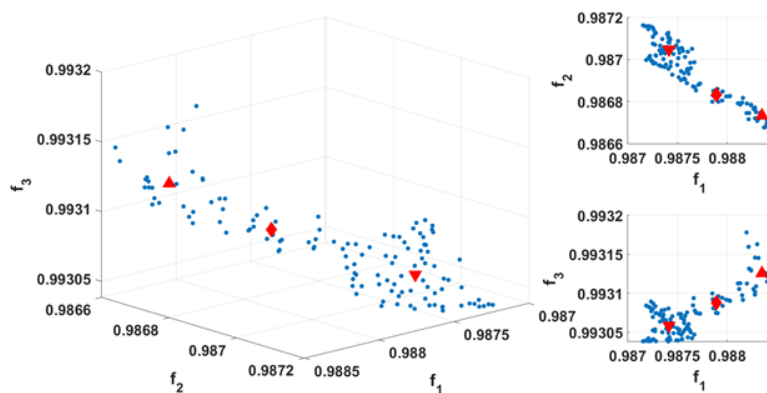


Рис. 3. Фрагмент фронта Парето при установке шести УПК

Fig. 3. Pareto front fragment for six SCDs

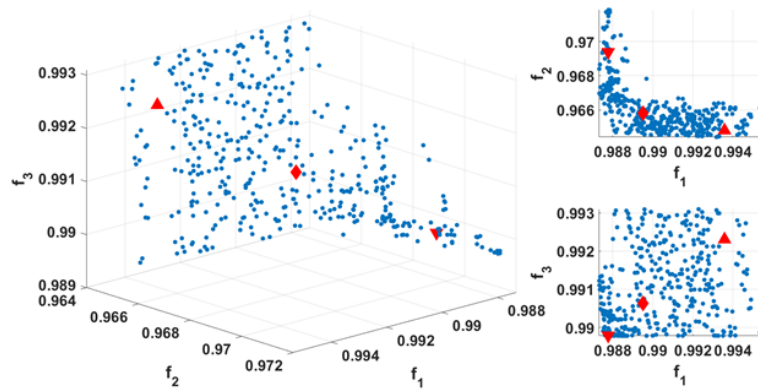


Рис. 4. Фрагмент фронта Парето при установке семи УПК (вариант 1)

Fig. 4. Pareto front fragment for seven SCDs (option 1)

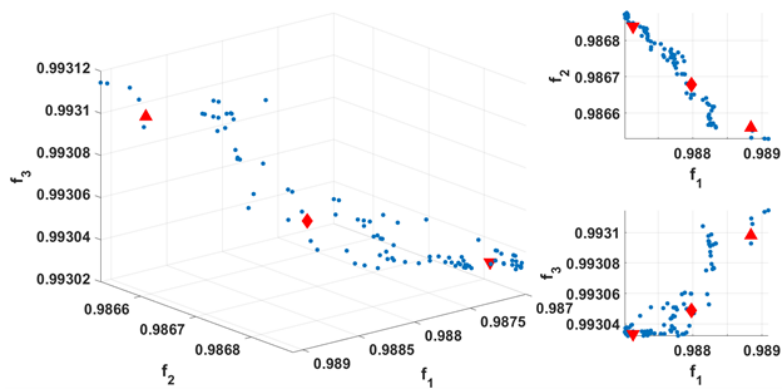


Рис. 5. Фрагмент фронта Парето при установке семи УПК (вариант 2)

Fig. 5. Pareto front fragment for seven SCDs (option 2)

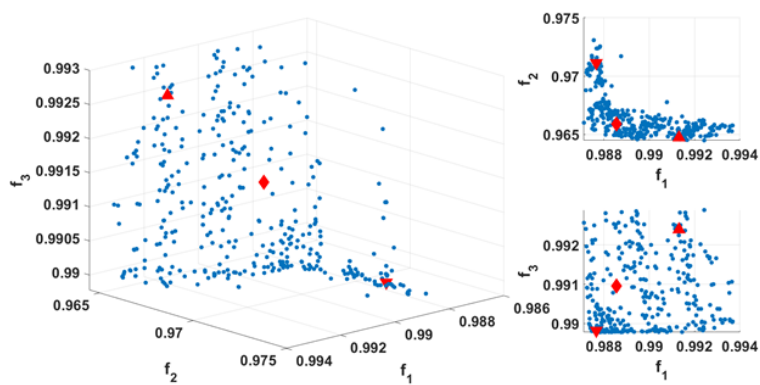


Рис. 6. Фрагмент фронта Парето при установке восьми УПК (вариант 1)

Fig. 6. Pareto front fragment for eight SCDs (option 1)

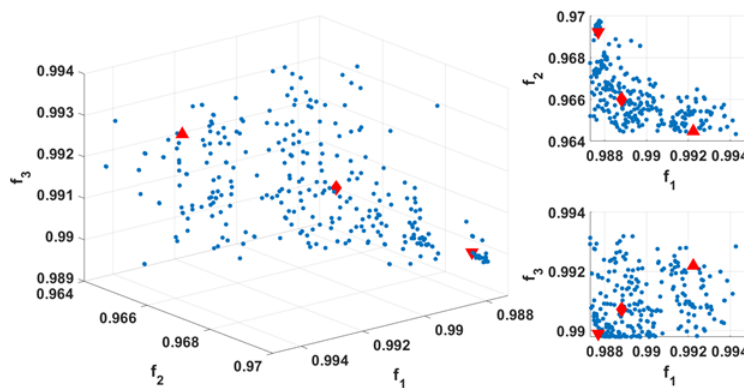


Рис. 7. Фрагмент фронта Парето при установке восьми УПК (вариант 2)

Fig. 7. Pareto front fragment for eight SCDs (option 2)

После получения множества Парето остается открытым один из наиболее сложных в многоцелевой оптимизации в целом вопрос о наилучшем решении. Очевидно, что изучение только свойств полученного решения не может дать ответа на этот вопрос, так как множество Парето уже содержит все оптимальные решения. Следовательно, для выбора «наилучшего» из них необходима дополнительная, не содержащаяся в постановке решенной задачи информация. К настоящему времени разработан ряд достаточно сложных алгоритмов сужения множества Парето [21, 22], рассмотрение которых выходит за рамки настоящей статьи. Здесь выполним разделение фронта Парето на три зоны (кластера) с различающимися значениями вектор-функций и выберем в каждой зоне одну характерную точку (помечены на рис. 2 маркерами « Δ », « \diamond » и « ∇ »). Характеристики выделенных точек сведены в табл. 2. В третьем столбце табл. 2 указаны сопротивления (приведенные к исходным значениям) для ЛЭП, оснащенных УПК, перечень соответствует порядку их нумерации в табл. 1. В четвертом столбце приведены относительные изменения целевых функций, в пятом — элементы ЭЭС, находящиеся под влиянием УПК, в последнем — значения относительного уменьшения девиации в зоне покрытия, а также суммарные скомпенсированные потери мощности для ЛЭП, входящих в эту зону.

Точки выбраны в порядке уменьшения относительно значений функции f_3 . Можно предположить, что наиболее перспективные кандидаты на наилучшее решение находятся в области 2, однако финальный выбор остается за лицом, принимающим решение (ЛПР), — диспетчером, ведущим режим, в нашем случае. Можно видеть, что полученные параметры УПК ведут к уменьшению девиации напряжения узлов в среднем на 1%, снижению потерь на 2,5%, увеличению пропускной способности примерно на 1% в зоне покрытия. Исходя из числа покрываемых элементов и диапазонов изменения целевых функций можно сказать, что наибольший потенциал для регулирования имеют варианты 7.1 и 8.1.

Дискуссия

Несмотря на эффективность предложенного алгоритма построения множества Парето и получения значений относительных целевых функций ниже единицы, вопрос сужения множества Парето остается открытым, и анализ получаемых оптимальных множеств требует дальнейшей проработки.

Исходно принятое положение об отсутствии совместного влияния нескольких УПК на элементы сети не всегда (не для всех схем) является корректным. Отказ от него потребует применения многопараметрической БТ и более точного определения зон влияния и параметров УПК, что усложнит алгоритм и увеличит время его работы. Тем не менее, по мнению авторов, использование предложенного подхода в реальном времени будет возможно.

Таблица 2

Представители множества Парето

Table 2

Representatives of the Pareto set

Расстановка УПК	Точка	Приведенный вектор параметров, %	Улучшение целевых функций, %	Число покрытых элементов ЭЭС		Суммарное регулирование	
				Узлы	Ветви	D, %	ΔP , МВт
6	1	99.2, 70.4, 95.5, 94.8, 99.2, 99.5	1.2, 1.3, 0.7	101	14	5.31	3.33
	2	99.6, 70.2, 96.1, 95.7, 98.8, 98.8	1.2, 1.3, 0.7	91	13	4.91	3.27
	3	99.4, 70.1, 88.5, 96.3, 98.9, 99.4	1.3, 1.3, 0.7	78	11	4.52	3.33
7.1	1	92.7, 96.7, 91.7, 98.7, 94, 89.7, 79.3	0.6, 3.5, 0.8	98	24	3.15	7.47
	2	92.7, 97.2, 91.7, 98.5, 95.7, 97.6, 74.9	1.0, 3.4, 0.9	82	22	2.31	7.57
	3	92.8, 82, 90.7, 96.7, 96.4, 99, 72.8	1.2, 3.1, 1.0	100	31	3.86	9.34
7.2	1	99.6, 70.3, 95.9, 97.8, 94.8, 99.3, 98.8	1.1, 1.3, 0.7	107	13	5.61	3.27
	2	99.3, 70.1, 96.1, 96.8, 95.7, 99.5, 97.	1.2, 1.3, 0.7	99	13	5.15	3.27
	3	99.7, 70, 87.9, 96.9, 96, 100, 99.3	1.3, 1.3, 0.7	92	13	4.87	3.32
8.1	1	92.7, 97.1, 95.3, 97.8, 98.9, 96.3, 94.7, 79.4	0.9, 3.5, 0.8	101	21	3.1	7.46
	2	92.7, 92.5, 93.5, 98.9, 99.3, 97.6, 98, 75.7	1.1, 3.4, 0.9	85	23	2.42	7.78
	3	92.8, 77.8, 77.2, 96.8, 99, 97.1, 97.5, 73	1.2, 2.9, 1.0	132	35	6.47	11.31
8.2	1	92.6, 96.7, 89, 97.4, 98.1, 93.8, 98, 79	0.8, 3.6, 0.8	106	21	3.46	7.46
	2	92.7, 93.2, 91.7, 98.3, 98.5, 96.2, 98.9, 75.2	1.1, 3.4, 0.9	84	24	2.5	7.78
	3	92.7, 82.2, 89.9, 97.1, 97, 97, 96.1, 73.1	1.2, 3.1, 1.0	97	29	3.62	9.33

Выводы

1. Предложен алгоритм, позволяющий решить задачу определения оптимальных параметров УПК при заданной расстановке для схем ЭЭС с сотнями и даже тысячами узлов. Показана применимость алгоритма к работе в режиме реального времени. Число расчетов режимов при использовании алгоритма сокращается в среднем в $6 \cdot 10^3$ раз. Дополнительным преимуществом алгоритма является предварительно определенная зона влияния устройств на параметры режима в элементах ЭЭС, что важно для устройств автоматического регулирования, которые в будущем могут использовать данный алгоритм для регулирования УПК в режиме реального времени.

2. Эффективная работа алгоритма подтверждена его применением к оптимизации параметров УПК для типовой сети IEEE с 300 узлами.

3. Определяемые в ходе предложенного подхода константы БТ и зона влияния УПК актуальны при сохранении конфигурации сети и постоянстве генерируемой ЭЭС мощности. Такие изменения приведут к пересчету режимов, что незначительно повышает время работы алгоритма. Это дает возможность использования данного подхода в реальном времени, и при изменениях генерации или конфигурации сети время работы алгоритма изменяется незначительно.

4. Приведен анализ физического влияния устройств на ЭЭС. Анализ подобных влияний классическими методами практически невозможен, что делает применение многокритериальной оптимизации необходимостью при рассмотрении вопросов настройки УПК. Классические методы чаще сводятся к решению конкретных локальных задач без учета влияния на всю систему.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Belyaev N.A., Korovkin N.V., Frolov O.V., Chudny V.S.** Enhancing efficiency and performance of electric power systems by using smart grid technology, 2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, (2013) 846–849.

[2] **Belyaev N.A., Korovkin N.V., Chudny V.S., Frolov O.V.** Clustering of electric network for effective management of Smart grid, 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), (2014) 1987–1990. DOI: 10.1109/ISIE.2014.6864921

[3] **Shehata A.A., Tolba M.A., El-Rifaie A.M., Korovkin N.V.** Power system operation enhancement using a new hybrid methodology for optimal allocation of FACTS devices, Energy Reports, 8 (2022) 217–238. DOI: 10.1016/j.egy.2021.11.241

[4] **Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б., Попов М.М.** Режимы работы микрогидроэлектростанции со стабилизацией выходного напряжения при помощи управления инвертором // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 8. С. 51–58. DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4190

[5] **Ananth D.V.N., Sureshkumar L.V., Boddepalli M.** Modelling and Design of Static Compensator and UPFC Based FACTS Devices for Power System Oscillations Damping and Voltage Compensation. Intelligent Computing in Control and Communication, 702 (2021) 357–371. DOI: 10.1007/978-981-15-8439-8_29

[6] **Abdelmalek Z., Chemachema M., Sofiane B., Boulkaibet I.** Fault Tolerant Predictive Control for Constrained Hybrid Systems with Sensors Failures, Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Applications (ICEECA), 682 (2019) 973–984. DOI: 10.1007/978-981-15-6403-1_67

[7] **Akbari E., Shabestari S.F.M., Pirouzi S., Jadidoleslam M.** Network flexibility regulation by renewable energy hubs using flexibility pricing-based energy management, Renewable Energy, 206 (2023) 295–308. DOI: 10.1016/j.renene.2023.02.050

[8] **Воронин И.С., Коровкин Н.В., Долбин К.С.** Оптимальная расстановка активно-адаптивных устройств для моделей энергосистем большой размерности // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 4. С. 26–40. DOI: 10.18721/JEST.31402

[9] **Дерзский В.Г., Скиба В.Ф.** Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в распределительных сетях // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2009. № 8. С. 55–58.

[10] **Korovkin N.V., Krivosheev S.I., Shishigin D.S., Minevich T.G., Boronin V.N.** Mathematical modeling of grounding systems under impact of pulse currents, IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIcon Rus), (2018) 686–691. DOI: 10.1109/EIconRus.2018.8317187

- [11] **Dolbin K.S.** Fast algorithm for obtaining mathematical relations for optimizing the operating mode of an electric power system, *E3S Web of Conferences*, 551 (2024) 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/202455101009
- [12] **Smolovik S.V., Chudny V.S., Liamov A.S., Ryndina I.E., Denisenko A.I.** Application of a static synchronous series compensator to increase the transient stability of a powerful HPP, *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, (2021) 1562–1565. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396305
- [13] **Гехер К.** Теория чувствительности и допусков электронных цепей. Москва: Сов. радио, 1973.
- [14] **Dolbin K.S.** A fast algorithm for estimating the voltage deviation of the nodes of an electrical power system with longitudinal compensation, *2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES)*, (2023) 1–5. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378785
- [15] **Dolbin K.S.** Algorithm for determining the optimal position and selection of parameters of devices for longitudinal reactive power compensation using the bilinear theorem, *2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon)*, (2024) 346–349. DOI: 10.1109/EICon61730.2024.10468517
- [16] **Janković Z., Vesin B.** Clean Genetic Algorithm Architecture for Improved Modularity and Extensibility, *2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES)*, (2023) 1–4. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378827
- [17] **Ђурана П., Хок О., Данко М.** Optimisation of Reactive Energy Flow in Public Lighting Systems, *2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES)*, (2023) 1–4. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378758
- [18] **Altayara I.A., Bin Salamah Y., Al-Ammar E.A.** Power Quality Disturbance Detection using Autoencoder Neural Network, *2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES)*, (2023) 1–4. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378776
- [19] **Alhaider M.M.** Optimal Placement of Capacitor in the Distribution Grids using Dragonfly Algorithm, *2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES)*, (2023) 1–6. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378770
- [20] **Dolbin K.S.** Algorithm for Minimizing the Error in Determining the Currents and Voltages of a Linear Electrical Circuit by Means of a Bilinear Theorem, *2023 Seminar on Networks, Circuits and Systems (NCS)*, (2023) 39–44. DOI: 10.1109/NCS60404.2023.10397477
- [21] **Бекузин В., Железняк В., Коровкин Н.** Сужение множества Парето на основе выборки предпочтений и попарной обработки критериев для оптимизации конструкции турбогенераторов // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2025. № 2. С. 95–113. DOI: 10.7868/S3034649525020075
- [22] **Ногин В.Д.** Алгоритм сужения множества Парето на основе произвольного конечного набора «квантов» информации // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2013. № 1. С. 63–69.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ДОЛБИН Кирилл Сергеевич – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: kirill.dolbin.02@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6112-1297>

КОРОВКИН Николай Владимирович – заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1173-8727>

ВОРОНИН Илья Сергеевич – студент магистратуры, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: isvoronin@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7655-2921>

REFERENCES

- [1] **N.A. Belyaev, N.V. Korovkin, O.V. Frolov, V.S. Chudny**, Enhancing efficiency and performance of electric power systems by using smart grid technology, 2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, (2013) 846–849.
- [2] **N.A. Belyaev, N.V. Korovkin, V.S. Chudny, O.V. Frolov**, Clustering of electric network for effective management of Smart grid, 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), (2014) 1987–1990. DOI: 10.1109/ISIE.2014.6864921
- [3] **A.A. Shehata, M.A. Tolba, A.M. El-Rifaie, N.V. Korovkin**, Power system operation enhancement using a new hybrid methodology for optimal allocation of FACTS devices, Energy Reports, 8 (2022) 217–238. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.11.241
- [4] **B.V. Lukutin, E.B. Shandarova, M.M. Popov**, Operating modes of micro-hydroelectric power plant with output voltage stabilization using inverter control, Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 334 (8) (2023) 51–58. DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4190
- [5] **D.V.N. Ananth, L.V. Sureshkumar, M. Boddepalli**, Modelling and Design of Static Compensator and UPFC Based FACTS Devices for Power System Oscillations Damping and Voltage Compensation. Intelligent Computing in Control and Communication, 702 (2021) 357–371. DOI: 10.1007/978-981-15-8439-8_29
- [6] **Z. Abdelmalek, M. Chemachema, B. Sofiane, I. Boulkaibet**, Fault Tolerant Predictive Control for Constrained Hybrid Systems with Sensors Failures, Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Applications (ICEECA), 682 (2019) 973–984. DOI: 10.1007/978-981-15-6403-1_67
- [7] **E. Akbari, S.F.M. Shabestari, S. Pirouzi, M. Jadidoleslam**, Network flexibility regulation by renewable energy hubs using flexibility pricing-based energy management, Renewable Energy, 206 (2023) 295–308. DOI: 10.1016/j.renene.2023.02.050
- [8] **I.S. Voronin, N.V. Korovkin, K.S. Dolbin**, Optimal allocation of FACTS devices for large-scale power system models, Global Energy, 31 (04) (2025) 26–40, DOI: 10.18721/JEST.31402
- [9] **V.G. Derzskii, V.F. Skiba**, Vybór meropriyatii po snizheniiu poter' elektroenergii v raspredelitel'nykh setiakh [Selection of measures to reduce electricity losses in distribution networks], Energy saving. Power engineering. Energy audit, 8 (2009) 55–58.
- [10] **N.V. Korovkin, S.I. Krivosheev, D.S. Shishigin, T.G. Minevich, V.N. Boronin**, Mathematical modeling of grounding systems under impact of pulse currents, IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (2018) 686–691. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317187
- [11] **K.S. Dolbin**, Fast algorithm for obtaining mathematical relations for optimizing the operating mode of an electric power system, E3S Web of Conferences, 551 (2024) 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/202455101009
- [12] **S.V. Smolovik, V.S. Chudny, A.S. Liamov, I.E. Ryndina, A.I. Denisenko**, Application of a static synchronous series compensator to increase the transient stability of a powerful HPP, 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (2021) 1562–1565. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396305
- [13] **K. Géher**, Theory of Network Tolerances, Budapest: Akadémiai Kiadó, 1971.
- [14] **K.S. Dolbin**, A fast algorithm for estimating the voltage deviation of the nodes of an electrical power system with longitudinal compensation, 2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), (2023) 1–5. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378785

- [15] **K.S. Dolbin**, Algorithm for determining the optimal position and selection of parameters of devices for longitudinal reactive power compensation using the bilinear theorem, 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), (2024) 346–349. DOI: 10.1109/ElCon61730.2024.10468517
- [16] **Z. Janković, B. Vesin**, Clean Genetic Algorithm Architecture for Improved Modularity and Extensibility, 2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), (2023) 1–4. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378827
- [17] **P. Đurana, O. Hock, M. Danko**, Optimisation of Reactive Energy Flow in Public Lighting Systems, 2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), (2023) 1–4. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378758
- [18] **I.A. Altayara, Y. Bin Salamah, E.A. Al-Ammar**, Power Quality Disturbance Detection using Autoencoder Neural Network, 2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), (2023) 1–4. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378776
- [19] **M.M. Alhaider**, Optimal Placement of Capacitor in the Distribution Grids using Dragonfly Algorithm, 2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), (2023) 1–6. DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378770
- [20] **K.S. Dolbin**, Algorithm for Minimizing the Error in Determining the Currents and Voltages of a Linear Electrical Circuit by Means of a Bilinear Theorem, 2023 Seminar on Networks, Circuits and Systems (NCS), (2023) 39–44. DOI: 10.1109/NCS60404.2023.10397477
- [21] **V.I. Bekuzin, N.V. Korovkin, V.N. Zheleznyak**, Pareto Set Narrowing Based on Preference Sampling and Pairs of Criteria Processing for Turbogenerator Design Optimization, Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energetics, 2 (2025) 95–113. DOI: 10.7868/S3034649525020075
- [22] **V.D. Nugin**, Algoritm suzheniia mnozhestva Pareto na osnove proizvol'nogo konechnogo nabora "kvantov" informatsii [An algorithm for narrowing the Pareto set based on an arbitrary finite set of information "quanta"], Artificial Intelligence and Decision Making, 1 (2013) 63–69.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Kirill S. DOLBIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: kirill.dolbin.02@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6112-1297>

Nikolay V. KOROVKIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1173-8727>

Iliia S. VORONIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: isvoronin@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7655-2921>

Поступила: 20.11.2025; Одобрена: 15.03.2026; Принята: 15.03.2026.
Submitted: 20.11.2025; Approved: 15.03.2026; Accepted: 15.03.2026.

Научная статья

УДК 628.539:582.263

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32102>



Н.А. Политаева, П.С. Шинкевич , А.М. Опарина

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

 ps.shinkevich@gmail.com

БИОФИЛЬТРАЦИЯ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ТЭЦ БИОМАССОЙ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ

Аннотация. Статья посвящена методу улавливания углекислого газа от выбросов тепловых электростанций (ТЭЦ). Рассмотрены различные методы для поглощения углекислого газа, абсорбция, каталитическая очистка, криогенная очистка и др. Изучены их достоинства и недостатки. В качестве альтернативного метода улавливания углекислого газа из дымовых газов предлагается метод биофльтрации дымовых газов ТЭЦ биомассой микроводорослей. Данный способ позволяет уловить углекислый газ и при этом получить биомассу микроводорослей, которая может использоваться на корм скоту, в качестве удобрения, как сырье для получения биодизеля и других ценных компонентов и продуктов. В работе представлены результаты исследования поглощения углекислого газа из дымовых газов ТЭЦ Санкт-Петербурга. Показано, что скорость поглощения углекислого газа суспензией микроводорослей составила $0,312 \text{ г CO}_2 \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$. Предложена блок-схема очистки дымовых газов ТЭЦ с использованием биофльтрации биомассой микроводорослей.

Ключевые слова: дымовые газы, очистка, биофльтрация, биомасса микроводорослей, декарбонизация.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда в рамках реализации проекта «Разработка технологий улавливания CO_2 из отработанных дымовых газов энергетических и промышленных установок биомассой микроводорослей» (Соглашение № 24-17-20004, <https://rscf.ru/project/24-17-20004/>).

Для цитирования:

Политаева Н.А., Шинкевич П.С., Опарина А.М. Биофльтрация дымовых газов ТЭЦ биомассой микроводорослей // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 1. С. 22–34. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32102>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32102>*N.A. Politaeva, P.S. Shinkevich* ✉, *A.M. Oparina*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia✉ ps.shinkevich@gmail.com

BIOFILTRATION OF THERMAL POWER PLANT FLUE GASES USING MICROALGAE BIOMASS

Abstract. The article discusses the method of capturing carbon dioxide from the emissions of thermal power plants (TPP). Various methods for carbon dioxide absorption, catalytic purification, cryogenic purification, etc. are considered. Their advantages and disadvantages are studied. As an alternative method for capturing carbon dioxide from flue gases, a method of biofiltration of TPP flue gases with microalgae biomass is proposed. This method allows capturing carbon dioxide and at the same time obtaining microalgae biomass, which can be used as animal feed, as a fertilizer, as a raw material for the production of biodiesel and other valuable components and products. The paper presents the results of a study of carbon dioxide absorption from flue gases of a TPP in St. Petersburg. It is shown that the rate of carbon dioxide absorption by a microalgae suspension was $0.312 \text{ g CO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ day}^{-1}$. A block diagram of TPP flue gas purification using biofiltration with microalgae biomass is proposed.

Keywords: flue gases, purification, biofiltration, microalgae biomass, decarbonization.

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-17-20004 “Development of technologies for capturing CO_2 from exhaust gases of power and industrial plants using microalgae biomass”. Available online: <https://rscf.ru/project/24-17-20004/>

Citation:

Politaeva N.A., Shinkevich P.S., Oparina A.M., Biofiltration of thermal power plant flue gases using microalgae biomass, *Global Energy*, 32 (01) (2026) 22–34, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32102>

Введение. Тепловые электростанции (ТЭЦ) являются важным источником электроэнергии во многих странах. К сожалению, при работе ТЭЦ происходят выбросы вредных веществ в атмосферу. Одной из основных причин выбросов от ТЭЦ является сжигание топлива для производства электроэнергии. При этом происходит выделение углекислого газа, играющего ключевую роль в глобальном потеплении. Для минимизации негативного воздействия ТЭЦ на окружающую среду используют очистные сооружения, которые позволяют уловить дымовые газы и снизить выбросы вредных веществ. Следует отметить, что применение дополнительных установок для дальнейшего снижения выбросов вредных веществ приведет к резкому удорожанию ТЭЦ на 30–90%. В настоящее время природоохранные затраты составляют от 25 до 40% капитальных затрат на строительство ТЭЦ.

К основным выбросам ТЭЦ относятся частицы золы, NO_x , CO , SO_2 , CO_2 . В условиях перехода энергетики к низкоуглеродному развитию особую актуальность приобретает формирование сценариев декарбонизации тепло- и электроэнергетики, направленных на снижение углеродного следа за счет уменьшения выбросов CO_2 [1]. Типичные концентрации CO_2 в дымовых газах тепловых электростанций составляют порядка 7–15% (об.). Ежегодно в атмосферу за счет сжигания всех видов топлива поступает 35 млрд тонн CO_2 , что обуславливает необходимость создания эффективных технологий его селективного извлечения из отходящих газов [2]. Для

CO₂ предельно допустимые концентрации в атмосферном воздухе не нормированы, поскольку он не относится к числу токсичных веществ. Вместе с тем в производственных и жилых помещениях превышение объемной доли CO₂ свыше 0,6 % считается нежелательным, так как длительное воздействие таких концентраций приводит к утомляемости, головным болям и другим неблагоприятным изменениям в организме человека.

Для удаления CO₂ из газовых выбросов в промышленности в основном используют жидкофазные методы поглощения, основанные на контакте газа с растворами различных поглотителей. В качестве растворов-абсорбентов используются вода, растворы щелочей, карбонатов, органические поглотители и др.

Поглощение CO₂ водой основано на его растворимости в ней. На практике водную промывку обычно применяют как стадию предварительной очистки и проводят ее при температурах порядка 5–15°С и повышенном давлении 1,0–3,0 МПа. При таких условиях степень извлечения CO₂ достигает примерно 70–80%. В системах, работающих под давлением, регенерацию поглотительного раствора и выделение CO₂ целесообразно осуществлять путем снижения давления в специальных аппаратах-регенераторах.

При использовании водных растворов щелочей (NaOH, KOH) связывание CO₂ происходит за счет химических реакций с образованием карбонатов и гидрокарбонатов. Такие системы поглощения целесообразно применять в основном для глубокой доочистки сравнительно небольших газовых потоков с умеренным содержанием CO₂. Для больших объемов газа с точки зрения экономичности предпочтительны процессы, предусматривающие регенерацию поглотителя и многократное его использование.

Заметное практическое распространение получили также схемы абсорбции диоксида углерода растворами карбонатов натрия и калия (Na₂CO₃, K₂CO₃), проявляющих щелочные свойства вследствие гидролиза.

В качестве органических поглотителей CO₂ применяют как физические абсорбенты (например, метанол, ацетон), так и хемосорбенты на основе водных растворов этаноламинов. Растворы моно-, ди- и триэтаноламина обеспечивают более высокую селективность и степень очистки газа от диоксида углерода и потому широко используются в промышленных процессах очистки газов [3].

Помимо традиционных абсорбционных методов существуют менее распространенные подходы к поглощению CO₂, например электрохимический метод («сульфатный цикл»), каталитическая и сорбционная очистка, а также вымораживание диоксида углерода. Процесс вымораживания основан на сублимации CO₂ при температуре около –78°С и позволяет отделять его в виде твердой снегообразной фазы.

Сорбционные технологии, в частности циклическое перемещение оксида кальция между реакторами с кипящим слоем (поглощение CO₂ при пониженной температуре и разложение карбоната при повышенной), ориентированы преимущественно на угольные электростанции с высокими удельными выбросами и дополняются широким спектром современных твердых сорбентов [4].

Перспективным направлением является применение ферментативных систем, в которых ферментативное превращение CO₂ в бикарбонат в жидкой фазе и использование фермент-модифицированных мембран обеспечивают ускорение массопереноса по сравнению с традиционными полимерными мембранами примерно в 2,5 раза [5]. Дополнительно интенсивно развиваются мембранные методы разделения, отличающиеся относительной простотой и возможностью избирательного пропускания компонентов газовой смеси при минимальных капитальных затратах.

Многие из существующих методов очистки газов от CO₂ влекут за собой образование побочных продуктов, которые требуют переработки или утилизации. Альтернативой таким

технологиям является биологическое улавливание CO_2 , где в качестве биофильтрующей среды используются микроводоросли. В результате такой очистки образуется биомасса, которая может использоваться в дальнейшем как сырье для получения различных продуктов.

Фиксация CO_2 , образующегося после сжигания топлива, микроводорослями имеет целый ряд преимуществ, которые обеспечиваются высокой фотосинтетической эффективностью, интенсивным ростом культур и их хорошей адаптацией к изменениям условий среды. Кроме этого, данные микроорганизмы способны трансформировать поглощенный углекислый газ в липиды, белки, пигменты, углеводы. Эти вещества могут быть использованы в качестве источников для получения биотоплива, удобрений. Сухая масса микроводорослей примерно на 50% состоит из углерода, источником которого является CO_2 . По литературным данным, 1 тонна микроводорослей может поглотить за период роста (8–10 дней) около 1,83 тонн углекислого газа. Эта величина будет варьироваться в зависимости от многих факторов (температура, конструкция культиватора, способ подачи CO_2 , вид микроводорослей и др.) [6].

В работе [7] показано, что микроводоросли рода *Chlorella* sp. KR-1 и *Chlorella* sp. ZY-1, выдерживают чрезвычайно высокие уровни CO_2 вплоть до 70%. Оптимальная концентрация углекислого газа для большинства микроводорослей лежит в интервале от 0,038 до 10%. Так, максимальный прирост биомассы для *Chlorella* sp. отмечался при 2,5%, а для *Scenedesmus obliquus* и *Chlorella kessleri* – при 6%. Полученные результаты свидетельствуют о возможности роста микроводорослей в среде с содержанием CO_2 , сопоставимым с типичными концентрациями в дымовых газах ТЭЦ. Так, для *Spirulina* максимальные значения прироста биомассы зафиксированы на седьмые сутки при 6% и на четырнадцатые сутки при 12% CO_2 , тогда как для *Scenedesmus* наивысшие показатели поглощения диоксида углерода зарегистрированы на восьмые (6%) и девятые (12%) сутки культивирования.

Целью данной статьи является разработка способа биологической очистки дымовых газов от CO_2 с применением микроводорослей российского штамма *Chlorella kessleri* ВКПМ-АИ-11АРW на примере дымовых газов ТЭЦ Санкт-Петербурга.

Материалы и методы

Объект исследования – биомасса микроводорослей российского штамма *Chlorella kessleri* ВКПМ-АИ-11АРW. Предмет исследования – условия использования микроводорослей при биологической очистке дымовых газов, отбираемых с Северо-Западной ТЭЦ им. А.Г. Бориса (г. Санкт-Петербург). Эта современная электростанция парогазового цикла работает на сухом отбензинном газе (СОГ, стандарт Газпром СТО 089-2010) и отличается высокой экономичностью и экологичностью. В качестве основного топлива используется природный газ (в качестве резервного – дизельное топливо). Дымовые газы после сжигания топлива (и прохождения через пылевые фильтры) состоят преимущественно из азота (N_2), углекислого газа (CO_2) и водяного пара (H_2O), а также содержат оксиды азота (NO_x) и лишь следовые количества CO , SO_2 и твердых частиц¹.

Для проведения эксперимента смесь дымовых газов с Северо-Западной ТЭЦ была закачана в три специальных баллона (производства ООО «Центргаз») объемом 20 л. Забор концентрированной смеси дымовых газов проводили непосредственно в точке подачи дымовой смеси из трубы специальными шланговыми системами к газоанализатору, установленному на ТЭЦ. Таким образом, собранная газовая смесь является концентрированной смесью, полученной из трубы ТЭЦ, прошедшей только механическую очистку через фильтры для удаления пыли и золы. В каждый баллон закачивали по 120 л газовой смеси, которую предварительно анализировали газоанализатором SERVOPRO MonoExact TCD фирмы SERVOMEX, установленным на ТЭЦ. Результаты анализа показали следующий состав газовой смеси:

¹ Северо-Западная ТЭЦ. Режим доступа: <https://irao-generation.ru/stations/sztec/> (дата обращения 05.11.2025)

- CH_4 – 0,1 vpm;
- O_2 – 15,0 %;
- SO_2 – 0,3 vpm;
- CO – 0 vpm;
- NO – 15,6 vpm.

Значение выбросов CO_2 на ТЭЦ не контролируется и было определено в лаборатории «Промышленная экология» СПбПУ при помощи портативного газоанализатора GA2000+. Данные измерения показали, что в состав дымовых газов входит 2,5% CO_2 .

Для исследования скорости поглощения CO_2 из дымовых газов использовали маточную культуру микроводорослей *Chlorella kessleri*. Данная культура способна поглощать CO_2 из смеси с содержанием CO_2 до 40% и наращивать качественную биомассу [8]. Маточную культуру микроводорослей загружали с питательной средой [9] в уникальный многофункциональный полупромышленный фотобиореактор-биофильтр объемом 110 л, произведенный компанией «Альготек Грин Технолоджи» по заказу ученых СПбПУ по гранту РНФ (рис. 1).

Система оснащена автоматическим контролем подачи дымовых газов, регулировкой уровня pH, освещения и температуры, что позволяет точно управлять условиями культивирования и моделировать различные сценарии процесса очистки. К полупромышленному фотобиореактору-биофильтру с помощью редуктора подключали баллон с дымовыми газами. Проводили процессы культивирования микроводорослей и одновременную биофильтрацию от дымовых газов в течение 7 суток при температуре $28 \pm 2^\circ\text{C}$ и освещенности 3000 Лк. Данные условия были выбраны как оптимальные для культивирования в статье [9].

Помимо этого, для оценки скорости поглощения углекислого газа биомассой микроводорослей использовали герметичный фотобиореактор цилиндрической формы объемом 5 л, оснащенный теплонагревателем (3) и распылителем (2) (рис. 2).

Для осуществления аэрации и соблюдения герметичности газовоздушная смесь из незанятой части фотобиореактора циркулировала по трубкам (4) через аэратор (5).

Начальная оптическая плотность суспензии микроводорослей, культивируемой в 110-литровом фотобиореакторе, составила 0,7, для 5-литрового фотобиореактора – 1,0.

Режим аэрации для 110-литрового фотобиореактора был выбран исходя из объемов дымовых газов. На протяжении всего эксперимента в фотобиореактор подавалась смесь воздуха и

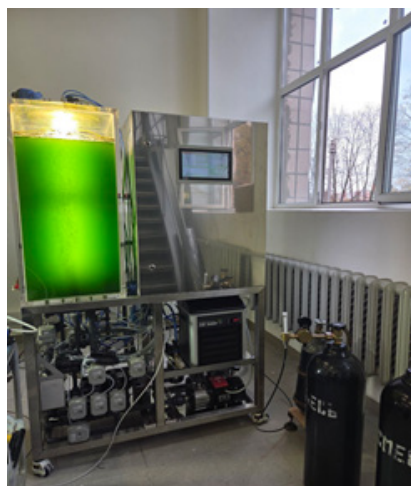


Рис. 1. Вид фотобиореактора-биофильтра и баллонов с дымовыми газами

Fig. 1. Photobioreactor-biofilter and flue gas cylinders

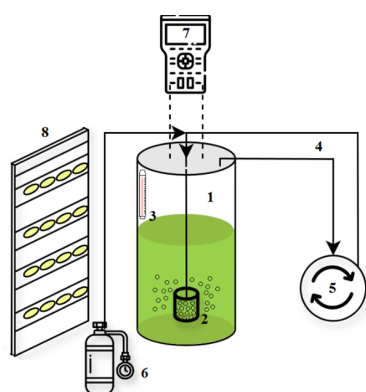


Рис. 2. Фотобиореактор для оценки скорости поглощения углекислого газа биомассой микроводорослей и схема эксперимента: 1 – фотобиореактор; 2 – распылитель; 3 – теплонагреватель; 4 – трубки; 5 – аэратор; 6 – система подачи CO_2 ; 7 – газоанализатор; 8 – система освещения

Fig. 2. Photobioreactor for assessing the rate of carbon dioxide absorption by microalgae biomass and experimental setup: 1 – photobioreactor; 2 – sprayer; 3 – heater; 4 – tubes; 5 – aerator; 6 – CO_2 supply system; 7 – gas analyzer; 8 – lighting system

чистого CO_2 в соотношении 3:1. Скорость подачи смеси составляла 8 л/мин. При этом на первые и третьи сутки в течение 1 часа в фотобиореактор вместо смеси воздуха и чистого CO_2 подавалась смесь воздуха и дымовых газов в таком же соотношении (скорость подачи дымовых газов составляла 2 л/мин).

Подача дымовых газов для 5-литрового фотобиореактора осуществлялась по следующей схеме. На третьи сутки культивирования в фотобиореактор в течение 20 минут подавали дымовые газы напрямую из баллона со скоростью 1,5 л/мин. При этом через 20 минут после начала подачи дымовых газов на выходе из фотобиореактора содержание углекислого газа составило 2,7%. Далее подачу дымовых газов отключали и подключали аэратор, который обеспечивал замкнутый цикл аэрации внутри фотобиореактора без поступления дополнительного воздуха. Затем с помощью газоанализатора измеряли содержание CO_2 в незанятой части фотобиореактора.

Результаты

Проведенные исследования показали, что при пропускании дымовых газов через достаточный объем культуры микроводорослей происходит эффективное удаление CO_2 из газовой смеси. В 110-литровом фотобиореакторе уже через 1 час после начала подачи дымовых газов (с исходной концентрацией CO_2 около 2,5%) содержание CO_2 в выходящем газе снизилось до уровня ниже предела обнаружения газоанализатором. Иными словами, микроводоросли поглотили практически весь углекислый газ, поступивший с дымовыми газами, подтверждая почти 100%-ную эффективность его удаления.

На рис. 3 представлена динамика снижения концентрации CO_2 во внутреннем газовом пространстве 5-литрового фотобиореактора (замкнутая система) после подачи дымового газа.

С учетом размеров незанятой части фотобиореактора ($D = 0,15$ м, $h = 0,21$ м, $V = 3,7$ л) было определено, что за 272 минуты суспензия микроводорослей поглотила 0,078 л CO_2 из газового объема. Тогда с учетом плотности CO_2 при 26°C (1,8 кг/м³) 1 литр суспензии микроводорослей за 1 час поглотит 0,013 г CO_2 . Скорость поглощения CO_2 1 литром суспензии микроводорослей в сутки составит 0,312 г $\text{CO}_2 \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$.

Во время эксперимента отмечен существенный рост микроводорослей как в 110-литровом, так и в 5-литровом фотобиореакторах. Изменение оптической плотности суспензии во времени представлено на рис. 4 (для фотобиореактора объемом 110 л) и рис. 5 (для фотобиореактора объемом 5 л).

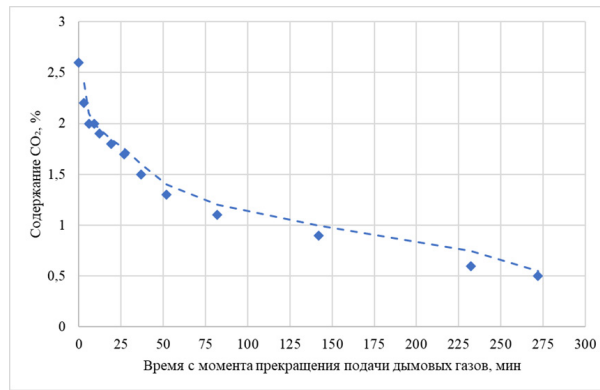


Рис. 3. Динамика снижения CO₂ в свободной части 5-литрового фотобиореактора
 Fig. 3. Dynamics of CO₂ reduction in the free section of a 5-liter photobioreactor

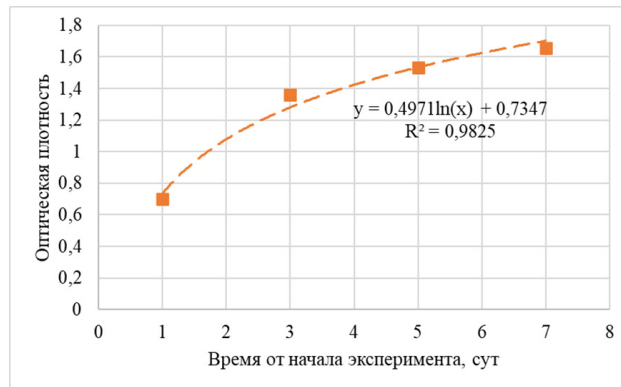


Рис. 4. Изменение оптической плотности суспензии микроводорослей в 110-литровом фотобиореакторе
 Fig. 4. Change in optical density of microalgae suspension in a 110 L photobioreactor

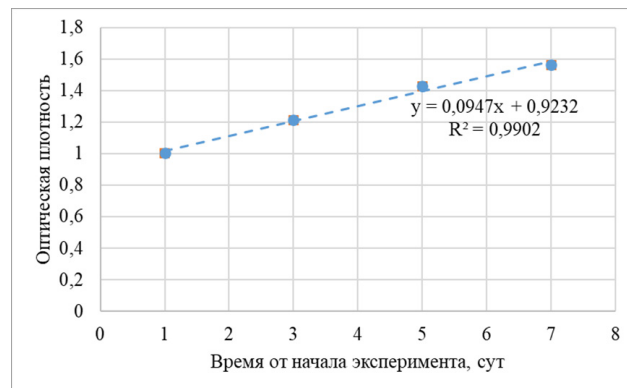


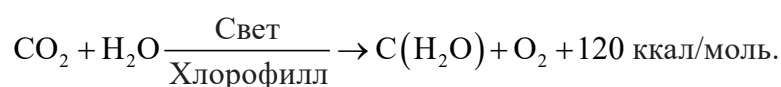
Рис. 5. Изменение оптической плотности суспензии микроводорослей в 5-литровом фотобиореакторе
 Fig. 5. Change in optical density of microalgae suspension in a 5 L photobioreactor

По полученным данным, концентрация биомассы в 110-литровом фотобиореакторе за период исследования увеличилась примерно в 2,36 раз, тогда как в 5-литровом – примерно в 1,5 раза. Меньший прирост в малом реакторе объясняется ограниченным запасом CO₂ в замкнутой

системе (после поглощения исходного объема газа приток углерода прекращался), в то время как в 110-литровой установке микроводоросли получали CO_2 как из чистого газа, так и из периодически подаваемых дымовых газов. В целом полученные результаты демонстрируют, что биофильтрация с помощью микроводорослей способна значительно снижать содержание CO_2 в дымовых газах, сопровождаясь при этом заметным приростом биомассы микроводорослей.

Обсуждение

Полученные данные подтверждают, что прохождение дымовых газов через культуру микроводорослей позволяет эффективно извлекать углекислый газ. CO_2 , поглощаемый микроводорослями, фиксируется в клетках в процессе фотосинтеза, т.е. неорганический углерод превращается в органический углерод биомассы. Данный процесс может быть представлен упрощенным уравнением фотосинтеза:



Измеренные значения CO_2 в дымовых газах, собранных после прохождения биомассы микроводорослей, показали его отсутствие через час. Следовательно, углекислый газ, количество которого в составе дымовых газов ТЭЦ составляет 2,5%, полностью поглощается биомассой водорослей.

Полученные результаты согласуются с литературными данными о высокой способности микроводорослей к поглощению CO_2 . В проведенном исследовании использовалась относительно умеренная концентрация (2,5% CO_2), которая лежит в пределах оптимума для ряда культур. В частности, известно, что *Chlorella sp.* при 2,5% CO_2 достигает максимального прироста биомассы, а *Chlorella kessleri* способна эффективно расти и при более высоких долях CO_2 (до 6%) [10, 11]. Хотя концентрация CO_2 в дымовых газах в проведенном исследовании была немного ниже оптимальной для *Chlorella kessleri*, микроводоросли продемонстрировали высокую эффективность поглощения. При 2,5% CO_2 их рост был активным (биомасса увеличилась в 2,36 раза за неделю). В более ранних исследованиях было показано, что штамм *Chlorella kessleri* способен наращивать биомассу при повышенном уровне CO_2 (до 40%), поэтому можно ожидать, что при более высоких концентрациях углекислого газа эффективность фиксации углерода будет оставаться высокой. Относительно меньший прирост биомассы в 5-литровом реакторе объясним условиями эксперимента. После поглощения порции CO_2 новый углекислый газ в систему не поступал, что ограничило доступность углерода для фотосинтеза. В 110-литровом фотобиореакторе наличие непрерывной подачи воздуха с CO_2 и периодической подачей дымовых газов обеспечивало микроводорослям стабильное снабжение углеродом, что отразилось на их приросте.

Расчетная скорость поглощения CO_2 ($0,312 \text{ г CO}_2 \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$) находится на уровне, сопоставимом с данными, приводимыми в литературе [12–14]. Так, авторы статьи [12] культивировали *Chlorella sp.* в пузырьковом колонном реакторе при различных концентрациях CO_2 (0,03%, 1,75% и 9,45% об.) и расходах газа. По их данным, накопление 44,7–49,5 г CO_2 в 10-литровом реакторе за 16 суток при оптимальных условиях (1,75 % CO_2 , изменяемый расход газа) соответствует средним объемным скоростям фиксации порядка $0,28\text{--}0,31 \text{ г CO}_2 \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$. Таким образом, полученная в проведенном нами исследовании скорость $0,312 \text{ г CO}_2 \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ практически совпадает с верхней границей диапазона, достигнутого в оптимизированном пузырьковом фотобиореакторе, что указывает на корректно подобранные условия газообмена и отсутствие существенных ограничений по массообмену CO_2 в нашей системе. В работе [13] для *Chlorella kessleri*, культивируемой в городских и синтетических сточных водах при подаче смеси воздуха

с 5% CO_2 , расчетная скорость биофиксации углекислого газа составила порядка 0,307–0,324 $\text{CO}_2 \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ в зависимости от типа среды, что указывает на сопоставимую эффективность биофильтрации при близких концентрациях CO_2 . Это значение соответствует фиксации порядка 0,16 г углерода на 1 л в сутки. При пересчете на сухую массу микроводорослей можно условно экстраполировать, что 1 тонна биомассы поглотит до 180–200 кг CO_2 в сутки, что согласуется с оценками, согласно которым 1 тонна сухой биомассы микроводорослей способна утилизировать до 1,8 тонн CO_2 за 8–10 дней роста [14, 15]. Разброс значений скорости фиксации углекислого газа, отмечаемый в литературе, объясняется не только биологическими характеристиками конкретных штаммов микроводорослей, но и режимом аэрации, освещенностью, температурой, объемной нагрузкой по углероду, а также конструктивными особенностями фотобиореакторов. Тем не менее полученные результаты подтверждают, что даже при умеренной концентрации CO_2 (2,5%) культура демонстрирует устойчивое поглощение углекислого газа и значительный прирост биомассы, что позволяет рассматривать описанный метод как эффективный элемент декарбонизации дымовых газов.

Сравнивая предлагаемый биологический метод с традиционными технологиями улавливания CO_2 , можно отметить ряд важных отличий. Химическая абсорбция с помощью различных растворителей (воды, щелочных растворов, аминов и др.) широко применяется на практике, однако требует значительных энергетических затрат и создает проблемы с регенерацией сорбентов и отходами. Абсорбция с помощью аминов (моноэтаноламин и др.) позволяет улавливать CO_2 с высокой эффективностью, но нуждается в тепловой регенерации раствора и сопровождается деградацией реагентов.

Биофильтрация дымовых газов микроводорослями, напротив, не приводит к образованию токсичных отходов. Углекислый газ в проведенном исследовании был полностью превращен в биомассу, которая сама представляет ценность. Выходящая газовая смесь, прошедшая через культуру, фактически освобождается от CO_2 , а побочным продуктом процесса является биомасса, пригодная для дальнейшего использования (удобрения, сырье для получения биотоплива и т.д.). Таким образом, предлагаемый метод сочетает задачу снижения выбросов парникового газа с получением ценного сырья.

На основании полученных результатов разработана технологическая схема внедрения биофильтрации за счет микроводорослей в систему очистки дымовых газов ТЭЦ (рис. 6).

Предлагаемая к внедрению система направлена на улавливание CO_2 из дымовых газов ТЭЦ с помощью фотосинтезирующих микроводорослей *Chlorella kessleri*. На первом этапе предложенной схемы происходит предварительная очистка дымовых газов за счет их прохождения через скруббер (3), который удаляет NO_x , SO_2 и частицы пыли, а также осуществляется охлаждение газов до оптимальной температуры для микроводорослей 25–30°C. Предварительно очищенные дымовые газы осушаются (7) и охлаждаются (8), а затем подаются на второй этап очистки на фотобиореактор-биофильтр с микроводорослями (10), где происходит поглощение ими CO_2 и культивирование биомассы. Предварительно в фотобиореактор-биофильтр подаются маточная культура микроводорослей (11) и питательная среда (12). Дымовые газы, прошедшие двухступенчатую очистку (20), направляются в трубу для выбросов в атмосферу (19). Накультивированная биомасса подается в отстойник (14) для отстаивания, затем полученная паста складывается в емкость (15) и подается на центрифугу (16) для обезвоживания и затем – в сушильный аппарат (17) для получения сухой биомассы, которую можно использовать как корм для животных и рыб, добавку в компост, удобрение для почв, сырье для получения биодизеля. Питательная среда после центрифугирования поступает в емкость питательной среды и используется вторично.

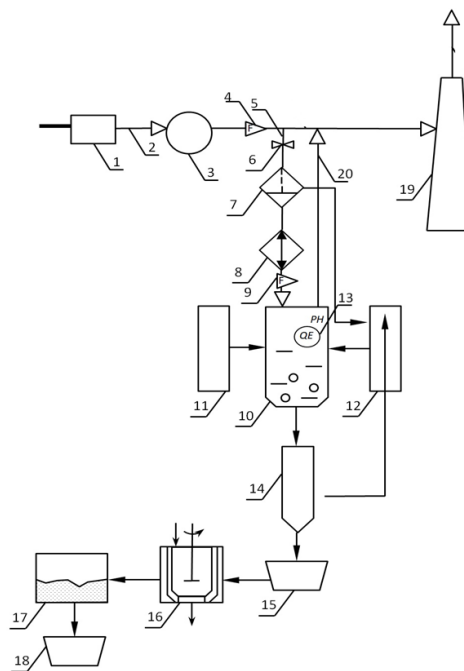


Рис. 6. Технологическая схема культивирования микроводоросли с биофиксацией дымовых газов, полученных с ТЭЦ: 1 – котел; 2 – дымовые газы; 3 – скруббер (первый этап очистки дымовых газов); 4 – расходомер; 5 – дымовые газы на фотобиореактор-биофильтр; 6 – клапан; 7 – осушитель дымовых газов; 8 – охладитель дымовых газов; 9 – расходомер (измерение расхода газовой смеси); 10 – фотобиореактор-биофильтр с микроводорослями (второй этап очистки); 11 – маточная культура микроводорослей; 12 – питательная среда; 13 – рН-метр; 14 – однокамерный отстойник; 15 – емкость для сбора пасты остаточной биомассы; 16 – центрифуга; 17 – сушильный аппарат; 18 – емкость для сбора сухой биомассы микроводорослей; 19 – труба для выбросов очищенных дымовых газов; 20 – очищенные дымовые газы

Fig. 6. Flow chart of microalgae cultivation with biofixation of flue gases obtained from a thermal power plant:

1 – boiler; 2 – flue gases; 3 – scrubber (first stage of flue gas purification); 4 – flow meter; 5 – flue gases to the photobioreactor-biofilter; 6 – valve; 7 – flue gas dryer; 8 – flue gas cooler; 9 – flow meter (measuring the flow rate of the gas mixture); 10 – photobioreactor-biofilter with microalgae (second stage of purification); 11 – microalgae stock culture; 12 – nutrient medium; 13 – pH meter; 14 – single-chamber settling tank; 15 – container for collecting residual biomass paste; 16 – centrifuge; 17 – drying apparatus; 18 – container for collecting dry microalgae biomass; 19 – pipe for emission of cleaned flue gases; 20 – cleaned flue gases

Заключение

В работе проанализированы существующие методы поглощения углекислого газа из дымовых газов (химическая абсорбция, каталитическая и криогенная очистка и др.) и показано, что их общим недостатком является образование побочных продуктов и отходов, требующих дополнительной утилизации.

В качестве альтернативного подхода для улавливания CO_2 из дымовых газов ТЭЦ предложен биологический метод – биофильтрация с помощью микроводорослей, что экспериментально исследовано на примере ТЭЦ Санкт-Петербурга. Установлено, что уже через час пропускания дымовой газовой смеси через суспензию микроводорослей в полупромышленном фотобиореакторе-биофильтре углекислый газ полностью поглощается (концентрация CO_2 на выходе снижается до нуля), что подтверждает высокую эффективность предложенного метода.

Биофильтрация дымовых газов позволяет уловить углекислый газ и при этом получить дополнительный продукт – биомассу микроводорослей, которая может использоваться в качестве удобрения, сырья для получения биодизеля и других ценных компонентов и продуктов.

Разработана технологическая блок-схема очистки дымовых газов ТЭЦ с использованием микроводорослей, включающая предварительную очистку газа и последующую биофиксацию CO₂ в фотобиореакторе-биофилт্রে. Предложенное решение особенно актуально для ТЭЦ, расположенных в крупных городах, где действуют жесткие экологические нормы и существует повышенный запрос на «зеленые» технологии снижения выбросов. Реализация данного метода позволит существенно сократить выбросы парникового CO₂ и одновременно внести вклад в ресурсосберегающую переработку углерода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Микушина О.В. Перспективы достижения углеродной нейтральности развивающимися странами // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 3. С. 23–42. DOI: 10.18721/JEST.30302
- [2] Vaz Jr.S., de Souza A.P.R., Baêta V.E.L. Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors, *Cleaner Engineering and Technology*, 8 (2022) 100456. DOI: 10.1016/j.clet.2022.100456
- [3] Куксов Д.Ю., Филимонова О.Н., Кашников В.И., Федий Г.Л. Продукты окисления углеводородных топлив как источник углекислоты автономной станции // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2022. № 23. С. 50–65.
- [4] Azimi B., Tahmasebpour M., Sánchez-Jiménez P.E., Perejón A., Valverde J.M. Multicycle CO₂ capture activity and fluidizability of Al-based synthesized CaO sorbents, *Chemical Engineering Journal*, 358 (2019) 679–690. DOI: 10.1016/j.cej.2018.10.061
- [5] Han Y., Ho W.S.W. Polymeric membranes for CO₂ separation and capture, *Journal of Membrane Science*, 628 (2021) 119244. DOI: 10.1016/j.memsci.2021.119244
- [6] Prasad R., Gupta S.K., Shabnam N., Oliveira C.Y.B., Nema A.K., Ansari F.A., Bux F. Role of microalgae in global CO₂ sequestration: physiological mechanism, recent development, challenges, and future prospective, *Sustainability*, 13 (23) (2021) 13061. DOI: 10.3390/su132313061
- [7] de Moraes M.G., Costa J.A.V. Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina* sp. cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors, *Biotechnology Letters*, 29 (2007) 1349–1352. DOI: 10.1007/s10529-007-9394-6
- [8] Politaeva N., Ilin I., Velmozhina K., Shinkevich P. Carbon dioxide utilization using *Chlorella* microalgae, *Environments*, 10 (7) (2023) 109. DOI: 10.3390/environments10070109
- [9] Политаева Н.А., Смятская Ю.А., Кузнецова Т.А., Ольшанская Л.Н., Валиев Р.Ш. Культивирование и использование микроводорослей *Chlorella* и высших водных растений ряска *Lemna*: монография. Саратов: ИЦ «Наука», 2017.
- [10] Li S., Chang H., Zhang S., Ho S.-H. Production of sustainable biofuels from microalgae with CO₂ bio-sequestration and life cycle assessment, *Environmental Research*, 227 (2023) 115730. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115730
- [11] Faruque M.O., Mohammed K.A., Hossain M.M., Razzak S.A. Influence of elevated CO₂ concentrations on growth, nutrient removal, and CO₂ biofixation using *Chlorella kessleri* cultivation, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18 (2021) 913–926. DOI: 10.1007/s13762-020-02909-4
- [12] Pourjamshidian R., Abolghasemi H., Esmaili M., Amrei H.D., Parsa M., Rezaei S. Carbon dioxide biofixation by *Chlorella* sp. in a bubble column reactor at different flow rates and CO₂ concentrations, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 36 (02) (2019) 639–645. DOI: 10.1590/0104-6632.2019036-2s20180151
- [13] Arbib Z., Ruiz J., Álvarez-Díaz P., Garrido-Pérez C., Perales J.A. Capability of different microalgae species for phytoremediation processes: wastewater tertiary treatment, CO₂ bio-fixation and low cost biofuels production, *Water Research*, 49 (2014) 465–474. DOI: 10.1016/j.watres.2013.10.036

[14] **Deng X., Chen B., Xue C., Li D., Hu X., Gao K.** Biomass production and biochemical profiles of a freshwater microalga *Chlorella kessleri* in mixotrophic culture: effects of light intensity and photoperiodicity, *Bioresource Technology*, 273 (2019) 358–367. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.11.032

[15] **Valdovinos-García E.M., Barajas-Fernández J., Olán-Acosta M.A., Petriz-Prieto M.A., Guzmán-López A., Bravo-Sánchez M.G.** Techno-economic study of CO₂ capture of a thermoelectric plant using microalgae (*Chlorella vulgaris*) for production of feedstock for bioenergy, *Energies*, 13 (2) (2020) 413. DOI: 10.3390/en13020413

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПОЛИТАЕВА Наталья Анатольевна – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: politaevana1971@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5914-6210>

ШИНКЕВИЧ Полина Сергеевна – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: ps.shinkevich@gmail.com

ОПАРИНА Анна Михайловна – ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: annaoparina93@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2043-1866>

REFERENCES

[1] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin, O.V. Mikushina,** Prospects for achieving carbon neutrality by developing countries, *Global Energy*, 30 (03) (2024) 23–42. DOI: 10.18721/JEST.30302

[2] **S. Vaz Jr., A.P.R. de Souza, B.E.L. Baêta,** Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors, *Cleaner Engineering and Technology*, 8 (2022) 100456. DOI: 10.1016/j.clet.2022.100456

[3] **D.Y. Kuksov, O.N. Filimonova, V.I. Kashnikov, G.L. Fediy,** Oxidation products of hydrocarbon fuels as a source of an autonomous station carbon dioxide, *Aerospace forces. Theory and practice*, 23 (2022) 50–65.

[4] **B. Azimi, M. Tahmasebpour, P.E. Sánchez-Jiménez, A. Perejón, J.M. Valverde,** Multicycle CO₂ capture activity and fluidizability of Al-based synthesized CaO sorbents, *Chemical Engineering Journal*, 358 (2019) 679–690. DOI: 10.1016/j.cej.2018.10.061

[5] **Y. Han, W.S.W. Ho,** Polymeric membranes for CO₂ separation and capture, *Journal of Membrane Science*, 628 (2021) 119244. DOI: 10.1016/j.memsci.2021.119244

[6] **R. Prasad, S.K. Gupta, N. Shabnam, C.Y.B. Oliveira, A.K. Nema, F.A. Ansari, F. Bux,** Role of microalgae in global CO₂ sequestration: physiological mechanism, recent development, challenges, and future prospective, *Sustainability*, 13 (23) (2021) 13061. DOI: 10.3390/su132313061

[7] **M.G. de Moraes, J.A.V. Costa,** Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina sp.* cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors, *Biotechnology Letters*, 29 (2007) 1349–1352. DOI: 10.1007/s10529-007-9394-6

[8] **N. Politaeva, I. Ilin, K. Velmozhina, P. Shinkevich,** Carbon dioxide utilization using *Chlorella* microalgae, *Environments*, 10 (7) (2023) 109. DOI: 10.3390/environments10070109

- [9] N.A. Politaeva, Iu.A. Smiatskaia, T.A. Kuznetsova, L.N. Ol'shanskaia, R.Sh. Valiev, Kul'tivirovanie i ispol'zovanie mikrovodoroslei Chlorella i vysshikh vodnykh rastenii riaska Lemna [Cultivation and use of microalgae Chlorella and higher aquatic plants duckweed Lemna], monograph. Saratov: ITS "Nauka", 2017.
- [10] S. Li, H. Chang, S. Zhang, S.-H. Ho, Production of sustainable biofuels from microalgae with CO₂ bio-sequestration and life cycle assessment, *Environmental Research*, 227 (2023) 115730. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115730
- [11] M.O. Faruque, K.A. Mohammed, M.M. Hossain, S.A. Razzak, Influence of elevated CO₂ concentrations on growth, nutrient removal, and CO₂ biofixation using Chlorella kessleri cultivation, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18 (2021) 913–926. DOI: 10.1007/s13762-020-02909-4
- [12] R. Pourjamshidian, H. Abolghasemi, M. Esmaili, H.D. Amrei, M. Parsa, S. Rezaei, Carbon dioxide biofixation by Chlorella sp. in a bubble column reactor at different flow rates and CO₂ concentrations, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 36 (02) (2019) 639–645. DOI: 10.1590/0104-6632.20190362s20180151
- [13] Z. Arbib, J. Ruiz, P. Álvarez-Díaz, C. Garrido-Pérez, J.A. Perales, Capability of different microalgae species for phytoremediation processes: wastewater tertiary treatment, CO₂ bio-fixation and low cost biofuels production, *Water Research*, 49 (2014) 465–474. DOI: 10.1016/j.watres.2013.10.036
- [14] X. Deng, B. Chen, C. Xue, D. Li, X. Hu, K. Gao, Biomass production and biochemical profiles of a freshwater microalga Chlorella kessleri in mixotrophic culture: effects of light intensity and photoperiodicity, *Bioresource Technology*, 273 (2019) 358–367. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.11.032
- [15] E.M. Valdovinos-García, J. Barajas-Fernández, M.A. Olán-Acosta, M.A. Petriz-Prieto, A. Guzmán-López, M.G. Bravo-Sánchez, Techno-economic study of CO₂ capture of a thermoelectric plant using microalgae (*Chlorella vulgaris*) for production of feedstock for bioenergy, *Energies*, 13 (2) (2020) 413. DOI: 10.3390/en13020413

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Natalia A. POLITAEVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: politaevana1971@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5914-6210>

Polina S. SHINKEVICH – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: ps.shinkevich@gmail.com

Anna M. OPARINA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: annaoparina93@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2043-1866>

Поступила: 21.11.2025; Одобрена: 11.12.2025; Принята: 12.12.2025.

Submitted: 21.11.2025; Approved: 11.12.2025; Accepted: 12.12.2025.

Research article

UDC 541.138

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32103>



*M.D. Novichkov*¹ ✉, *S.A. Gurin*², *E.A. Pecherskaya*¹,
*A.E. Shepeleva*², *D.V. Agafonov*²

¹ Penza State University, Penza, Russia;

² Research Institute of Electronic and Mechanical Devices JSC, Penza, Russia

✉ novichkov1998maks@gmail.com

ELECTROCHEMICAL ACTIVITY AND USE OF BIMETALLIC CATALYTIC STRUCTURES WITH DIFFERENT NI CONTENTS

Abstract. This paper presents the results of a study of the effect of nickel particles on the properties of a bimetallic PtNi catalyst for membrane-electrode assemblies in hydrogen fuel cells. A series of samples with controlled Ni particles ranging in size from 6.0 to 15 nm were synthesized using magnetron sputtering with process time ranging from 30 to 120 s. It was found that fluxes obtained with sputtering times of 60–90 s (Ni particle size ranging from 6 to 8 nm) provide a balanced combination of differential characteristics: developed dendritic structure, active electrochemical surface area, catalytic activity and stability during stress testing. It is shown that deviations from the optimal synthesis parameters, either in the direction or by increasing the sputtering time, lead to degradation of either the catalytic activity or the stability of the system.

Keywords: catalyst, electrochemical activity, ion-exchange membrane, hydrogen fuel cell.

Acknowledgements: The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment “Synthesis and research of promising nanomaterials, coatings and electronics devices” (No. 124041700069-0).

Citation:

Novichkov M.D., Gurin S.A., Pecherskaya E.A. et al, Electrochemical activity and use of bimetallic catalytic structures with different Ni contents, *Global Energy*, 32 (01) (2026) 35–43, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32103>



М.Д. Новичков¹ ✉, С.А. Гурин², Е.А. Печерская¹,
А.Э. Шепелева², Д.В. Агафонов²

¹ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия;

² АО «Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов»,
Пенза, Россия

✉ novichkov1998maks@gmail.com

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ СТРУКТУР С РАЗЛИЧНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ NI

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния частиц никеля на свойства биметаллического катализатора PtNi для мембранно-электродных блоков водородных топливных элементов. Методом магнетронного распыления с варьированием времени процесса от 30 до 120 с синтезирована серия образцов с контролируемым размером частиц Ni от 6,0 до 15 нм. Установлено, что образцы, полученные при времени напыления 60–90 с (размер частиц Ni 6–8 нм), демонстрируют сбалансированное сочетание функциональных характеристик: развитую дендритную структуру, максимальную электрохимически активную поверхность, высокую каталитическую активность и устойчивость в ходе стресс-тестирования. Показано, что отклонение от оптимальных параметров синтеза в сторону как уменьшения, так и увеличения времени напыления приводит к деградации либо каталитической активности, либо стабильности системы.

Ключевые слова: катализатор, электрохимическая активность, ионообменная мембрана, водородный топливный элемент.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Синтез и исследование перспективных наноматериалов, покрытий и устройств электроники» (№ 124041700069-0).

Для цитирования:

Новичков М.Д., Гурин С.А., Печерская Е.А. и др. Электрохимическая активность и долговечность биметаллических каталитических структур с различным количеством Ni // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 1. С. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32103>

Introduction. Hydrogen energy is a key area of development in the field of alternative and environmentally friendly sustainability [1, 2]. The core of a hydrogen fuel cell is a polymer ion-exchange membrane (IEM), the efficiency of which directly depends on the manufacturer of the catalytic material [3]. Of particular interest in this regard are bimetallic Pt-M (M is a transition metal) nanoparticles, which not only outperform pure platinum in catalytic activity in the respiration recovery mode but also exhibit increased resistance to structural corrosion and degradation [4, 5]. This makes them promising candidates for use in low-temperature fuel cells [6–8].

Previous studies have shown that optimizing the thickness of the catalytic layer is crucial for achieving high performance, productivity and efficiency of membrane-electrode assemblies (MEAs) [9, 10]. However, the effect of the thickness of PtNi catalytic layers formed by a two-stage method, including magnetron sputtering of nickel and subsequent chemical deposition of platinum, has not been sufficiently studied. The thickness of the nickel layer used as an adsorption site for platinum deposition can affect the properties of the entire PtNi catalytic layer [11, 12].

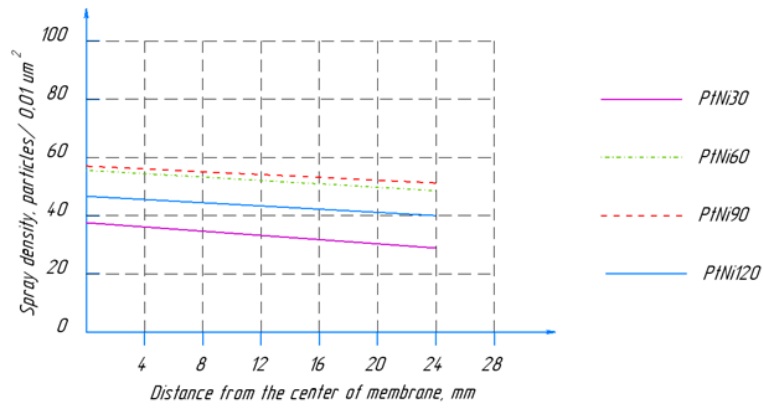


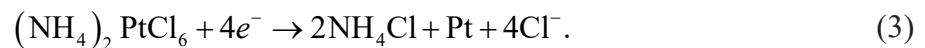
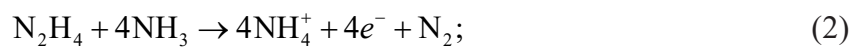
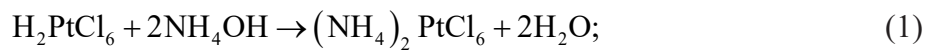
Fig. 3. Sputtering density distribution graph

Table 1

Average particle size of deposited Ni particles by magnetron sputtering

Sample	Average particle size, nm
PtNi30	6.0
PtNi60	9.0
PtNi90	11.8
PtNi120	14.9

In the second stage, a platinum shell was formed by chemical deposition from a solution. The reaction process is shown in the following formulas:



The main component of the solution is hexachloroplatinic acid (H_2PtCl_6), whose minimum concentration (0.8 g/L) ensures uniform coating with a long precipitation time (approximately 45 min). Hydrazine (N_2H_4), used in a concentration range of 0.8 to 1.2 g/L, plays a key role in the reduction of platinum from H_2PtCl_6 . The addition of concentrated ammonium hydroxide (NH_4OH) in an amount of up to 200 ml/L stabilizes the chemical reaction, ensuring a uniform process. To prepare the IEM for coating, it is pre-soaked in distilled water for 6–12 h at a temperature of 20–22 °C. This step saturates the membrane with water, activating its surface and creating optimal conditions for the formation of a high-quality coating during chemical vapor deposition [15].

Results and discussion

The resulting polymer IEMs were integrated into MEAs to record current-voltage characteristics (Fig. 4), followed by stress testing. Tests were conducted in fuel cell mode in potentiostatic mode in the range from 0.1 to 0.9 V with a sweep rate of 20 mV s⁻¹, with a total number of cycles of 5000. Fig. 5 shows the dynamics of current density changes at a potential of 0.9 V.

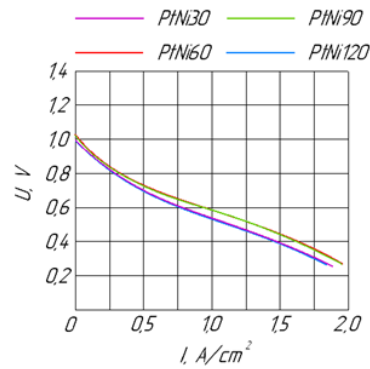


Fig. 4. Comparison of the I–V characteristics of the MEA in a hydrogen fuel cell

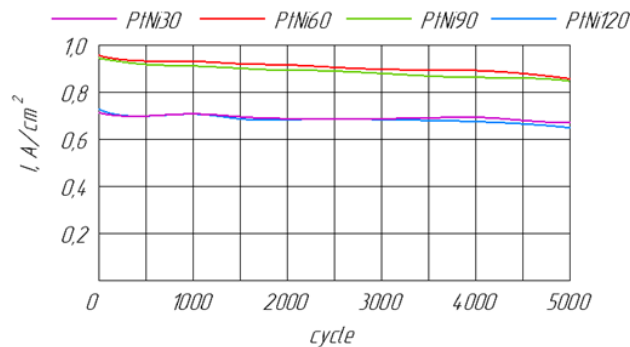


Fig. 5. Graph of current density changes in the MEA over time for polymer IEMs with different Ni amounts

Analysis of the surface morphology and functional characteristics of the MEA reveals that short deposition times result in an insufficient number of nucleation centers [12]. This limits the development of the electrochemically active surface area, which in turn explains the observed decrease in current density despite the high stability of the samples. The superior stability compared to samples obtained with sputtering times of 60 to 90 s is likely due to the increased average distance between particles, which suppresses sintering mechanisms. This assumption is supported by the results of particle size distribution analysis before and after stress testing (Fig. 6).

In contrast, excessively long sputtering times lead to the formation of large agglomerates. Although proton conductivity is retained in such systems, the significant reduction in electrochemically active surface area negatively impacts the shape of the I–V characteristics and the overall membrane performance.

The highest efficiency was demonstrated by structures formed with sputtering times of 60 to 90 s, which corresponded to nickel particles of 6–8 nm in size. These synthesis conditions allowed us to obtain catalysts that combine high electrochemical activity with sufficient corrosion and morphological stability.

Conclusion

The study established a fundamental relationship between the dispersion of the nickel substrate formed by magnetron sputtering and the functional characteristics of the bimetallic PtNi catalyst within the MEA.

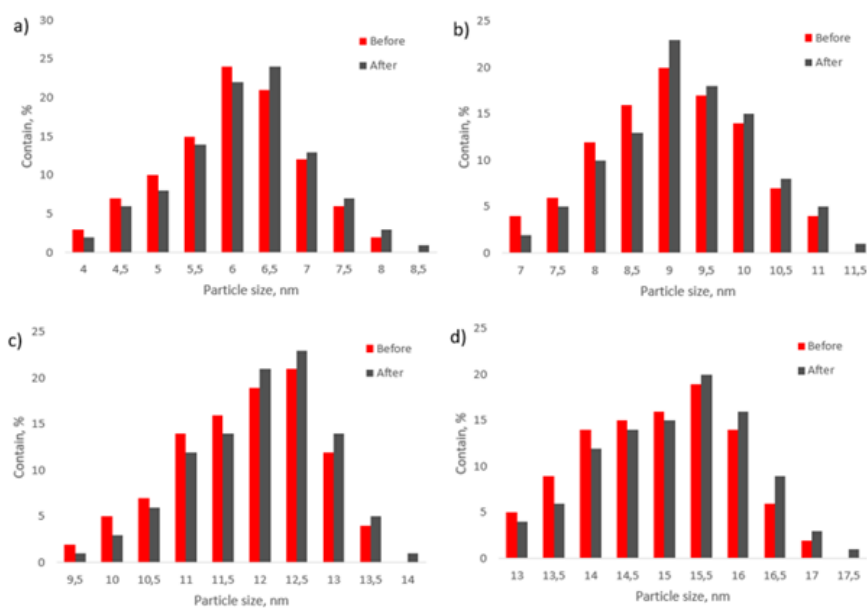


Fig. 6. Nanoparticle size distribution before and after stress testing for polymer IEM with Ni sputtering times of: a) 30 s; b) 60 s; c) 90 s; d) 120 s

The highest efficiency was demonstrated by samples synthesized with sputtering times of 60 to 90 s, which corresponded to nickel particles of 6–8 nm in size. This range achieves an optimal balance between the density of nucleation centers and the prevention of their coalescence, ensuring the formation of a highly developed dendritic structure with maximum electrochemical absorption. Catalysts with these parameters combine high electrochemical activity with sufficient corrosion and morphological stability, confirmed by 5000 stress testing cycles.

REFERENCES

- [1] I.A. Stenina, A.B. Yaroslavtsev, Prospects for the Development of Hydrogen Energy. *Polymer Membranes for Fuel Cells and Electrolyzers, Membranes and Membrane Technologies*, 6 (2024) 15–26. DOI: 10.1134/S2517751624010050
- [2] V.I. Vasilieva, E.E. Meshcheryakova, I.V. Falina, N.A. Kononenko, M.A. Brovkina, E.M. Akberova, Effect of Heterogeneous Ion-Exchange Membranes Composition on Their Structure and Transport Properties, *Membranes and Membrane Technologies*, 5 (2023) 139–147. DOI: 10.1134/s2517751623030083
- [3] S.P. Filippov, A.B. Yaroslavtsev, Hydrogen energy: development prospects and materials, *Russian Chemical Reviews*, 90 (6) (2021) 627–643. DOI: 10.1070/RCR5014
- [4] M.D. Novichkov, S.A. Gurin, A.E. Shepeleva, E.A. Pecherskaya, D.V. Agafonov, V.A. Ilyin, Nanostructured bimetallic PtNi catalyst for electrochemical systems with solid polymer electrolyte, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, 17 (3.1) (2024) 120–123. DOI: 10.18721/JPM.173.123
- [5] N.A. Yashtulov, M.V. Lebedeva, I.M. Kaplan, A.L. Krapivko, O.A. Dulina, Formation and research of bimetallic electrode materials on polymer-carbon carrier matrices for energy power sources, *Chemical Bulletin*, 5 (1) (2022) 74–82.

- [6] L. Xiong, A. Manthiram, Effect of atomic ordering on the catalytic activity of carbon supported PtM (M = Fe, Co, Ni, and Cu) alloys for oxygen reduction in PEMFCs, *Journal of the Electrochemical Society*, 152 (4) (2005) A697. DOI: 10.1149/1.1862256
- [7] J.R.C. Salgado, E. Antolini, E.R. Gonzalez, Structure and Activity of Carbon-Supported Pt-Co Electrocatalysts for Oxygen Reduction, *The Journal of Physical Chemistry B*, 108 (46) (2004) 17767–17774. DOI: 10.1021/jp0486649
- [8] A. Beniwal, H. Gurjar, K. Shekhawat, A. Bagaria, D. Bhalothia, Screening the Oxygen Reduction Reaction Performance of Carbon-Supported Pt-M (M = Ni, Cu, Co) Binary Electrocatalysts via Tuning Metal–Support Interaction, *Oxygen*, 5 (3) (2025) 10. DOI: 10.3390/oxygen5030010
- [9] V.E. Guterman, S.V. Belenov, A.Yu. Pakharev, M. Min, N.Yu. Tabachkova, E.B. Mikheykina, L.L. Vysochina, T.A. Lastovina, Pt-M/C (M = Cu, Ag) electrocatalysts with an inhomogeneous distribution of metals in the nanoparticles, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (3) (2016) 1609–1626. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.11.002
- [10] X. Zhu, X. Tan, K.-H. Wu, S.-C. Haw, C.-W. Pao, B.-J. Su, J. Jiang, S.C. Smith, J.-M. Chen, R. Amal, X. Lu, Intrinsic ORR Activity Enhancement of Pt Atomic Sites by Engineering the d-Band Center via Local Coordination Tuning, *Angewandte Chemie International Edition*, 60 (40) (2021) 21911–21917. DOI: 10.1002/anie.202107790
- [11] V.A. Bogdanovskaya, I.E. Vernigor, M.V. Radina, P.A. Sinitsyn, V.N. Andreev, N.F. Nikol'skaya, An Effective PtNi/CNTs Catalyst for the Hydrogen Oxidation Reaction in an Alkaline Electrolyte, *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 59 (6) (2023) 646–656. DOI: 10.31857/S0044185623700808
- [12] M.D. Novichkov, S.A. Gurin, Ye.A. Pecherskaya, S.A. Nesterov, P.A. Gurin, D.V. Agafonov, Technology of Formation of Catalytic Nanostructures of Polymer Ion-Exchange Membranes, *Nano- and Microsystems Technology*, 27 (2) (2025) 68–72. DOI: 10.17587/nmst.27.68-72
- [13] S.A. Nesterov, S.A. Gurin, E.A. Pecherskaya, D.A. Shelakhaev, A.V. Fimin, Development and research of a technology for producing a low-dimensional porous platinum-based catalyst by thermal evaporation in vacuum on an ion-exchange polymer membrane of a hydrogen generator electrolytic cell, *Journal of Physics: Conference Series*, 1695 (2020) 012188. DOI: 10.1088/1742-6596/1695/1/012188
- [14] Yu.V. Mozzhegorova, G.V. Ilinykh, V.N. Korotaev, Carbon footprint of a solid oxide fuel cell power plant, *Global Energy*, 31 (02) (2025) 42–56. DOI: 10.18721/JEST.31204
- [15] G. Chen, X. Yang, Z. Xie, F. Zhao, Z. Zhou, Q. Yuan, Hollow PtCu octahedral nanoalloys: Efficient bifunctional electrocatalysts towards oxygen reduction reaction and methanol oxidation reaction by regulating near-surface composition, *Journal of Colloid and Interface Science*, 562 (2020) 244–251. DOI: 10.1016/j.jcis.2019.12.020

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Maksim D. NOVICHKOV – *Penza State University*.

E-mail: novichkov1998maks@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9319-2475>

Sergey A. GURIN – *Research Institute of Electronic and Mechanical Devices JSC*.

E-mail: teslananoel@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9602-7221>

Ekaterina A. PECHERSKAYA – *Penza State University*.

E-mail: peal@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5657-9128>

Anastasiya E. SHEPELEVA – *Research Institute of Electronic and Mechanical Devices JSC.*

E-mail: anastasiya.shepeleva.01@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8600-084X>

Dmitry V. AGAFONOV – *Research Institute of Electronic and Mechanical Devices JSC.*

E-mail: dmitryagafonov@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4548-3724>

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Stenina I.A., Yaroslavtsev A.B.** Prospects for the Development of Hydrogen Energy. *Polymer Membranes for Fuel Cells and Electrolyzers, Membranes and Membrane Technologies*, 6 (2024) 15–26. DOI: 10.1134/S2517751624010050

[2] **Vasileva V.I., Meshcheryakova E.E., Falina I.V., Kononenko N.A., Brovkina M.A., Akberova E.M.** Effect of Heterogeneous Ion-Exchange Membranes Composition on Their Structure and Transport Properties, *Membranes and Membrane Technologies*, 5 (2023) 139–147. DOI: 10.1134/s2517751623030083

[3] **Филиппов С.П., Ярославцев А.Б.** Водородная энергетика: перспективы развития и материалы // *Успехи химии*. 2021. Т. 90, № 6. С. 627–643. DOI: 10.1070/RCR5014

[4] **Novichkov M.D., Gurin S.A., Shepeleva A.E., Pecherskaya E.A., Agafonov D.V., Ilyin V.A.** Nanostructured bimetallic PtNi catalyst for electrochemical systems with solid polymer electrolyte, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, 17 (3.1) (2024) 120–123. DOI: 10.18721/JPM.173.123

[5] **Яштулов Н.А., Лебедева М.В., Каплан И.М., Крапивко А.Л., Дулина О.А.** Формирование и исследование биметаллических электродных материалов на полимер-углеродных матрицах-носителях для источников энергии // *Chemical Bulletin*. 2022. Т. 5, № 1. С. 74–82.

[6] **Xiong L., Manthiram A.** Effect of atomic ordering on the catalytic activity of carbon supported PtM (M = Fe, Co, Ni, and Cu) alloys for oxygen reduction in PEMFCs, *Journal of the Electrochemical Society*, 152 (4) (2005) A697. DOI: 10.1149/1.1862256

[7] **Salgado J.R.C., Antolini E., Gonzalez E.R.** Structure and Activity of Carbon-Supported Pt-Co Electrocatalysts for Oxygen Reduction, *The Journal of Physical Chemistry B*, 108 (46) (2004) 17767–17774. DOI: 10.1021/jp0486649

[8] **Beniwal A, Gurjar H, Shekhawat K, Bagaria A, Bhalothia D.** Screening the Oxygen Reduction Reaction Performance of Carbon-Supported Pt-M (M = Ni, Cu, Co) Binary Electrocatalysts via Tuning Metal-Support Interaction, *Oxygen*, 5 (3) (2025) 10. DOI: 10.3390/oxygen5030010

[9] **Guterman V.E., Belenov S.V., Pakharev A.Yu., Min M., Tabachkova N.Yu., Mikheykina E.B., Vysochina L.L., Lastovina T.A.** Pt-M/C (M = Cu, Ag) electrocatalysts with an inhomogeneous distribution of metals in the nanoparticles, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (3) (2016) 1609–1626. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.11.002

[10] **Zhu X., Tan X., Wu K.-H., Haw S.-C., Pao C.-W., Su B.-J., Jiang J., Smith S.C., Chen J.-M., Amal R., Lu X.** Intrinsic ORR Activity Enhancement of Pt Atomic Sites by Engineering the d-Band Center via Local Coordination Tuning, *Angewandte Chemie International Edition*, 60 (40) (2021) 21911–21917. DOI: 10.1002/anie.202107790

[11] **Богдановская В.А., Вернигор И.Е., Радина М.В., Синицын П.А., Андреев В.Н., Никольская Н.Ф.** Эффективный PtNi/унт катализатор для реакции окисления водорода в щелочном электролите // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2023. Т. 59, № 6. С. 646–656. DOI: 10.31857/S0044185623700808

[12] Новичков М.Д., Гурин С.А., Печерская Е.А., Нестеров С.А., Гурин П.А., Агафонов Д.В. Технология формирования каталитических наноструктур полимерных ионообменных мембран // Нано- и микросистемная техника. 2025. Т. 27, № 2. С. 68–72. DOI: 10.17587/nmst.27.68-72

[13] Nesterov S.A., Gurin S.A., Pecherskaya E.A., Shelakhaev D.A., Fimin A.V. Development and research of a technology for producing a low-dimensional porous platinum-based catalyst by thermal evaporation in vacuum on an ion-exchange polymer membrane of a hydrogen generator electrolytic cell, Journal of Physics: Conference Series, 1695 (2020) 012188. DOI: 10.1088/1742-6596/1695/1/012188

[14] Мозжегорова Ю.В., Ильиных Г.В., Коротаев В.Н. Углеродный след энергетической установки на основе твердооксидного топливного элемента // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 2. С. 42–56. DOI: 10.18721/JEST.31204

[15] Chen G., Yang X., Xie Z., Zhao F., Zhou Z., Yuan Q. Hollow PtCu octahedral nanoalloys: Efficient bifunctional electrocatalysts towards oxygen reduction reaction and methanol oxidation reaction by regulating near-surface composition, Journal of Colloid and Interface Science, 562 (2020) 244–251. DOI: 10.1016/j.jcis.2019.12.020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НОВИЧКОВ Максим Дмитриевич – младший научный сотрудник, Пензенский государственный университет, без степени.

E-mail: novichkov1998maks@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9319-2475>

ГУРИН Сергей Александрович – начальник лаборатории, АО «Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов», канд. техн. наук.

E-mail: teslananoel@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9602-7221>

ПЕЧЕРСКАЯ Екатерина Анатольевна – заведующий кафедрой, Пензенский государственный университет, д-р техн. наук.

E-mail: peal@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5657-9128>

ШЕПЕЛЕВА Анастасия Эдуардовна – инженер-технолог, АО «Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов», без степени.

E-mail: anastasiya.shepeleva.01@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8600-084X>

АГАФОНОВ Дмитрий Вячеславович – инженер-технолог, АО «Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов», без степени.

E-mail: dmitryagafonov@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4548-3724>

Поступила: 11.12.2025; Одобрена: 15.02.2026; Принята: 15.02.2026.

Submitted: 11.12.2025; Approved: 15.02.2026; Accepted: 15.02.2026.

Материал был ранее опубликован. Ссылка для цитирования: М. Имроз, М.А. Басит Максены: новый чудо-материал // 10 прорывных идей в энергетике на следующие 10 лет, 2025. С. 60–69. Оригинальный полный текст доклада доступен по ссылке: <https://globalenergyprize.org/ru/2023/06/15/doklad-10-proryvnyh-idej-v-jenergetike-na-sledujushhie-10-let/>

М. Имроз, М.А. Басит

Лаборатория нанотехнологических исследований Физического факультета
Бангладешского университета инженерии и технологий, Дакка, Бангладеш

МАКСЕНЫ: НОВЫЙ ЧУДО-МАТЕРИАЛ

Введение. Глобальные усилия по борьбе с изменением климата и снижению зависимости от ископаемого топлива сделали передовые системы хранения энергии ключевым элементом происходящего энергетического перехода. Эти системы играют решающую роль в использовании прерывистых возобновляемых источников энергии, таких как солнце и ветер, одновременно способствуя прогрессу в области электромобильности, портативной электроники и интеллектуальной инфраструктуры. Данная трансформация основана на использовании достижений материаловедения, одним из которых является новый класс материалов — максены, быстро получающий признание благодаря своему исключительному потенциалу.

Максены — это двумерные (2D) карбиды, нитриды или карбонитриды переходных металлов, известные своей уникальной структурой и впечатляющими физико-химическими свойствами. Впервые они были синтезированы в 2011 году исследователями из Университета Дрекслея под руководством профессоров Юрия Гогоци и Мишеля Барсума. Целью команды исследователей было выполнение расслоения слоистых тройных карбидов, известных как МАХ-фаза и имеющих общую формулу $M_{n+1}AX_n$ (где $n = 1, 2$ или 3 ; M — это ранний переходный металл, такой как Ti , V или Mo ; A — элемент группы 13 или 14, такой как Al , Sn или Ga ; а X представляет собой углерод и/или азот).

Селективно вытравливая элемент A из МАХ-фаз, исследователи успешно изолировали атомарно тонкие 2D-слои, состоящие из карбидов переходных металлов — материалов, которые они назвали максены. Название отражает как их происхождение из фазы МАХ, так и их структурное сходство с графеном (на что указывает суффикс «-ен»).

Ti_3C_2 , первый и наиболее широко изученный максен, изначально исследовался на предмет возможности его использования для электрохимического хранения энергии, особенно в аккумуляторах и суперконденсаторах. С момента этого прорывного исследования было синтезировано более 30 различных максенов, а полученные теоретические модели дают основание предполагать, что их может быть сотни. Всего за десятилетие максены быстро стали ведущими кандидатами для создания высокоэффективных аккумуляторов, суперконденсаторов и гибридных систем хранения энергии. Их исключительная адаптивность обусловлена сочетанием слоистой структуры, высокой электропроводности и настраиваемых поверхностных окончаний, оказывающих большое влияние на их химическую реактивность, устойчивость к воздействию окружающей среды и взаимодействие с другими материалами. В результате в настоящее время изучается возможность применения максенов в самых различных сферах за пределами хранения энергии, включая экранирование электромагнитных излучений, очистку воды, датчики, катализ и биомедицинские технологии, что еще больше укрепляет их репутацию «чудо-материала» как среди исследователей, так и среди отраслевых экспертов.

В этой статье рассматривается путь, пройденный максенами, начиная с их открытия с получением впечатляющих характеристик до методов изготовления и управления характеристиками, определения возможностей хранения энергии и расширения технологического потенциала, и завершая оценкой перспективы их использования в формировании устойчивого будущего.

МАХ-фаза и максены

На рис. 1 представлен обзор элементов, участвующих в образовании МАХ-фаз и получаемых в результате максенов с общей химической формулой $M_{n+1}X_nT_x$, где T_x представляет собой поверхностные окончания, такие как кислород, гидроксил или фтор. Как показано на рис. 1а, в периодической таблице выделены элементы, обычно используемые в синтезе МАХ-фаз, с цветовой кодировкой, указывающей на их конкретную роль в образовании как МАХ-фаз, так и максенов. Рис. 1b и 1c дополнительно иллюстрируют кристаллические структуры трех типичных МАХ-фаз и соответствующих МХене после селективного травления, давая представление о структурной трансформации материала от его исходной фазы до полученного двумерного материала.

На рис. 2 обобщены основные достижения в области технологий синтеза МХене за последние 15 лет с прослеживанием эволюции стратегий изготовления от первоначального открытия в 2011 году до недавних инноваций. В ранних методах в основном использовалось травление фтористоводородной кислотой (HF), в то время как в последующих разработках применяются более безопасные альтернативы без использования фторидов, а также электрохимические методы. Эти развивающиеся подходы отражают постоянные усилия по увеличению объемов выпуска, безопасности, масштабируемости и экологической устойчивости производства максенов.

Многообещающие свойства максенов

Максены выделяются своим уникальным и синергетическим сочетанием свойств, что делает их одним из наиболее перспективных классов материалов в области передовых энергетических технологий. Ключевые характеристики данных материалов включают в себя следующее:

- Высокая электропроводность: максены могут демонстрировать проводимость на уровне металлов, часто соперничая или даже превосходя графен. Это имеет решающее значение для

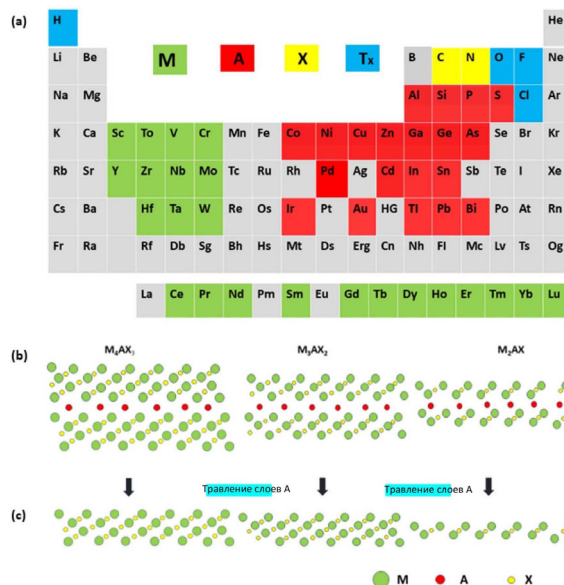


Рис. 1. (а) Периодическая таблица с выделением элементов, используемых в МАХ-фазах и соответствующих им максенов, и цветovým кодированием, указывающим на их роль в МАХ-фазах и образовании максенов. Схемы трех репрезентативных (b) МАХ-фаз и (c) полученных структур максенов

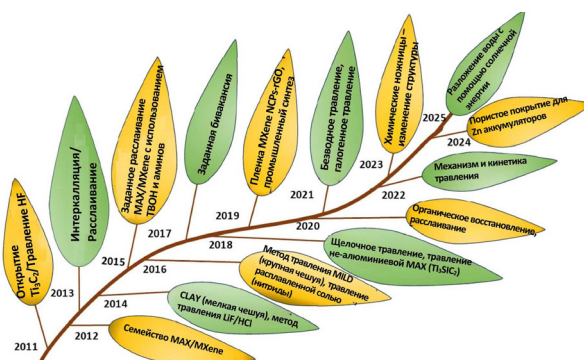


Рис. 2. Достижения в области технологий синтеза максенов за последние 15 лет

применений, требующих быстрой перенос электронов, таких как аккумуляторы, суперконденсаторы и экранирование электромагнитных излучений.

- **Гидрофильность:** в отличие от многих других двумерных материалов, максены обладают гидрофильными поверхностями благодаря наличию концевых функциональных групп, таких как $-\text{OH}$, $-\text{O}$ и $-\text{F}$. Это делает их хорошо совместимыми с водными средами и электролитами, способствуя лучшей диффузии ионов в устройствах хранения энергии.

- **Большая площадь поверхности и слоистая структура:** их двумерная чешуйчатая морфология в сочетании с регулируемым межслойным расстоянием обеспечивает эффективный перенос и хранение ионов. Эти особенности делают максены особенно эффективными в качестве электродов в суперконденсаторах и литий-ионных аккумуляторах.

- **Механическая прочность и гибкость:** максены могут быть изготовлены в виде тонких гибких пленок без ущерба для их структурной целостности. Эта механическая прочность в сочетании с гибкостью открывает возможности для их использования в гибкой и носимой электронике следующего поколения.

- **Настройка химических свойств:** одной из самых мощных характеристик МХене является возможность настраивания химических свойства поверхности. Модифицируя концевые группы или образуя композиты с другими материалами, исследователи могут адаптировать их электронные, оптические и каталитические свойства для различных целевых применений.

Все эти свойства делают максены идеальным кандидатом для технологий хранения энергии, требующих высокой мощности и плотности энергии, быстрой зарядки и разрядки, а также длительного срока службы. Их адаптивность также способствует их интеграции в различные платформы, от систем хранения энергии в масштабах энергосистемы до компактных носимых устройств.

Изготовление максенов из МАХ-фаз

Максены обычно синтезируются с использованием нисходящего подхода, который включает в себя селективное травление элемента А из слоистых тройных карбидов или нитридов, известных как МАХ-фазы. Этот процесс травления создает двумерные слои переходных металлов с уникальными химическими свойствами и структурами поверхности.

Синтез МАХ-фаз

МАХ-фазы обычно синтезируются посредством твердофазной реакции, при которой металлические порошки, такие как титан, алюминий и углерод (например, для образования Ti_2AlC), смешиваются и нагреваются в инертной атмосфере до высоких температур (обычно от 1300 до 1600 °C). В результате этого процесса образуются слоистые кристаллические соединения, используемые в качестве прекурсоров для синтеза максенов. Чтобы сделать процесс более энерго- и экономически эффективным, в недавних исследованиях были изучены методы с использованием расплавленной соли, позволяющие значительно снижать требуемую температуру синтеза.

В данном подходе в качестве реакционной среды используются соли, такие, как хлорид натрия (NaCl), позволяющие усиливать атомную диффузию и снижать энергию активации для образования фазы, создавая более благоприятную среду для создания Ti_2AlC . В результате высококачественные МАХ-фазы могут быть синтезированы при относительно более низких температурах, что делает процесс более масштабируемым и устойчивым. Недавние исследования также показали, что добавление избытка Al во время синтеза прекурсора МАХ-фазы Ti_3AlC_2 приводит к образованию зерен $Al-Ti_3AlC_2$, обладающих повышенной кристалличностью и улучшенной стехиометрией углерода. Нанолиты максенов, полученные из этого модифицированного прекурсора ($Al-Ti_3C_2$), демонстрируют превосходное качество, о чем свидетельствует их повышенная стойкость к окислению и значительное улучшение электронной проводимости, достигающей значений 20 000 См/см.

Синтез максенов

- Травление HF. В традиционном методе синтеза максенов для избирательного травления слоя A из МАХ-фазы используется фтористоводородная кислота (HF). Хотя этот метод и эффективен, он предполагает работу с высококоррозионной и токсичной HF, что создает серьезные проблемы с точки зрения безопасности и экологии.

- Получение HF на месте. Более безопасная альтернатива заключается в смешивании фторида лития (LiF) с соляной кислотой (HCl) для получения HF в процессе травления. Такой подход снижает прямое воздействие концентрированной HF, при этом обеспечивая эффективное травление элемента A. На рис. 3 представлена схема процесса травления, в ходе которого слоистые фазы Ti_2AlC МАХ преобразуются в двумерные нанолиты максенов.

Процесс включает в себя избирательное удаление элемента A из структуры МАХ с помощью химических травителей, в результате чего получают максены с несколькими слоями и поверхностными окончаниями (T_x), такими как $-OH$, $-F$ и $=O$, которые в значительной степени определяют физико-химические свойства получаемого материала.

- Травление без использования фторидов. В более поздних разработках основное внимание было уделено созданию методов, не предполагающих использование фторидов, таких как электрохимическое травление и технологии с использованием расплавленной соли, которые исключают применение фторированных реагентов. Эти методы набирают популярность как более экологичные, масштабируемые и безопасные для окружающей среды.

- Деламинация и эксфолиация. После травления многослойные максены деламинируются на несколько слоев или монослойные чешуйки с помощью органических интеркалянтов (например, DMSO или ТВАОН) с последующей мягкой ультразвуковой обработкой (соникацией).

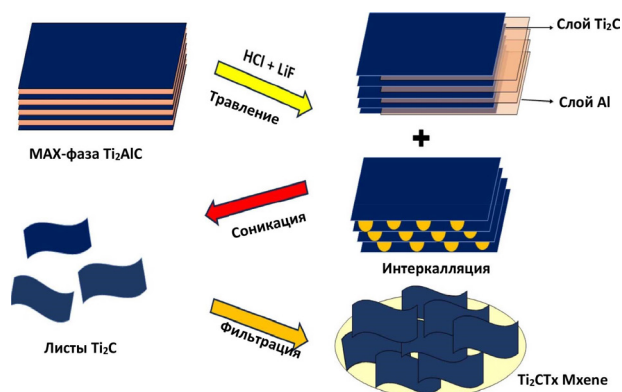


Рис. 3. Схематическая представление процесса травления, посредством которого слоистая МАХ-фаза Ti_2AlC преобразуется в двумерные нанолиты Ti_2C_x максенов. На рисунке показано селективное удаление атомов А-слоя (Al)

Этот этап позволяет увеличить площадь поверхности и улучшает возможность переноса ионов в таких применениях, как суперконденсаторы и аккумуляторы.

Регулируя такие параметры, как время травления, температура, концентрация кислоты и тип интеркалянта, исследователи могут точно контролировать толщину слоя максенов, поверхностные окончания и электрохимические характеристики, что делает этот процесс легко адаптируемым для целевых применений по хранению энергии.

Общие методы определения характеристик

Для определения характеристик максенов обычно требуется сочетание взаимодополняющих методов, позволяющих полностью понять их структуру, состав и химические свойства поверхности. К этим методам относятся:

- Рентгеновская дифракция: используется для отслеживания перехода от МАХ-фаз к максенам путем наблюдения за исчезновением характерных пиков МАХ-фазы и сдвига в дифракционных картинах, указывающих на увеличение межслойного расстояния.
- Сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия: выявляет листообразную морфологию, текстуру поверхности и слоистую структуру максенов в микро- и наномасштабе, подтверждая успешное расслоение.
- Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия: предоставляет подробную информацию о химическом состоянии составляющих элементов и проверяет наличие таких поверхностных окончаний, как $-O$, $-OH$ и $-F$.
- Атомно-силовая микроскопия: измеряет толщину отдельных чешуек и оценивает степень расслоения, позволяя получать топографические данные в наномасштабе.
- Спектроскопия рамановского рассеяния и ИК-Фурье спектроскопия: предоставляет дополнительную информацию о связующих средах и колебательных модах, помогая идентифицировать структурные изменения и функциональные группы, введенные во время синтеза.

Дополнительные методы определения характеристик

Дополнительные методы определения характеристик, такие как *in situ* спектроскопия и микроскопия в реальном времени, позволяют определить поведение максенов в реальном времени во время электрохимических процессов. Эти методы дают ценную информацию о диффузии ионов, кинетике переноса заряда и структурных превращениях, позволяя глубже понять динамическую природу максенов.

Эти методы позволяют исследователям оптимизировать параметры синтеза, проверять качество материалов и сопоставлять структурные особенности с электрохимическими характеристиками, прокладывая путь к разработке целевых применений.

Применение в области хранения энергии

Максены стали универсальными и высокоэффективными материалами, используемыми в различных технологиях хранения энергии. Проявляемое ими уникальное сочетание высокой электропроводности, настраиваемых химических свойств поверхности и слоистой структуры позволяет решать с их помощью ключевые проблемы как в традиционных, так и в новых энергетических устройствах.

- Суперконденсаторы. Максены особенно хорошо подходят для суперконденсаторов, где они обеспечивают исключительно высокую объемную емкость, достигающую 1500 Ф/см^3 , наряду с отличной скоростью заряда. Их проводящие слои, доступные для ионов, обеспечивают быстрые циклы заряда/разряда и проявляют высокую эффективность как в кислотных, так и в нейтральных электролитах.
- Литий-ионные и натрий-ионные аккумуляторы. Использование максенов в качестве анодных материалов позволяет получить высокую обратимую емкость, впечатляющий циклический

ресурс и быструю кинетику заряда. Их регулируемое межслойное расстояние облегчает плавную интеркаляцию и диффузию ионов, что делает их перспективными кандидатами для применения в аккумуляторах следующего поколения.

- Гибридные и твердотельные конденсаторы. В гибридных устройствах хранения энергии, сочетающих высокую плотность энергии аккумуляторов с быстрой отдачей мощности суперконденсаторов, максены служат в качестве превосходных проводящих каркасов. Исследуется также возможность их применения в гелевых и твердотельных электролитах, особенно для гибких и носимых электронных устройств.

- Псевдоемкостные материалы. Некоторые максены хранят энергию не только за счет электростатического разделения зарядов, но и за счет быстрых поверхностных окислительно-восстановительных реакций. Этот механизм, известный как псевдоемкость, значительно повышает емкость хранения энергии по сравнению с обычными двухслойными конденсаторами.

Для дальнейшего повышения эксплуатационных характеристик исследователи разрабатывают композитные материалы на основе максенов, интегрируя их с такими материалами, как проводящие полимеры, углеродные нанотрубки или оксиды переходных металлов. Эти гибридные электроды обладают синергетическими преимуществами, сочетая в себе проводимость, механическую прочность и окислительно-восстановительную активность, что позволяет раскрыть еще больший потенциал для практического применения данных материалов в системах хранения энергии.

Применение за пределами хранения энергии

Хотя максены широко известны своими выдающимися возможностями по хранению энергии, их уникальные свойства, такие как высокая проводимость, большая площадь поверхности, гидрофильность и настраиваемые поверхностные окончания, также открывают возможности для широкого спектра применений за пределами энергетических технологий

- Экранирование электромагнитных помех. Максены обладают превосходной электропроводностью и могут быть использованы для создания тонких гибких пленок, что делает их высокоэффективными для экранирования электронных устройств от электромагнитных помех. Малый вес и масштабируемость данных материалов делают их идеальным выбором для использования в аэрокосмической и оборонной промышленности, а также в бытовой электронике нового поколения.

- Очистка и опреснение воды. Слоистая структура и поверхностные функциональные группы максенов обеспечивают селективный перенос и адсорбцию ионов. Эти свойства используются в мембранах для удаления из воды тяжелых металлов, солей и органических загрязнений, что открывает многообещающие перспективы для создания доступных и эффективных решений в области водоочистки.

- Сенсорные технологии. Чувствительность максенов к изменениям электрического сопротивления и поверхностным взаимодействиям позволяет использовать их в качестве химических и биосенсоров. Области применения варьируются от обнаружения газа до носимых дозиметров, где решающее значение имеет гибкое и точное зондирование в режиме реального времени.

- Катализ. Максены служат в качестве активных катализаторов или подложек катализаторов для различных химических реакций, включая выделение водорода и восстановление CO_2 . Их высокая поверхностная реакционная способность и регулируемая электронная структура обеспечивают эффективную каталитическую активность, часто сопоставимую с активностью благородных металлов.

- Биомедицинские применения. Биосовместимость, фототермическая реакция и функциональная химия поверхности некоторых максенов вызвали к ним интерес в биомедицинских областях. Начавшиеся исследования направлены на изучения возможности их использование в доставке лекарств, фототермической терапии и антибактериальных покрытиях.

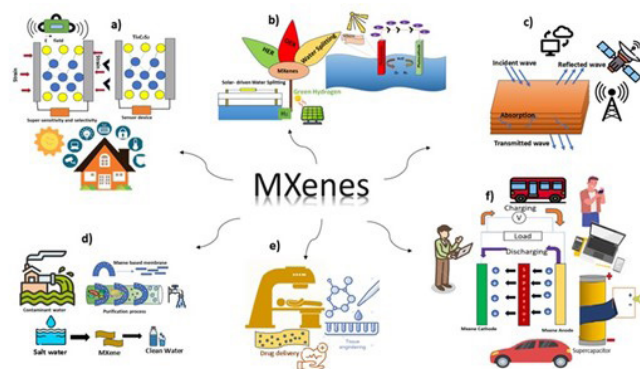


Рис. 4. Схематическое представление многофункциональных применений максенов: (a) датчики на основе максенов для мониторинга окружающей среды и биомедицинского мониторинга; (b) фотокаталитическое и электрокаталитическое расщепление воды; (c) экранирование электромагнитных помех ЭМИ); (d) очистка и опреснение воды; (e) биомедицинское применение, включая доставку лекарств и тканевую инженерию; (f) передовые материалы для электродов в устройствах хранения энергии, таких как суперконденсаторы и аккумуляторы

Эти новые области применения подчеркивают огромный потенциал максенов в различных секторах. По мере продвижения исследований максенов готовы стать ключевыми материалами как в энергетической, так и в неэнергетической сферах, стимулируя инновации во всех отраслях промышленности.

Проблемы и возможности

Несмотря на замечательные перспективы максенов, для полного использования их потенциала в коммерческих и промышленных применениях необходимо решить несколько важных задач. Эти задачи в основном связаны с ограничениями синтеза, проблемами стабильности и разнообразием материалов.

- **Безопасное и масштабируемое производство.** Наиболее широко используемые методы синтеза по-прежнему основаны на применении фтористоводородной кислоты, которая является высококоррозионным и опасным химическим веществом. Несмотря на появление альтернативных методов, не требующих использования фтористоводородной кислоты или позволяющих ее получать в процессе производства, они требуют дальнейшей оптимизации для обеспечения крупномасштабного, экономически эффективного и экологически безопасного производства. Разработка экологически чистых и воспроизводимых протоколов производства является необходимым условием для внедрения этой технологии в промышленность.

- **Окислительная и химическая стабильность.** Максены по своей природе склонны к окислению и деградации поверхности, особенно во влажной или водной среде. Эта нестабильность приводит к снижению электропроводности, ухудшению структуры и деградации со временем эксплуатационных характеристик. Хотя такие стратегии, как пассивация поверхности, защитные покрытия и интеркаляция ионов, показали себя многообещающими, всестороннего понимания механизмов деградации и влияния факторов окружающей среды в различных условиях синтеза пока нет. Повышение химической стабильности имеет решающее значение как для хранения, так и для интеграции устройств.

- **Воспроизводимость и стандартизация протоколов.** Различия в способах синтеза, чистоте прекурсоров и условиях расслоения приводят к нестабильности качества материалов и электрохимических характеристиках. Установление стандартизированных процедур и критериев качества будет иметь решающее значение для воспроизводимости результатов исследований и значимых межлабораторных сравнений.

• Ограниченное разнообразие материалов. Хотя было синтезировано более 30 составов максенов, большинство исследований сосредоточено на Ti_3C_2Tx . Исследование новых прекурсоров МАХ, разработка систем, не основанные на Ti, и создание легированных или сплавных вариантов может привести к получению материалов с новыми свойствами, подходящими для конкретных применений, основанных, например, на использовании таких явлений, как полупроводимость, магнетизм или биосовместимость.

Решение этих задач открывает значительные возможности. Прогресс в области масштабируемого синтеза, проектирования материалов и настройки свойств не только будет способствовать развитию технологий хранения энергии, но и откроет новые возможности для применения данных материалов в области сенсорики, катализа, водоочистки и биомедицины. Будущее максенов зависит от того, удастся ли превратить эти технические барьеры в трамплин для трансформационных инноваций.

Прогноз и перспективы

Максены быстро превратились из научной новинки в одно из самых динамичных и перспективных направлений создания двумерных материалов. Их исключительная структурная настраиваемость, поверхностная функциональность и большое разнообразие состава обеспечивают их уникальную универсальность в широком спектре применений. Хотя их роль в электрохимическом хранении энергии была широко изучена, максены в настоящее время делают значительные успехи в таких новых областях, как экранирование электромагнитных помех, гибкая электроника, катализ, очистка воды, восстановление окружающей среды и биомедицинские технологии.

Для реализации всего потенциала максенов потребуется переход от разработки отдельных материалов к интеграции на системном уровне. Успешное внедрение в реальные устройства, включая твердотельные аккумуляторы, гибридные суперконденсаторы, биосенсоры и мембранные технологии, будет зависеть от скоординированных усилий различных дисциплин. Химики, материаловеды, инженеры и представители промышленности должны работать совместно над разработкой композитов, гетероструктур и гибридных интерфейсов на основе максенов, которые обеспечивали бы высокие эксплуатационные характеристики, долгосрочную стабильность и масштабируемость.

Ожидается, что достижения в области компьютерного моделирования, машинного обучения и высокопроизводительных экспериментов будут играть решающую роль в скорейшем открытии максенов следующего поколения. Эти подходы могут послужить ориентиром для рационального проектирования новых составов, адаптированных к конкретным электронным, каталитическим, оптическим или биомедицинским функциям, что позволит расширить технологический ландшафт максенов далеко за пределы их текущих применений.

В более широком контексте устойчивого развития и цифровых инноваций максены имеют все возможности для поддержки важных глобальных переходов от ископаемого топлива к чистой энергии, от традиционных датчиков к интеллектуальной диагностике и от пассивных материалов к чувствительным многофункциональным системам. Однако для практического внедрения максенов в реальные технологии необходимо преодолеть несколько серьезных проблем. Одной из наиболее актуальных является обеспечение точного контроля стабильности материала на протяжении всего процесса синтеза, от подготовки МАХ-фазы до травления и расслоения. Стабильное качество, масштабируемость производства и экономическая эффективность являются необходимыми условиями для коммерческого внедрения технологий на основе максенов.

Благодаря постоянным инвестициям в фундаментальные исследования, междисциплинарное и научно-промышленное сотрудничество, а также развитию инфраструктуры, максены имеют потенциал стать ключевыми материалами для следующего поколения интеллектуальных, устойчивых и надежных технологий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Naguib M., Kurtoglu M., Presser V., Lu J., Niu J., Heon M., Hultman L., Gogotsi Y., Barsoum M.W. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2 , *Adv. Mater.*, 23, 4248–4253 (2011).
- [2] Anasori B., Lukatskaya M., Gogotsi Y. 2D metal carbides and nitrides (MXene) for energy storage, *Nat. Rev. Mater.*, 2, 16098 (2017).
- [3] Lukatskaya M., Kota S., Lin Z., Zhao M.-Q., Shpigel N., Levi M.D., Halim J., Taberna P.-L., Barsoum M.W., Simon P., Gogotsi Y. Ultra-high-rate pseudocapacitive energy storage in two-dimensional transition metal carbides, *Nat. Energy*, 2, 17105 (2017).
- [4] Xu Sh., Wei G., Li J., Han W., Gogotsi Y. Flexible MXene-graphene electrodes with high volumetric capacitance for integrated co-cathode energy conversion/storage devices, *J. Mater. Chem. A*, 5, 17442–17451 (2017).
- [5] Xia Y., Mathis T.S., Zhao M.-Q., Anasori B., Dang A., Zhou Z., Cho H., Gogotsi Y., Yang Sh. Thickness Independent Capacitance of Vertically Aligned Liquid Crystalline MXene, *Nature*, 557, 409–412 (2018).
- [6] Lanyong Yu, Longfeng Hu, Anasori B., Liu Y.-T., Zhu Q., Zhang P., Gogotsi Y., Xu B. MXene-Bonded Activated Carbon as a Flexible Electrode for High-Performance Supercapacitors, *ACS Energy Lett.*, 3, 1597–1603 (2018).
- [7] Zhang J., Zhao Y., Guo X., Chen Ch., Dong Ch.-L., Liu R.-Sh., Han C.-P., Li Y., Gogotsi Y., Wang G. Single platinum atoms immobilized on an MXene as an efficient catalyst for the hydrogen evolution reaction, *Nat. Catal.*, 1, 985–992 (2018).
- [8] Wang X., Mathis T.S., Li K., Lin Z., Vlcek L., Torita T., Osti N.C., Hatter Ch.B., Urbankowski P., Sarycheva A., Tyagi M., Mamontov E., Simon P., Gogotsi Y. Influences from solvents on charge storage in titanium carbide MXene, *Nat. Energy*, 4, 241 (2019).
- [9] Zhang Ch.J., Park S.-H., Seral-Ascaso A., Barwich S., McEvoy N., Boland C.S., Coleman J.N., Gogotsi Y., Nicolosi V. High Capacity Silicon Anodes Enabled by MXene Viscous Aqueous Ink, *Nat. Commun.*, 10, 849 (2019).
- [10] Gogotsi Y., Anasori B. The rise of MXene, *ACS Nano*, 13, 8491–8494 (2019).
- [11] Mohammadi A.V., Rosen J., Gogotsi Y. The world of two dimensional carbides and nitrides (MXene), *Science* 372, eabf1581 (2021).
- [12] Gogotsi Y., Huang Q. MXene: two-dimensional building blocks for future materials and devices, *ACS Nano*, 15, 5775–5780 (2021).
- [13] Murali Dr.G., Modigunta J.K.R., Park Y.H., Lee J.-H., Rawal J., Lee S.-Y., In I., Park S.-J. A Review on MXene Synthesis, Stability, and Photocatalytic Applications, *ACS Nano*, 16(9), 13370–13429 (2022).
- [14] Lim K.R.G., Shekhirev M., Wyatt B.C., Anasori B., Gogotsi Y., She Zh.W. Fundamentals of MXene synthesis, *Nat. Synth*, 1, 601–614 (2022).
- [15] Bibi F., Hanan A., Soomro I.A., Numan A., Khalid M. Double transition metal MXene for enhanced electrochemical applications: Challenges and opportunities, *EcoMat.*, 6(9), e12485 (2024).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ИМРОЗ Мастура — аспирант Лаборатории нанотехнологических исследований Физического факультета Бангладешского университета инженерии и технологий.

БАСИТ Мохаммед Абдул — профессор Лаборатории нанотехнологических исследований Физического факультета Бангладешского университета инженерии и технологий.

Металлургия. Материаловедение Metallurgy. Material Science

Научная статья

УДК 620.193

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32104>



С.А. Блинов, А.М. Левитский ✉, *О.Г. Зотов, Н.А. Голубков*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ levitskij_am@spbstu.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ НИКЕЛЕВОГО И ЦИНКОВОГО ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Аннотация. В работе проведены сравнительные испытания покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления (ХГДН), на пластины из стали СтЗсп. Напыление производилось на установке «Димет-405». Для напыления использовались готовые смеси: никелевая N3-00-02 и цинковая Z-00-11. После нанесения были проведены механические и коррозионные испытания полученных образцов. В результате визуального контроля, металлографического исследования, анализа скоростей коррозии и механических испытаний было показано, что покрытие на основе цинка превосходит покрытие на основе никеля по коррозионным свойствам, тогда как покрытие на основе никеля показало большую устойчивость к растрескиванию при изгибе.

Ключевые слова: коррозия, никель, цинк, ХГДН, коррозионностойкое покрытие.

Для цитирования:

Блинов С.А., Левитский А.М., Зотов О.Г., Голубков Н.А. Сравнительные испытания коррозионной стойкости никелевого и цинкового порошковых покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 1. С. 53–65. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32104>



S.A. Blinov, A.M. Levitsky  , O.G. Zotov, N.A. Golubkov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

 levitskij_am@spbstu.ru

COMPARATIVE CORROSION RESISTANCE TESTS OF NICKEL AND ZINC POWDER COATINGS APPLIED BY COLD GAS DYNAMIC SPRAYING

Abstract. The study conducted comparative tests of coatings deposited on St3sp steel plates using Cold Gas Dynamic Spraying (CGDS) method. The experiments were carried out using a “Dimet – 405” system. Ready-made powder mixtures were chosen as the material for spraying: nickel N3-00-02 and zinc Z-00-11. After deposition, the samples were subjected to mechanical and corrosion tests. As a result of visual inspection, metallographic examination, analysis of corrosion rates and mechanical tests, zinc-based coatings demonstrated superior to nickel-based coatings corrosion properties, while nickel-based coatings have shown higher resistance to cracking during bending.

Keywords: corrosion, nickel, zinc, Cold Gas Dynamic Spraying, corrosion-resistant coating.

Citation:

Blinov S.A., Levitsky A.M., Zotov O.G., Golubkov N.A., Comparative corrosion resistance tests of nickel and zinc powder coatings applied by cold gas dynamic spraying, *Global Energy*, 32 (01) (2026) 53–65, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32104>

Введение. Повышение срока эксплуатации изделий за счет нанесения покрытий является распространенной практикой в современной промышленности. Существует ряд задач, в которых критически важно не допустить перегрева изделия в процессе нанесения покрытия. Одним из методов, соответствующих данному требованию, является холодное газодинамическое напыление (ХГДН).

Этот способ нанесения покрытий относится к газотермическим [1]. Его суть заключается в придании частичкам металла кинетической энергии при помощи сжатого подогретого воздуха. В момент соприкосновения с подложкой частицы деформируются и налипают на нее, тем самым образуя сплошное покрытие [2–9]. Метод позволяет наносить широкий спектр материалов, начиная с полимерных [10] и заканчивая чистыми металлами или сплавами [11].

Материалы и методы

Исследования проводились на образцах стали марки Ст3сп 100×20×3 мм. Химический состав стали приведен в табл. 1.

Напыление производилось на установке ХГДН с низким давлением воздуха «Димет-405» (рис. 1). Напыление при низком давлении допустимо для металлов с высокой пластичностью [12]. Сравнение было проведено для никелевого и цинкового покрытий, в качестве материала для напыления были взяты готовые смеси: никелевая N3-00-02 и цинковая Z-00-11. В смесях, помимо основного металла, для повышения адгезионных свойств, содержался корунд Al_2O_3 [13–15]. Помимо оксида алюминия возможно добавление других керамических частиц, например SiC или BC [16].

Для использованных смесей исследовали технологические характеристики. Определение гранулометрического состава проводили на лазерном анализаторе размера частиц Fritsch



Рис. 1. Установка «Димет-405»

Fig. 1. "Dimet-405" unit

Таблица 1

Химический состав стали СтЗсп

Table 1

Chemical composition of St3sp steel

Содержание элементов, масс. %							
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
0,164	0,210	0,405	0,003	0,005	0,030	0,039	0,012

Analysette 22 NanoTec plus. Морфологию частиц определили на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss Supra 40VP, используя детектор вторичных электронов.

Нанесение покрытий выполняли вручную, чтобы максимально приблизить условия к реальному использованию установки. Перед нанесением образцы обезжиривали и затем подвергали абразивной обработке порошком электрокорунда К-00-04-02 на установке «Димет-405». Такая подготовка создает необходимую шероховатость поверхности для улучшения адгезии покрытия. Покрытия наносились при температуре 440°C. Полученные образцы представлены на рис. 2.

Проводились коррозионные испытания в камере соляного тумана, в морской воде, а также циклическое испытание «туман – воздух». Продолжительность каждого из испытаний составила 720 часов. После испытаний проводились визуальный контроль и взвешивание образцов для определения скорости коррозии. Расчет проводился исходя из данных об изменении массы образцов в ходе испытаний по следующей формуле:

$$r'_{corr} = \frac{\Delta m}{A \cdot \rho \cdot t'}$$

где r'_{corr} – скорость коррозии, мкм/год; ρ – плотность металла, г/см³; Δm – изменение массы, г; A – площадь поверхности, м²; t' – время выдержки, годы.

Испытание на трехточечный изгиб проводилось на испытательной машине Zwick/Roell Z100. Испытание продолжалось до тех пор, пока в покрытии не образовывалось трещин. В этот момент фиксировался угол изгиба.

Металлографическое исследование стали до и после коррозионных испытаний проводили на оптическом микроскопе Leica DMI 5000. На шлифах проводилось измерение толщины

покрытия. Также был определен химический состав окислов, образовавшихся в результате испытаний. Исследование проводили на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss Supra 40VP с использованием энерго-дисперсионного детектора Oxford методом рентгеноспектрального микроанализа.

Анализ результатов

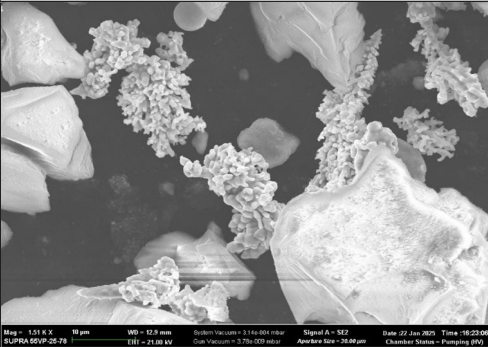
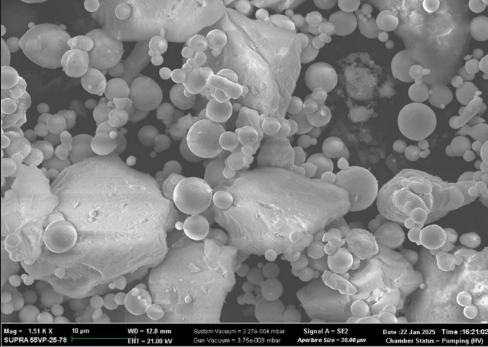
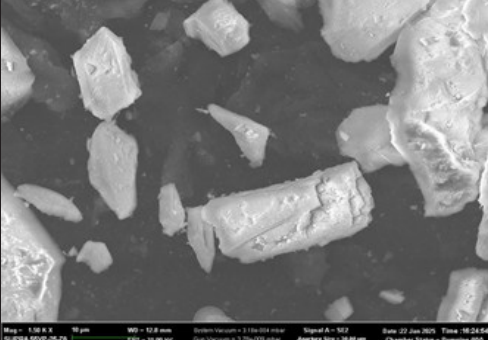
Результаты исследований морфологии и гранулометрического состава приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Морфология частиц (увеличение x1,5К)

Table 2

Morphology of particles (1.5K magnification)

Название порошка	Фото частиц	Форма частиц
N3-00-02		Дендритная (частицы никеля) / осколочная (частицы корунда)
Z-00-11		Сферическая (частицы цинка) / осколочная (частицы корунда)
K-00-04-02		Осколочная (частицы корунда)

Основная часть частиц во всех исследованных порошках составляет 40–60 мкм, при этом форма частиц варьируется. Следовательно, при подготовке порошковых смесей для нанесения покрытий методом ХГДН следует уделять внимание прежде всего фракции, тогда как форма частиц не оказывает существенного влияния.

В табл. 4 приведены результаты испытаний на трехточечный изгиб.

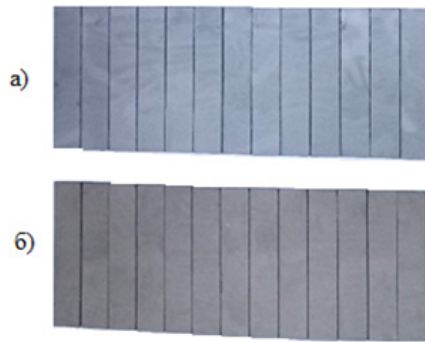


Рис. 2. Общий вид образцов после нанесения:
 а) образцы из Ст3 + ХГДН Z-00-11; б) образцы из Ст3 + ХГДН N3-00-02
 Fig. 2. General view of the samples after deposition:
 а) steel samples + CGDS Z-00-11; б) steel samples + CGDS N3-00-02

Таблица 3

Гранулометрический состав порошков

Table 3

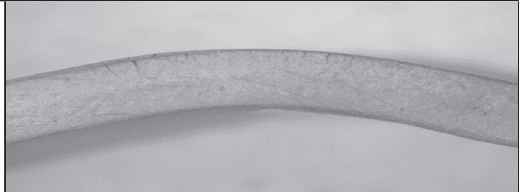
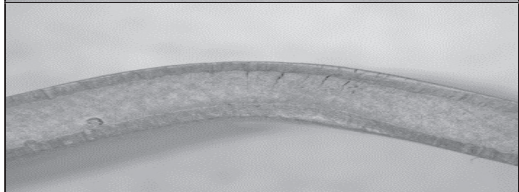
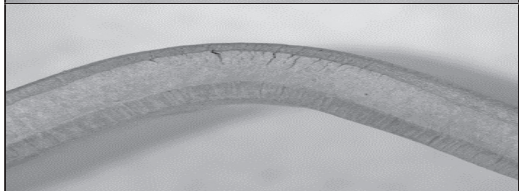

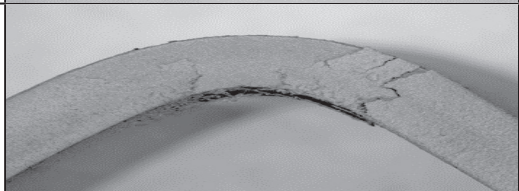
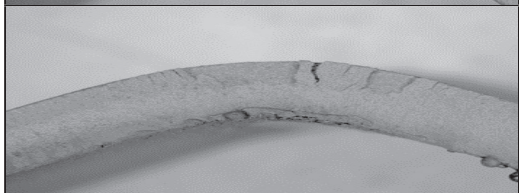
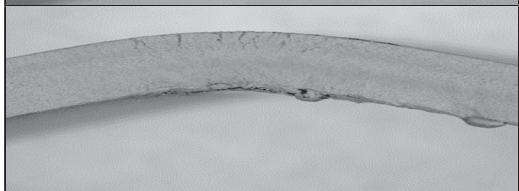
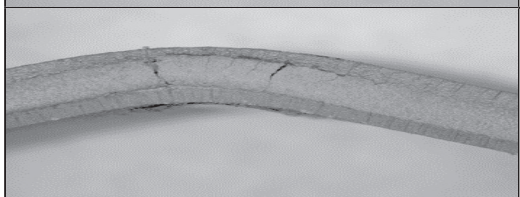
Granulometric composition of powders

Марка порошка	Гранулометрический состав
Z-00-11	
N3-00-02	
K-00-04-02	

Таблица 4
Вид образцов после проведения механических испытаний

Таблица 4

Samples after mechanical testing

Материал покрытия	Вид трещин на покрытии	Угол загиба, °	Толщина покрытия, мкм
Z-00-11		44	122
		51	132
		72	82,5
		26	87
N3-00-02		98	39
		61	49,5
		39	52,5
		45	47

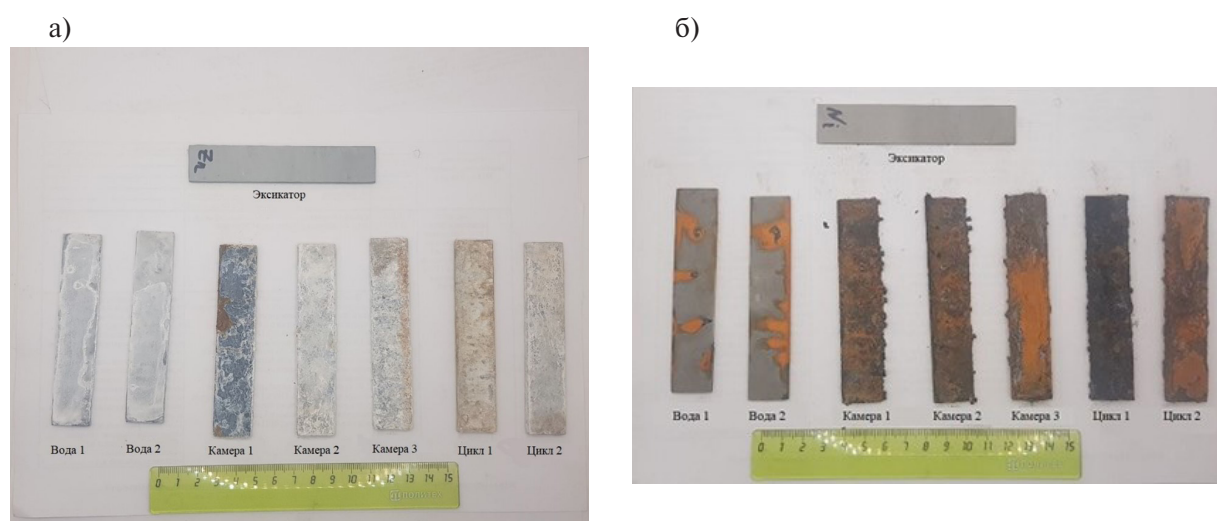


Рис. 3. Общий вид образцов после коррозионных испытаний:
а) образцы Ст3 + ХГДН Z-00-11; б) образцы Ст3 + ХГДН N3-00-02

Fig. 3. General view of the samples after corrosion testing:
a) steel samples + CGDS Z-00-11; b) steel samples + CGDS N3-00-02

Механические испытания показали, что покрытия на основе никеля обладают большей устойчивостью к трещинообразованию при изгибе. Средний угол изгиба, при котором образовалась трещина, для никелевого покрытия составил $60,8^\circ$, а для цинкового покрытия – $48,3^\circ$.

На рис. 3 показан внешний вид образцов после коррозионных испытаний в сравнении с видом образцов, хранившихся в эксикаторе. Скорости коррозии показаны в табл. 5.

Таблица 5

Скорости коррозии в условиях коррозионных испытаний

Table 5

Corrosion rates under corrosion testing conditions

№ п/п	Тип покрытия	Скорость коррозии, мм/год		
		Соляной туман	Морская вода	Циклическое
1	Ni	0,0558	0,3243	0,0265
2		0,1070	0,6483	0,0076
3		0,2922	—	—
4	Zn	0,0617	0,0464	0,0178
5		0,0832	0,0843	0,0044
6		0,0693	—	—

Результаты эксперимента показывают, что скорость коррозии у образцов с цинковым покрытием в среднем значительно ниже, чем у образцов с никелевым покрытием. Кроме того, на образцах с никелевым покрытием заметно большое количество окислов железа. На некоторых образцах с цинковым покрытием также заметны небольшие очаги коррозии.

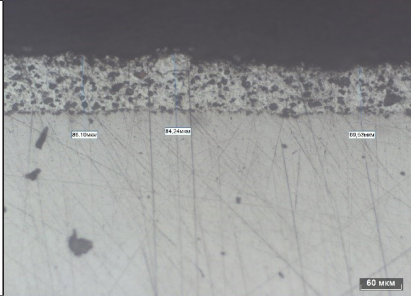

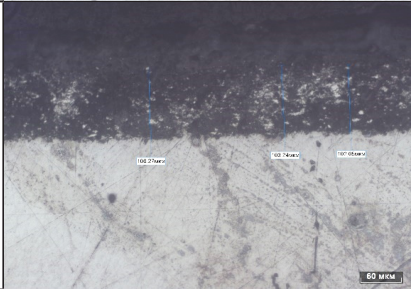
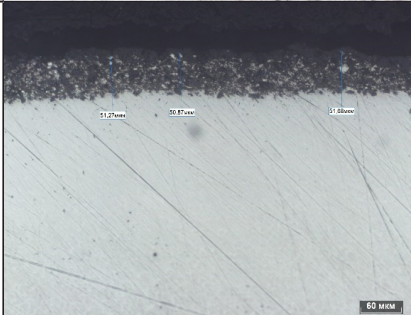
В табл. 6 показаны фотографии структуры покрытий образцов из эксикатора, а также образцов после коррозионных испытаний.

Таблица 6

Образцы с цинковым покрытием

Table 6

Zinc-coated samples

<p>Исходный образец</p>		<p>Средняя толщина слоя составила 79,96 мкм. Покрытие нанесено равномерно</p>
<p>Испытания при воздействии нейтрального соляного тумана</p>		<p>Средняя толщина слоя составила 98,05 мкм. Следов коррозии металла подложки нет. Заметно небольшое истончение покрытия, что является следствием взаимодействия цинка с коррозионной средой.</p>
<p>Циклические испытания «нейтральный соляной туман – воздух»</p>		<p>Средняя толщина слоя составила 103,85 мкм. Следов коррозии стальной подложки нет. Заметно небольшое истончение покрытия, что свидетельствует о взаимодействии цинка с коррозионной средой.</p>
<p>Испытание в морской воде</p>		<p>Средняя толщина слоя составила 51,27 мкм. Следов коррозии основного материала нет. Наблюдается сильное истончение покрытия.</p>

Обсуждение

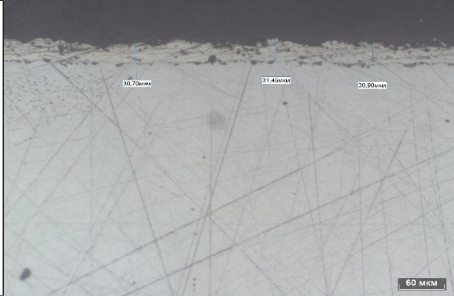
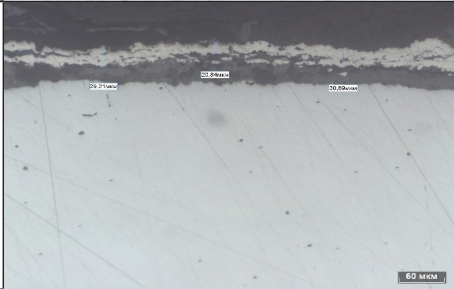
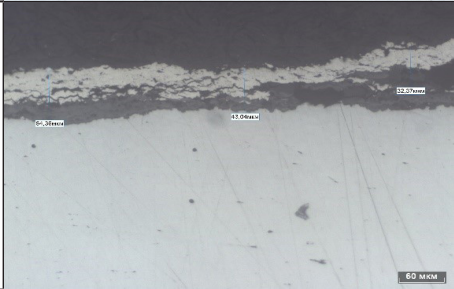
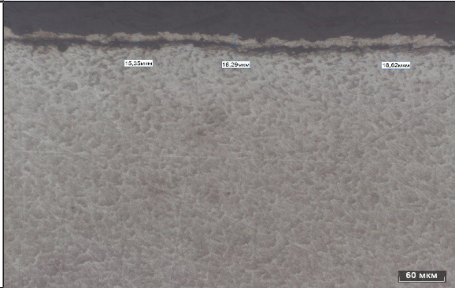
Предметом обсуждения является низкая коррозионная стойкость напыленного никелевого покрытия. Выдвинуто предположение, что толщина никелевого покрытия, в среднем составившая 29,5 мкм, оказалась недостаточной для защиты основного металла. В свою очередь малая толщина покрытия может получаться в связи с некорректным выбором температуры напыления. Нельзя также исключать возможность образования сквозных дефектов в никелевом покрытии при температуре нанесения 440°C. Этот вопрос требует дополнительного изучения.

Таблица 7

Образцы с никелевым покрытием

Table 7

Nickel-coated samples

Исходный образец		<p>Средняя толщина слоя покрытия составила 31,02 мкм.</p> <p>Покрытие нанесено неравномерно.</p>
Испытания при воздействии нейтрального соляного тумана		<p>Средняя толщина слоя покрытия 26,91 мкм.</p> <p>В слое защитного покрытия наблюдаются сквозные дефекты. Также отчетливо виден слой оксидов под покрытием.</p>
Циклические испытания «нейтральный соляной туман – воздух»		<p>Средняя толщина слоя покрытия составила 43,26 мкм.</p> <p>Наблюдается отслоение антикоррозийного покрытия. Образование оксидов под покрытием могло привести к его частичному отслоению.</p>
Испытание в морской воде		<p>Средняя толщина слоя покрытия составила 16,75 мкм.</p> <p>Наблюдается слой оксидов под покрытием.</p>

Заключение

По результатам всех коррозионных испытаний на стальных пластинах, покрытых никелем, очаги коррозии появились менее чем через 72 часа с начала испытаний. На стальных пластинах, покрытых цинком, очагов коррозии обнаружено не было.

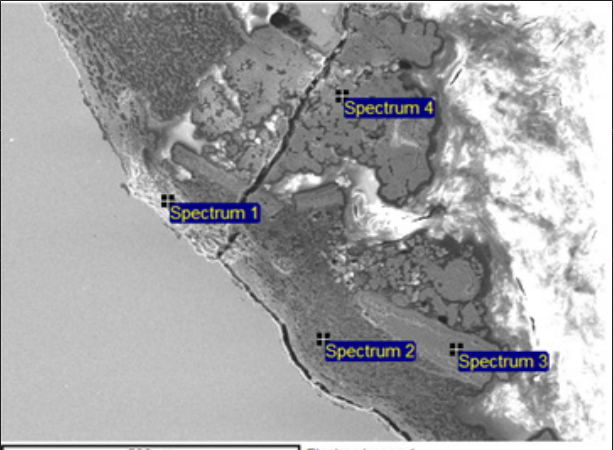
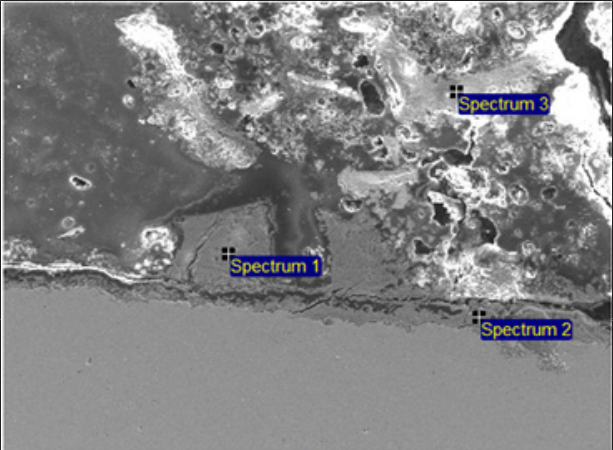
Исследования на сканирующем электронном микроскопе показали, что на образце с цинковым покрытием практически отсутствуют окислы железа, что говорит о высокой эффективности подобного покрытия. В то же время на образце с покрытием из никеля наблюдаются преимущественно оксиды железа, что указывает на его низкую коррозионную стойкость.

Таблица 8

Результаты исследования на сканирующем электронном микроскопе

Table 8

Results of the scanning electron microscope examination

Материал покрытия	Фотография	Химический состав
N3-00-02		Spectrum 1 O – 34,64% Cl – 1,56% Fe – 63,80%
		Spectrum 2 O – 24,80% Cl – 1,74% Fe – 73,46%
		Spectrum 3 O – 41,99% Fe – 58,01%
		Spectrum 4 O – 43,14% Fe – 56,86%
Z-00-11		Spectrum 1 O – 37,87% Cl – 4,64% Fe – 3,89% Zn – 53,59%
		Spectrum 2 O – 37,53% Cl – 3,92% Fe – 44,62% Zn – 13,92%
		Spectrum 3 O – 45,14% Cl – 5,92% Fe – 2,93% Zn – 46,01%

Причиной являются следующие факторы:

1) цинк является протектором, то есть его электрохимический потенциал ниже, чем у железа, соответственно, во время электрохимической коррозии цинк будет растворяться, тем самым защищая сталь;

2) металлографическое исследование показало, что при ручном нанесении никелевое покрытие ложится на стальную пластину неравномерно и покрытие получается слишком тонким. Чего нельзя сказать о цинковом покрытии, которое получилось сплошным и равномерным.

Покрытие на основе никеля продемонстрировало большую устойчивость к растрескиванию при изгибе. В случае покрытия на основе никеля средний угол изгиба, при котором наблюдается растрескивание, составил 60,7°. Для покрытия на основе цинка этот показатель составил 48,2°.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Экспериментальное исследование деформации и соединения микрочастиц с преградой при высокоскоростном ударе // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41, № 2. С. 47–52.
- [2] Li W.Y., Zhang D.D., Huang C.J., Yin S., Yu M., Wang F.F., Liao H.L. Modelling of impact behaviour of cold spray particles: review, *Surface Engineering*, 30 (2014) 299–308. DOI: 10.1179/1743294414Y.0000000268
- [3] Rahmati S., Ghaei A. The use of particle/substrate material models in simulation of cold-gas dynamic-spray process, *Journal of Thermal Spray Technology*, 23 (2014) 530–540. DOI: 10.1007/s11666-013-0051-4
- [4] Белай О.В., Киселев С.П., Киселев В.П. Численное моделирование методом молекулярной динамики соударения наночастицы с преградой в условиях холодного газодинамического напыления // Прикладная механика и техническая физика. 2023. Т. 64, № 6 (382), С. 27–35. DOI: 10.15372/PMTF202315303
- [5] Assadi H., Gärtner F., Stoltenhoff T., Kreye H. Bonding mechanism in cold gas spraying, *Acta Materialia*, 51 (15) (2003) 4379–4394. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00274-X
- [6] Ghelichi R., Bagherifard S., Guagliano M., Verani M. Numerical simulation of cold spray coating, *Surface and Coatings Technology*, 205 (23–24) (2011) P. 5294–5301. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.05.038
- [7] Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. М.: Физматлит, 2010. 536 с.
- [8] Алхимов А.П., Гулидов А.И., Косарев В.Ф., Нестерович Н.И. Особенности деформирования микрочастиц при ударе о твердую преграду // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41, № 1. С. 204–209.
- [9] Козлов И.А., Лещев К.А., Никифоров А.А., Демин С.А. Холодное газодинамическое напыление покрытий (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. Т. 90, № 8. С. 77–93. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93
- [10] Гнеденков А.С., Номеровский А.Д., Цветников А.К., Синебрюхов С.Л., Гнеденков С.В. Формирование композиционных полимерсодержащих покрытий на стали Ст3 с применением технологии холодного газодинамического напыления // Вестник ДВО РАН. 2022. № 6. С. 35–45. DOI: 10.37102/0869-7698_2022_226_06_3
- [11] Яковлева Н.В., Фармаковский Б.В., Макаров А.М., Старицын М.В. Исследование влияния отжига на свойства и структуру каталитического носителя на основе системы Ni-Al-Al₂O₃ на металлической подложке, полученного методом холодного газодинамического напыления // Научные технологии в машиностроении. 2022. Т. 5, № 131. С. 39–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-5-39-48
- [12] Schmidt T., Assadi H., Gärtner F., Richter H., Stoltenhoff T., Kreye H., Klassen T. From particle acceleration to impact and bonding in cold spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, 18 (2009) 794–808. DOI: 10.1007/s11666-009-9357-7
- [13] Prusov E.S., Deev V.B., Shurkin P.K., Arakelian S.M. The effect of alloying elements on the interaction of boron carbide with aluminum melt, *Non-ferrous Metals*, 1 (2021) 27–33. DOI: 10.17580/nfm.2021.01.04
- [14] Aborkin A.V., Babin D.M., Elkin A.I., Ryabkova V.V. Microhardness of gas-dynamic coatings from aluminum powder multi-reinforced with fullerenes and aluminum oxide, *Non-ferrous Metals*, 2 (2024) 52–57. DOI: 10.17580/nfm.2024.02.08
- [15] Павлов И.С. Определение влияния технологических параметров режимов напыления на структуру и свойства функциональных покрытий на основе Al₂O₃ и Cu, полученных методом холодного газодинамического напыления низкого давления // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. Т. 130, № 4. С. 1–15. DOI: 10.23670/IRJ.2023.130.20

[16] Косарев В.Ф., Шикалов В.С., Фуад М.Г., Видюк Т.М., Клинков С.В. Структура и свойства композиционных покрытий, формируемых методом холодного газодинамического напыления смесей порошков алюминия и карбида бора // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 3. С. 47–52. DOI: 10.25205/2541-9447-2022-17-3-47-52

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЛИНОВ Святослав Алексеевич – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: blinov_sa@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2017-8249>

ЛЕВИТСКИЙ Алексей Максимович – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: levitskij_am@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7900-4007>

ЗОТОВ Олег Геннадьевич – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: zog-58@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3243-4359>

ГОЛУБКОВ Никита Александрович – ведущий инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: golubkov-na@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6785-1444>

REFERENCES

[1] A.P. Alkhimov, S.V. Klinkov, V.F. Kosarev, Eksperimental'noe issledovanie deformatsii i soedineniia mikrochastits s pregradoi pri vysokoskorostnom udare [Experimental study of deformation and connection of microparticles with a barrier during high-speed impact], Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 41 (2) (2000) 47–52.

[2] W.Y. Li, D.D. Zhang, C.J. Huang, S. Yin, M. Yu, F.F. Wang, H.L. Liao, Modelling of impact behaviour of cold spray particles: review, Surface Engineering, 30 (2014) 299–308. DOI: 10.1179/1743294414Y.0000000268

[3] S. Rahmati, A. Ghaei, The use of particle/substrate material models in simulation of cold-gas dynamic-spray process, Journal of Thermal Spray Technology, 23 (2014) 530–540. DOI: 10.1007/s11666-013-0051-4

[4] O.V. Belai, S.P. Kiselev, V.P. Kiselev, Numerical simulation of a nanoparticle collision with a target by the molecular dynamics method under the conditions of cold gas-dynamic spraying, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 64 (6), 27–35. DOI: 10.15372/PMTF202315303

[5] H. Assadi, F. Gärtner, T. Stoltenhoff, H. Kreye, Bonding mechanism in cold gas spraying, Acta Materialia, 51 (15) (2003) 4379–4394. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00274-X

[6] R. Ghelichi, S. Bagherifard, M. Guagliano, M. Verani, Numerical simulation of cold spray coating, Surface and Coatings Technology, 205 (23–24) (2011) P. 5294–5301. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.05.038

[7] A.P. Alkhimov, S.V. Klinkov, V.F. Kosarev, V.M. Fomin, Kholodnoe gazodinamicheskoe napylenie. Teoriia i praktika [Cold Gas Spraying: Theory and Practice]. Moscow: Fizmatlit, 2010. 536 p.

- [8] **A.P. Alkhimov, A.I. Gulidov, V.F. Kosarev, N.I. Nesterovich**, Osobennosti deformirovaniia mikrochas-tits pri udare o tverdui pregradu [Features of microparticle deformation upon impact with a solid barrier], *Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaia fizika* [Applied mechanics and technical physics], 41 (1) (2000) 204–209.
- [9] **I.A. Kozlov, K.A. Leshchev, A.A. Nikiforov, S.A. Demin**, Cold Spray Coatings (review), *Trudy VIAM* (Proceedings of VIAM), 90 (8) (2020) 77–93. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93
- [10] **A.S. Gnedenkov, A.D. Nomerovskii, A.K. Tsvetnikov, S.L. Sinebryukhov, S.V. Gnedenkov**, Formation of the composite polymercontaining coatings on St3 steel using cold gas dynamic spraying technology, *Vestnik of the FEB RAS*, 6 (2022) 35–45. DOI: 10.37102/0869-7698_2022_226_06_3
- [11] **N.V. Yakovleva, B.V. Farmakovskiy, A.M. Makarov, M.V. Staritsyn**, Study of negative hardening effect on the properties and structure of the catalytic carrier based on a Ni-Al-Al₂O₃ system on a metal substrate obtained by cold gas dynamic coating, *Science intensive technologies in Mechanical Engineering*, 5 (131) (2022) 32–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-5-39-48
- [12] **T. Schmidt, H. Assadi, F. Gärtner, H. Richter, T. Stoltenhoff, H. Kreye, T. Klassen**, From particle acceleration to impact and bonding in cold spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, 18 (2009) 794–808. DOI: 10.1007/s11666-009-9357-7
- [13] **T. Prusov, V.B. Deev, P.K. Shurkin, S.M. Arakelian**, The effect of alloying elements on the in-teraction of boron carbide with aluminum melt, *Non-ferrous Metals*, 1 (2021) 27–33. DOI: 10.17580/nfm.2021.01.04
- [14] **A.V. Aborkin, D.M. Babin, A.I. Elkin, V.V. Ryabkova**, Microhardness of gas-dynamic coatings from aluminum powder multi-reinforced with fullerenes and aluminum oxide, *Non-ferrous Metals*, 2 (2024) 52–57. DOI: 10.17580/nfm.2024.02.08
- [15] **I.S. Pavlov**, The determination of the influence of technological parameters of spraying regimes on the structure and properties of functional Al₂O₃ and Cu based coatings obtained by low pressure gas dynamic cold spraying, *International Research Journal*, 130 (4) (2023) 1–15. DOI: 10.23670/IRJ.2023.130.20
- [16] **V.F. Kosarev, V.S. Shikalov, M.G. Fouad, T.M. Vidyuk, S.V. Klinkov**, Structure and properties of composite coatings cold sprayed from powder mixtures of Aluminum and Boron carbide, *Siberian Journal of Physics*, 17 (3) (2022) 47–52. DOI: 10.25205/2541-9447-2022-17-3-47-52

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sviatoslav A. BLINOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: blinov_sa@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2017-8249>

Alexey M. LEVITSKY – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: levitskij_am@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7900-4007>

Oleg G. ZOTOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: zog-58@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3243-4359>

Nikita A. GOLUBKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: golubkov-na@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6785-1444>

Поступила: 22.09.2025; Одобрена: 27.10.2025; Принята: 27.10.2025.

Submitted: 22.09.2025; Approved: 27.10.2025; Accepted: 27.10.2025.

Научная статья

УДК 621.762

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32105>



Д.В. Воеводенко ✉, *К.А. Стариков*, *А.А. Попович*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ voevodenko.daniil@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СЛП НА МИКРОСТРУКТУРУ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

Аннотация. Проведено исследование влияния параметров селективного лазерного плавления (СЛП) с высокотемпературным подогревом платформы до 1000 °С на формирование микроструктуры жаропрочного никелевого сплава GTD-111. Установлено, что варьирование параметров сканирования (линейной и объемной плотности энергии) не оказывает существенного влияния на размер выделений γ' -фазы. Однако выявлена закономерная пространственная неоднородность микроструктуры: в нижних слоях всех образцов, подвергавшихся длительному высокотемпературному воздействию, наблюдается начальная стадия формирования рафт-структуры (удлиненные частицы γ' -фазы). Показано, что данный процесс является следствием коагуляции частиц под влиянием температуры подогрева платформы и внутренних напряжений, что аналогично начальной стадии деградации сплавов в условиях ползучести. Результаты работы важны для разработки режимов СЛП монокристаллических изделий, таких как лопатки газовых турбин, с целью управления их структурой и эксплуатационными свойствами.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, селективное лазерное плавление, микроструктура, параметры.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда в рамках реализации проекта «Разработка новых функциональных материалов, интеллектуальных конструкций и технологий их создания методами аддитивного производства на основе современных подходов моделирования и прогнозирования свойств» (Соглашение № 23-79-30004, <https://rscf.ru/project/23-79-30004/>).

Для цитирования:

Воеводенко Д.В., Стариков К.А., Попович А.А. Исследование влияния параметров СЛП на микроструктуру жаропрочного никелевого сплава // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 1. С. 66–74. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32105>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32105>*D.V. Voevodenko* , *K.A. Starikov*, *A.A. Popovich*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

 voevodenko.daniil@mail.ru

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SLM PARAMETERS ON THE MICROSTRUCTURE OF A HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY

Abstract. The influence of the parameters of selective laser melting (SLM) with high-temperature heating of the platform to 1000 °C on the formation of the microstructure of heat-resistant nickel alloy GTD-111 has been studied. It was found that varying the scanning parameters (linear and volumetric energy density) has not significantly affect the size of the γ' -phase secretions. However, a regular spatial heterogeneity of the microstructure was revealed: in the lower layers of all samples exposed to prolonged high-temperature exposure, the initial stage of formation of the raft structure (elongated particles of the γ' -phase) was observed. It was shown that this process was a consequence of particle coagulation under the influence of platform heating temperature and internal stresses, which was similar to the initial stage of alloy degradation under creep conditions. The results of the work are important for the development of SLM modes for monocrystalline products, such as gas turbine blades, in order to control their structure and operational properties.

Keywords: heat-resistant nickel alloy, selective laser melting, microstructure, parameters.

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-79-30004 “Development of new functional materials, intelligent structures and technologies for their creation using additive manufacturing methods based on modern approaches to modeling and predicting properties”. Available online: <https://rscf.ru/project/23-79-30004/>.

Citation:

Voevodenko D.V., Starikov K.A., Popovich A.A., Investigation of the effect of SLM parameters on the microstructure of a heat-resistant nickel alloy, *Global Energy*, 32 (01) (2026) 66–74, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32105>

Введение. Современные исследования в области технологий селективного лазерного плавления (СЛП) концентрируются вокруг двух основных векторов. Один из них нацелен на разработку и изучение новых сплавов, специально адаптированных для аддитивного производства [1–6]. Другой вектор подразумевает всестороннее изучение воздействия технологических параметров и режимов СЛП на такие ключевые характеристики изделий, как плотность, микроструктура и механические свойства [7–10].

Несмотря на высокую исследовательскую активность, внедрение аддитивных подходов в серийные промышленные процессы пока не достигло широкого масштаба. Основными сдерживающими факторами являются отсутствие унифицированных стандартов, а также недостаточная изученность как теоретических основ, так и практических нюансов применения технологии. В то же время СЛП предлагает ряд принципиальных преимуществ, недоступных при использовании традиционных способов обработки. Ключевое из них – практически неограниченная свобода в создании деталей сложной геометрии, позволяющая реализовывать конструкции, которые невозможно получить классическими методами. Такие инженерные решения открывают путь к оптимизации компонентов технических систем, к облегчению веса конструкций без потери их надежности и, как результат, к повышению эффективности готовых изделий. Ярким

примером служат топологически оптимизированные, или бионические, структуры, создаваемые на основе расчетов методом конечных элементов. Данный подход, при котором из модели удаляется материал из ненагруженных областей, позволяет формировать сложные конфигурации, осуществимые исключительно благодаря аддитивным технологиям [11, 12].

Дальнейший прогресс в области СЛП в значительной степени будет зависеть от разработки новых материалов и усовершенствования методов их обработки. Особую роль здесь играет целенаправленное управление структурой и свойствами изделия, которое становится возможным благодаря особенностям кристаллизации, протекающей непосредственно в цикле печати [13–16].

Целью настоящего исследования являлось изучить, каким образом параметры СЛП в условиях повышенной температуры подогрева рабочей платформы воздействуют на процесс формирования структуры и на эксплуатационные характеристики материала.

Материалы и методы исследования

В данной работе использовался порошок жаропрочного никелевого сплава, применяемого для получения продуктов методом направленной кристаллизации. Для исследований был выбран распространенный жаропрочный никелевый сплав GTD-111, который применяется для производства турбинных лопаток (химический состав приведен в табл. 1).

Таблица 1

Химический состав никелевого сплава (мас. %)

Table 1

Chemical composition of nickel alloy (% by weight)

Элемент	Ni	Co	Cr	W	Mo	Al	Ti	Ta	C
Содержание, %	Осн.	9,0–10,0	13,5–14,3	3,5–4,1	1,7–2,3	2,7–3,2	2,7–3,2	2,5–3,1	0,07–0,12

В исследовании применялся порошковый материал, полученный методом плазменного распыления вращающегося электрода. Особенности фазового состава – наличие значительного количества интерметаллидных соединений – в сочетании с экстремальными скоростями локального нагрева и охлаждения при СЛП приводят к возникновению трещин. Для уменьшения этого эффекта используется подогрев рабочей зоны, который снижает температурные градиенты и уменьшает вероятность разрушения. Сплав относится к трехфазным системам и включает: γ -твердый раствор на основе Ni с ГЦК-решеткой; дисперсионные выделения γ' -фазы на базе интерметаллида Ni₃Al; карбиды типа MC.

Образцы для исследований изготовлены на установке высокотемпературного послойного лазерного синтеза «ВПЛС Меркурий» методом СЛП. Данная установка была разработана в СПбПУ вместе с ЗАО «Биоград» (3DLam). Данная установка имеет мультилазерную систему с одним лазером 500 Вт и двумя по 1000 Вт, габариты рабочей зоны 210 мм по высоте и 120 мм в диаметре, а также подогрев платформы до 1300 °С.

Изготовление образцов для экспериментов проводилось в инертной среде аргона при содержании кислорода не выше 20 ppm. Чтобы снизить вероятность возникновения температурного градиента при плавлении новых слоев, подложка предварительно была нагрета до 1000 °С. Прочие параметры процесса СЛП приведены в табл. 2.

После окончания процесса 3D печати образцы были удалены с платформы с применением эрозионной резки и отполированы вдоль направления роста образцов. После этого образцы были подвержены травлению в растворе, содержащем сульфат меди, а также серную и соляную

Таблица 2

Параметры процесса СЛП

Table 2

SLM process parameters

Плотность энергии	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Линейная (Дж/мм)	0,1	0,3	0,5
Объемная (Дж/мм ³)	60	100	150

кислоты. Дальнейшие исследования структуры, выявление и количественная оценка дефектов проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss Supra 55VP. Оптическая микроструктура образцов после СЛП исследовалась на световом оптическом микроскопе Leica DMI 5000.

Результаты и обсуждение

Распределение частиц порошка по размерам находится в диапазоне: $d_{10} = 26,3$ мкм; $d_{60} = 92,7$ мкм, со средним значением $d_{50} = 52,1$ мкм. Порошок имеет форму частиц, близкую к идеальным сферам, с небольшим количеством поверхностных дефектов.

Микроструктурные исследования показали наличие округлых частиц γ' -фазы (Ni_3Al), распределенных в γ -матрице на основе Ni(Al). Средние размеры таких частиц составляют 0,16–0,21 мкм. При анализе зон, расположенных на одинаковом расстоянии от основания образцов, зависимости размеров выделений γ' от параметров лазерного плавления зафиксировано не было. Однако в направлении роста отмечено постепенное уменьшение их размеров (рис. 2).

В нижней части образцов наблюдаются удлиненные частицы γ' -фазы с неполными границами раздела твердого раствора. Такая морфология может быть связана с коагуляцией частиц и трансформацией их формы. Поскольку нижние слои дольше подвергались воздействию температуры нагрева платформы, именно там возможно начало формирования рафт-структуры. Обычно подобная структура возникает в жаропрочных никелевых сплавах в условиях длительной ползучести при высоких температурах.

При ползучести пластическая деформация в γ/γ' -системах может происходить за счет скольжения дислокаций в каналах матрицы с изгибом частиц γ' либо через их рассеечение дислокациями, что сопровождается накоплением дефектов. Формирование рафт-структуры исключает

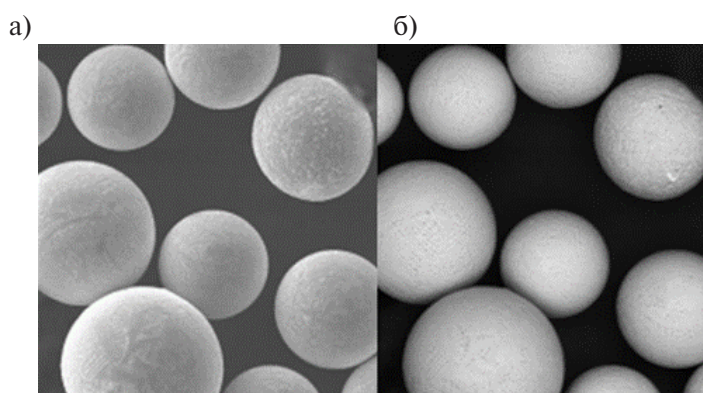


Рис. 1. Частицы порошка жаропрочного никелевого сплава GTD-111. Тип детектора, использованного при обследовании: а) SE; б) BSE

Fig. 1. Particles of heat-resistant nickel alloy GTD-111 powder. Type of detector used in the examination: a) SE; b) BSE

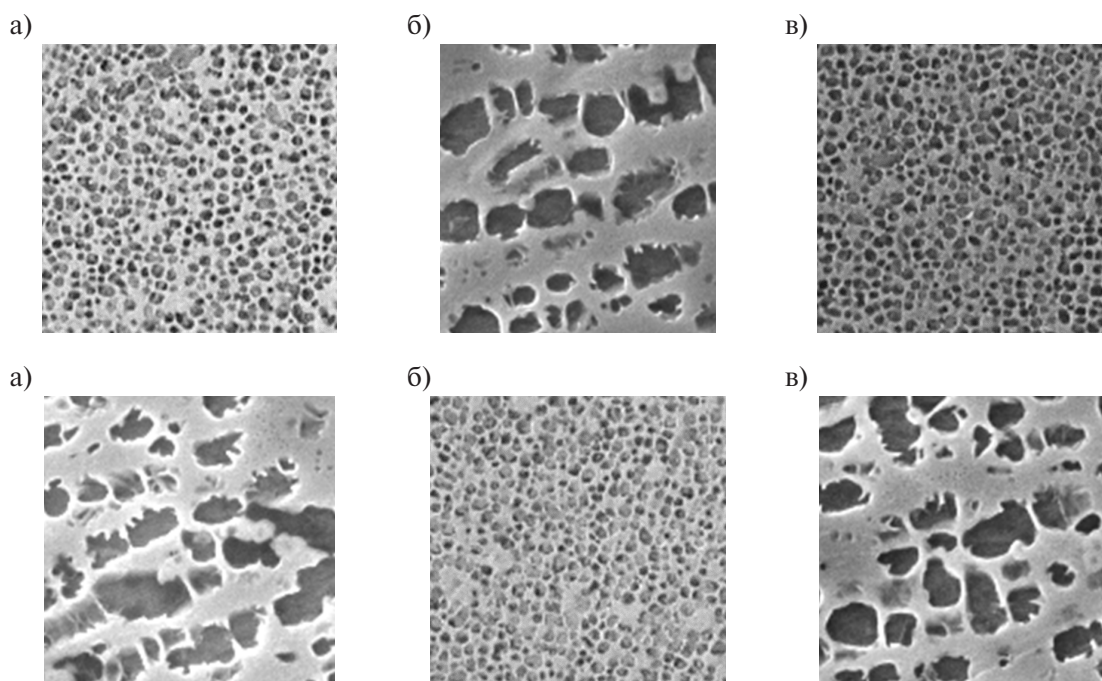


Рис. 2. Изображения микроструктуры γ/γ' после СЛП в верхней (а) и нижней (б) частях образца 1; в верхней (в) и нижней (г) частях образца 2; в верхней (д) и нижней (е) частях образца 3

Fig. 2. Images of the γ/γ' microstructure after SLM in the upper (a) and lower (b) parts of sample 1; in the upper (c) and lower (d) parts of sample 2; in the upper (e) and lower (f) parts of sample 3

оба этих механизма, вынуждая материал деформироваться за счет перемещения винтовых дислокаций – процесса энергозатратного, особенно при отношении длины пластин к их толщине больше единицы. В этом случае более вероятным становится рассечение пластин парой дислокаций, что приводит к охрупчиванию нижних слоев. Даже несмотря на начальную стадию объединения частиц γ' -фазы в пластины, при изготовлении, например, турбинной лопатки процесс займет значительно больше времени. Это означает, что нижние слои дольше будут находиться в условиях высокотемпературной ползучести, что может привести к развитию полноценной рафт-структуры.

Послойное формирование изделий в технологии СЛП накладывает ограничения на величину температуры подогрева и общую продолжительность процесса при производстве деталей с монокристаллической или направленной структурами, таких как, например, лопатки газовых турбин. Во время сильного подогрева рабочей платформы значения температуры должны быть зафиксированы в рабочих пределах выбранного сплава.

Заключение

В данной статье образцы были изготовлены с использованием трех наборов параметров (табл. 2) для изучения влияния параметров процесса СЛП на микроструктуру γ/γ' . Для сравнительной оценки микроструктуры полученных образцов определялись размер и форма частиц γ' -фазы. На основе полученных данных мы можем заключить, что параметры сканирования не влияют на микроструктуру. Однако в ходе исследования было выявлено закономерное изменение микроструктуры в нижних слоях всех образцов. В нижних слоях происходит начальная стадия перехода от округлой структуры частиц γ' -фазы к рафт-структуре. Этот переход происходит под воздействием высокой температуры нагрева рабочей платформы (>1000 °C), а также под воздействием внутренних напряжений, возникающих в образцах в процессе кристаллизации при СЛП.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Chauvet E., Tassin C., Blandin J.-J., Dendievel R., Martin G.** Producing Ni-base superalloys single crystal by selective electron beam melting, *Scripta Materialia*, 152 (2018) 15–19. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.03.041
- [2] **Battaglia F., Zhang X., Arie M.A., Shooshtari A., Sarmiento A.P., Ohadi M.** Additive manufacturing of a high temperature, Ni-based superalloy compact heat exchanger: A study on the role of select key printing parameters, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 145 (4) (2023) 041901. DOI: 10.1115/1.4056484
- [3] **Ramsperger M., Körner C.** Selective electron beam melting of the single crystalline nickel-base superalloy CMSX-4®: From columnar grains to a single crystal, *Superalloys 2016: Proceedings of the 13th International Symposium of Superalloys*, (2016) 341–349.
- [4] **Mazzer E.M., da Silva M.R., Gargarella P.** Revisiting Cu-based shape memory alloys: Recent developments and new perspectives, *Journal of Materials Research*, 37 (2022) 162–182. DOI: 10.1557/s43578-021-00444-7
- [5] **Hao Liu, Xinbao Zhao, Yong Yuan, Yingying Dang, Weiqi Li, Jiachen Xu, Yuan Cheng, Quanzhao Yue, Yuefeng Gu, Ze Zhang.** Influence of thermal exposure on microstructural stability and tensile properties of a new Ni-base superalloy, *Journal of Materials Research and Technology*, 21 (2022) 4462–4472. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.11.050
- [6] **Zifu Li, Hongyao Yu, Zhongnan Bi, Xingmao Wang, Guohao Liu, Guangbao Sun, Rui Wang, Shangzhou Zhang.** Oxygen-rich combustion behaviors and mechanisms of a new Ni-Cr-based superalloy fabricated by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 914 (2024) 147133. DOI: 10.1016/j.msea.2024.147133
- [7] **Wei Xiong, Liang Hao, Yan Li, Danna Tang, Qian Cui, Zuying Feng, Chunze Yan.** Effect of selective laser melting parameters on morphology, microstructure, densification and mechanical properties of super-saturated silver alloy, *Materials & Design*, 170 (2019) 107697. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107697
- [8] **Popovich V.A., Borisov E.V., Sufiyarov V.Sh., Popovich A.A.** Tailoring the properties in functionally graded alloy Inconel 718 using additive technologies, *Metal Science and Heat Treatment*, 60 (2019) 701–709. DOI: 10.1007/s11041-019-00343-z
- [9] **Nandhakumar R., Venkatesan K.** A process parameters review on selective laser melting-based additive manufacturing of single and multi-material: Microstructure, physical properties, tribological, and surface roughness, *Materials Today Communications*, 35 (2023) 105538. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.105538
- [10] **Jalali M., Mohammadi K., Movahhedy M.R., Karimi F., Khatiboleslam Sadrnezhaad S., Chernyshikhin S.V., Shishkovsky I.V.** SLM additive manufacturing of NiTi porous implants: a review of constitutive models, finite element simulations, manufacturing, heat treatment, mechanical, and biomedical studies, *Metals and Materials International*, 29 (2023) 2458–2491. DOI: 10.1007/s12540-023-01401-1
- [11] **Gasser A., Backes G., Kelbassa I., Weisheit A., Wissenbach K.** Laser additive manufacturing: Laser metal deposition (LMD) and selective laser melting (SLM) in turbo-engine applications, *Laser Technik Journal*, (2010) 58–63. DOI: 10.1002/latj.201090029
- [12] **Kushwaha A.K., Rahman M.H., Slater E., Patel R., Evangelista C., Austin E., Tompkins E., McCarrroll A., Rajak D.K., Menezes P.L.** Powder bed fusion-based additive manufacturing: SLS, SLM, SHS, and DMLS, *Tribology of Additively Manufactured Materials*, (2022) 1–37. DOI: 10.1016/B978-0-12-821328-5.00001-9
- [13] **Razumov N.G., Popovich A.A., Grigor'ev A.V., Silin A.O., Goncharov I.S.** Morphology of high-strength heat-resistant steel powder for machines for additive production from shavings, *Metal Science and Heat Treatment*, 60 (2019) 710–714. DOI: 10.1007/s11041-019-00344-y
- [14] **Jianjun Xu, Xin Lin, Pengfei Guo, Hongbiao Dong, Xiaoli Wen, Qiuge Li, Lei Xue, Weidong Huang.** The initiation and propagation mechanism of the overlapping zone cracking during laser solid forming

of IN-738LC superalloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 749 (2018) 859–870. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.03.366

[15] **Cheng Ai, Qing Li, Jun Zhang, Haijun Su, Wenchao Yang, Lin Liu, Yi Ru, Heng Zhang, Yuanyuan Song, Yongnan Chen, Shusuo Li, Shengkai Gong.** Effect of substituting Mo for W on γ/γ' partitioning behaviors of alloying elements in heat-treated second generation Ni based single crystal superalloys: An atom probe tomography study, *Intermetallics*, 134 (2021) 107198. DOI: 10.1016/j.intermet.2021.107198

[16] **Fengyun Ding, Linsen Zhou, Liang Zhao, Xilong Dou, Kela Xiao, Jiangfeng Song, Jiguang Du, Gang Jiang.** Theoretical study on the influence of Cr, Mo, and W alloying additions on the helium behavior in nickel, *Journal of Nuclear Materials*, 565 (2022) 153720. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2022.153720

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВОЕВОДЕНКО Даниил Витальевич – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: voevodenko.daniil@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3045-5923>

СТАРИКОВ Кирилл Андреевич – младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: starikovkirillandreevich@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8466-3340>

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич – директор ИММТ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: popovicha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

REFERENCES

[1] **E. Chauvet, C. Tassin, J.-J. Blandin, R. Dendievel, G. Martin,** Producing Ni-base superalloys single crystal by selective electron beam melting, *Scripta Materialia*, 152 (2018) 15–19. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.03.041

[2] **F. Battaglia, X. Zhang, M.A. Arie, A. Shoostari, A.P. Sarmiento, M. Ohadi,** Additive manufacturing of a high temperature, Ni-based superalloy compact heat exchanger: A study on the role of select key printing parameters, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 145 (4) (2023) 041901. DOI: 10.1115/1.4056484

[3] **M. Ramsperger, C. Körner,** Selective electron beam melting of the single crystalline nickel-base superalloy CMSX-4®: From columnar grains to a single crystal, *Superalloys 2016: Proceedings of the 13th International Symposium of Superalloys*, (2016) 341–349.

[4] **E.M. Mazzer, M.R. da Silva, P. Gargarella,** Revisiting Cu-based shape memory alloys: Recent developments and new perspectives, *Journal of Materials Research*, 37 (2022) 162–182. DOI: 10.1557/s43578-021-00444-7

[5] **Hao Liu, Xinbao Zhao, Yong Yuan, Yingying Dang, Weiqi Li, Jiachen Xu, Yuan Cheng, Quanzhao Yue, Yuefeng Gu, Ze Zhang,** Influence of thermal exposure on microstructural stability and tensile properties of a new Ni-base superalloy, *Journal of Materials Research and Technology*, 21 (2022) 4462–4472. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.11.050

- [6] Zifu Li, Hongyao Yu, Zhongnan Bi, Xingmao Wang, Guohao Liu, Guangbao Sun, Rui Wang, Shangzhou Zhang, Oxygen-rich combustion behaviors and mechanisms of a new Ni-Cr-based superalloy fabricated by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 914 (2024) 147133. DOI: 10.1016/j.msea.2024.147133
- [7] Wei Xiong, Liang Hao, Yan Li, Danna Tang, Qian Cui, Zuying Feng, Chunze Yan, Effect of selective laser melting parameters on morphology, microstructure, densification and mechanical properties of super-saturated silver alloy, *Materials & Design*, 170 (2019) 107697. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107697
- [8] V.A. Popovich, E.V. Borisov, V.Sh. Sufiyarov, A.A. Popovich, Tailoring the properties in functionally graded alloy Inconel 718 using additive technologies, *Metal Science and Heat Treatment*, 60 (2019) 701–709. DOI: 10.1007/s11041-019-00343-z
- [9] R. Nandhakumar, K. Venkatesan, A process parameters review on selective laser melting-based additive manufacturing of single and multi-material: Microstructure, physical properties, tribological, and surface roughness, *Materials Today Communications*, 35 (2023) 105538. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.105538
- [10] M. Jalali, K. Mohammadi, M.R. Movahhedy, F. Karimi, S. Khatiboleslam Sadrnezhad, S.V. Chernyshikhin, I.V. Shishkovsky, SLM additive manufacturing of NiTi porous implants: a review of constitutive models, finite element simulations, manufacturing, heat treatment, mechanical, and biomedical studies, *Metals and Materials International*, 29 (2023) 2458–2491. DOI: 10.1007/s12540-023-01401-1
- [11] A. Gasser, G. Backes, I. Kelbassa, A. Weisheit, K. Wissenbach, Laser additive manufacturing: Laser metal deposition (LMD) and selective laser melting (SLM) in turbo-engine applications, *Laser Technik Journal*, (2010) 58–63. DOI: 10.1002/latj.201090029
- [12] A.K. Kushwaha, M.H. Rahman, E. Slater, R. Patel, C. Evangelista, E. Austin, E. Tompkins, A. McCarroll, D.K. Rajak, P.L. Menezes, Powder bed fusion-based additive manufacturing: SLS, SLM, SHS, and DMLS, *Tribology of Additively Manufactured Materials*, (2022) 1–37. DOI: 10.1016/B978-0-12-821328-5.00001-9
- [13] N.G. Razumov, A.A. Popovich, A.V. Grigor'ev, A.O. Silin, I.S. Goncharov, Morphology of high-strength heat-resistant steel powder for machines for additive production from shavings, *Metal Science and Heat Treatment*, 60 (2019) 710–714. DOI: 10.1007/s11041-019-00344-y
- [14] Jianjun Xu, Xin Lin, Pengfei Guo, Hongbiao Dong, Xiaoli Wen, Qiuge Li, Lei Xue, Weidong Huang, The initiation and propagation mechanism of the overlapping zone cracking during laser solid forming of IN-738LC superalloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 749 (2018) 859–870. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.03.366
- [15] Cheng Ai, Qing Li, Jun Zhang, Haijun Su, Wenchao Yang, Lin Liu, Yi Ru, Heng Zhang, Yuanyuan Song, Yongnan Chen, Shusuo Li, Shengkai Gong, Effect of substituting Mo for W on γ/γ' partitioning behaviors of alloying elements in heat-treated second generation Ni based single crystal superalloys: An atom probe tomography study, *Intermetallics*, 134 (2021) 107198. DOI: 10.1016/j.intermet.2021.107198
- [16] Fengyun Ding, Linsen Zhou, Liang Zhao, Xilong Dou, Kela Xiao, Jiangfeng Song, Jiguang Du, Gang Jiang, Theoretical study on the influence of Cr, Mo, and W alloying additions on the helium behavior in nickel, *Journal of Nuclear Materials*, 565 (2022) 153720. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2022.153720

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Daniil V. VOEVODENKO – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: voevodenko.daniil@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3045-5923>

Kirill A. STARIKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: starikovkirillandreevich@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8466-3340>

Anatoliy A. POPOVICH – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: popovicha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

Поступила: 20.10.2025; Одобрена: 19.11.2025; Принята: 04.12.2025.

Submitted: 20.10.2025; Approved: 19.11.2025; Accepted: 04.12.2025.

Научная статья

УДК 621.762

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32106>



Д.В. Воеводенко , *К.А. Стариков, А.А. Попович*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

 voevodenko.daniil@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЛП НА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В ЖАРОПРОЧНОМ НИКЕЛЕВОМ СПЛАВЕ

Аннотация. В работе исследовано влияние параметров селективного лазерного плавления (СЛП) на образование трещин в монокристаллическом никелевом жаропрочном сплаве с предварительным нагревом подложки до 1200 °С. Установлено, что увеличение линейной и объемной плотности энергии подавляет трещинообразование, снижая количество дефектов, а также показано, что трещины зарождаются преимущественно вдоль границ дендритов в зонах сегрегации легирующих элементов и выделения карбидов Та и Мо. Сделан вывод, что повышение энергетических параметров СЛП снижает скорость кристаллизации, обеспечивает более равномерное затвердевание и способствует значительному уменьшению количества трещин.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, селективное лазерное плавление, дефекты, трещины, параметры.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда в рамках реализации проекта «Разработка новых функциональных материалов, интеллектуальных конструкций и технологий их создания методами аддитивного производства на основе современных подходов моделирования и прогнозирования свойств» (Соглашение № 23-79-30004, <https://rscf.ru/project/23-79-30004/>).

Для цитирования:

Воеводенко Д.В., Стариков К.А., Попович А.А. Влияние параметров селективного лазерного плавления на трещинообразование в жаропрочном никелевом сплаве // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 1. С. 75–83. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32106>



D.V. Voevodenko ✉, *K.A. Starikov*, *A.A. Popovich*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ voevodenko.daniil@mail.ru

EFFECT OF SELECTIVE LASER MELTING PARAMETERS ON CRACKING IN HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY

Abstract. The effect of the parameters of selective laser melting (SLM) on the formation of cracks in a monocrystalline nickel heat-resistant alloy with preheating of the substrate to 1200 °C. It was found that an increase in linear and volumetric energy density suppresses cracking, reducing the number of defects, and it is also shown that cracks originate mainly along the boundaries of dendrites in the zones of segregation of alloying elements and the release of carbides Ta and Mo. It is concluded that increasing the energy parameters of SLM reduces the rate of crystallization, ensures more uniform solidification and contributes to a significant reduction in the number of cracks.

Keywords: heat-resistant nickel alloy, selective laser melting, defects, cracks, parameters.

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-79-30004 “Development of new functional materials, intelligent structures and technologies for their creation using additive manufacturing methods based on modern approaches to modeling and predicting properties”. Available online: <https://rscf.ru/project/23-79-30004/>.

Citation:

Voevodenko D.V., Starikov K.A., Popovich A.A., Effect of selective laser melting parameters on cracking in heat-resistant nickel alloy, *Global Energy*, 32 (01) (2026) 75–83, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32106>

Введение. Интенсивное развитие аддитивных технологий напрямую связано с необходимостью поиска и внедрения новых материалов, пригодных для изготовления сложных деталей методом аддитивного производства (АП). За последние годы опубликовано значительное количество исследований, посвященных созданию, исследованию свойств и применению материалов для аддитивной промышленности [1–6].

Монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы были разработаны во второй половине XX в. и традиционно применяются для производства рабочих лопаток газотурбинных двигателей методом направленной кристаллизации [7, 8]. Однако из-за неравновесного характера кристаллизации изделия, полученные этим способом, отличаются выраженной химической и структурной неоднородностью. В частности, в дендритных осях и приграничных областях наблюдаются существенные различия в морфологии γ' -фазы: вблизи границ дендритов частицы γ' значительно крупнее по сравнению с их размером в центральных зонах. Проведение высокотемпературной гомогенизации позволяет снизить указанную неоднородность и обеспечить более равномерное распределение фаз в микроструктуре сплава.

Селективное лазерное плавление (СЛП) имеет определенное преимущество по сравнению с направленной кристаллизацией, так как способствует более равномерному распределению легирующих элементов в объеме изделия. Вместе с тем данный метод требует тщательной оптимизации технологических параметров и сопровождается рядом характерных проблем, среди которых одной из наиболее серьезных является склонность материала к образованию трещин в процессе печати [9–17].

Целью настоящего исследования являлось изучить, каким образом параметры СЛП в условиях повышенной температуры подогрева рабочей платформы воздействуют на процесс трещинообразования в монокристаллическом жаропрочном никелевом сплаве GTD-111, а также выявить механизмы их образования.

Материалы и методы исследования

В данной работе использовался порошок жаропрочного никелевого сплава, применяемого для получения продуктов методом направленной кристаллизации. Для исследований был выбран распространенный жаропрочный никелевый сплав GTD-111, который применяется для производства турбинных лопаток (химический состав приведен в табл. 1).

Таблица 1

Химический состав порошка никелевого сплава (мас. %)

Table 1

Chemical composition of nickel alloy powder (% by weight)

Элемент	Ni	Co	Cr	W	Mo	Al	Ti	Ta	C
Содержание, %	Осн.	9,0–10,0	13,5–14,3	3,5–4,1	1,7–2,3	2,7–3,2	2,7–3,2	2,5–3,1	0,07–0,12

Образцы для исследований изготовлены на установке высокотемпературного послойного лазерного синтеза «ВПЛС Меркурий» методом СЛП. Данная установка была разработана в СПбПУ вместе с ЗАО «Биоград» (3DLam). Данная установка имеет мультилазерную систему с одним лазером 500 Вт и двумя по 1000 Вт, габариты рабочей зоны 210 мм по высоте и 120 мм в диаметре, а также подогрев платформы до 1300 °С.

Изготовление образцов для экспериментов проводилось в инертной среде аргона при содержании кислорода не выше 20 ppm. Чтобы снизить вероятность возникновения температурного градиента при плавлении новых слоев, подложка предварительно была нагрета до 1200 °С. Прочие параметры процесса СЛП приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры процесса СЛП

Table 2

SLM process parameters

Плотность энергии	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Линейная (Дж/мм)	0,1	0,3	0,5
Объемная (Дж/мм ³)	60	100	150

После окончания процесса 3D печати образцы были удалены с платформы с применением эрозионной резки и отполированы вдоль направления роста образцов. После этого образцы были подвержены травлению в растворе, содержащем сульфат меди, а также серную и соляную кислоты. Дальнейшие исследования структуры, выявление и количественная оценка дефектов проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss Supra 55VP. Оптическая микроструктура образцов после СЛП исследовалась на световом оптическом микроскопе Leica DMI 5000.



Рис. 1. Трещины вдоль поперечного сечения по направлению построения (BD) образца: а) 1; б) 2; в) 3
 Fig. 1. Cracks along the cross section in the direction of construction (BD) of the sample: а) 1; б) 2; в) 3

Результаты и обсуждение

Исследование целостности образцов методом оптической микроскопии показало, что при увеличении линейной плотности и объемной плотности энергии снижается количество трещин и разломов. На панорамных изображениях центральной части образцов (рис. 1) видно, что образцы демонстрируют улучшение целостности материала при более высоких значениях. В частности, на рис. 1в показано, что в образце 3, выращенном при линейной плотности энергии 0,5 и объемной 150 (табл. 2), практически отсутствуют крупные дефекты.

Таблица 3

Результаты графического анализа изображений, полученных с помощью оптического микроскопа
 Table 3

The results of graphical analysis of images obtained using an optical microscope

	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Количество трещин, %	> 3,5	> 0,8	> 0,03

Микроструктурный анализ выявил, что образцы характеризуются гетерофазной структурой, включающей столбчатые ячейки γ -фазы, ориентированные вдоль направления построения (указано стрелкой на рис. 1), а также дисперсную γ' -фазу на основе интерметаллида Ni_3Al , локализованную вблизи дендритных границ. Дополнительно в междендритных зонах отмечены сегрегация легирующих элементов и образование карбидов (рис. 2 и 3). Карбидные выделения играют важную роль в обеспечении прочностных характеристик жаропрочных никелевых сплавов при температурах выше предела растворимости γ' -фазы. Их упрочняющее действие связано с подавлением рекристаллизации вдоль дендритных границ и улучшением термостойкости материала. Согласно данным EDX-анализа (рис. 3), данные выделения идентифицированы как карбиды Ta и Mo.

Данные сканирующей электронной микроскопии показали, что трещины преимущественно формируются вдоль границ дендритных зерен в областях повышенной концентрации карбидных выделений, несмотря на их важную роль в обеспечении жаропрочных свойств никелевых сплавов.

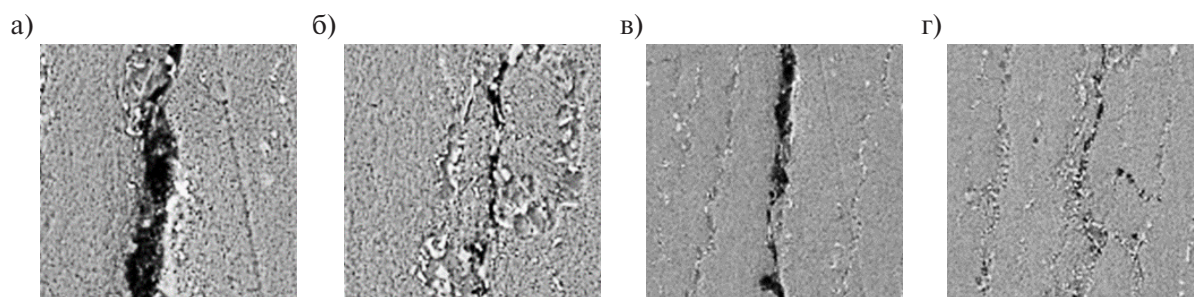


Рис. 2. Изображения сканирующей электронной микроскопии, показывающие растрескивание внутри дендритной микроструктуры: а и б – образец 1; в – образец 2; г – образец 3

Fig. 2. Scanning electron microscopy images showing cracking inside the dendritic microstructure: a and b – sample 1; c – sample 2; d – sample 3

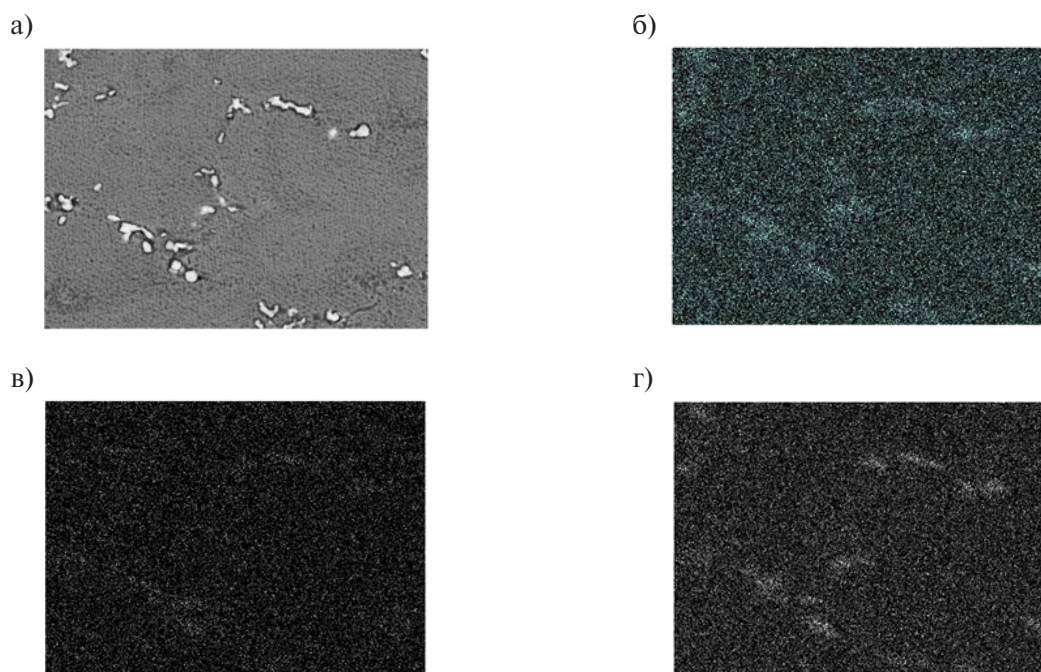


Рис. 3. Результаты EDX-анализа первого образца, полученного методом селективного лазерного плавления: а) общее изображение; б) тантал; в) углерод; г) молибден

Fig. 3. Results of EDX analysis of the first sample obtained by selective laser melting: a) general image; b) tantalum; c) carbon; d) molybdenum

Основной механизм развития трещинообразования связан с формированием усадочных микропор в междендритных пространствах монокристаллического сплава, а также на границах γ -фазы, эвтектики, частиц упрочняющей γ' -фазы и карбидов Ta и Mo. При высоких скоростях кристаллизации, характерных для режимов с низкой линейной плотностью энергии, зоны расплава ограничены, с одной стороны, фронтом растущих дендритов, а с другой, выделившимися в расплаве карбидами. В процессе затвердевания такие зоны испытывают тепловую усадку, что приводит к зарождению трещин. Последующее увеличение объема пор и их коагуляция под действием термических напряжений вызывают образование макротрещин.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует влияние параметров СЛП на уплотнение и образование трещин в монокристаллическом никелевом сплаве. Установлено, что целостность образцов напрямую зависит от линейной и объемной плотности энергии: при их увеличении количество дефектов существенно снижается.

Механизм трещинообразования связан с термической усадкой в процессе кристаллизации локальных зон расплава, ограниченных дендритами и карбидами Ta и Mo. В условиях высокой скорости кристаллизации, характерной для режимов с низкой линейной плотностью энергии, такие зоны быстро затвердевают, что приводит к образованию усадочных микропор.

Последующая их коагуляция под действием термических напряжений вызывает формирование трещин.

Увеличение линейной плотности энергии снижает скорость кристаллизации и обеспечивает более равномерное протекание процессов затвердевания по всему объему расплава. Это способствует компенсации усадки и уменьшает количество критических зон, что, в свою очередь, снижает склонность материала к образованию трещин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Eskandari H., Lashgari H.R., Zangeneh Sh., Kong C., Ye L., Eizadjou M., Wang H.** Microstructural characterization and mechanical properties of SLM-printed Ti–6Al–4V alloy: Effect of build orientation, *Journal of Materials Research*, 37 (2022) 2645–2660. DOI: 10.1557/s43578-021-00468-z

[2] **Zhenglei Yu, Zezhou Xu, Yunting Guo, Pengwei Sha, Ruiyao Liu, Renlong Xin, Lunxiang Li, Lixin Chen, Xiebin Wang, Zhihui Zhang, Luquan Ren.** Analysis of microstructure, mechanical properties, wear characteristics and corrosion behavior of SLM-NiTi under different process parameters, *Journal of Manufacturing Processes*, 75 (2022) 637–650. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.01.010

[3] **Farber E., Zhu J.-N., Popovich A., Popovich V.** A review of NiTi shape memory alloy as a smart material produced by additive manufacturing, *Materials Today: Proceedings*, 30 (3) (2020) 761–767. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.563

[4] **Hosseini E., Popovich V.A.** A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718, *Additive Manufacturing*, 30 (2019) 100877.

[5] **Praneeth J., Venkatesh S., Krishna L.S.** Process parameters influence on mechanical properties of AlSi10Mg by SLM, *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.12.222

[6] **Heo S., Lim Y., Kwak N., Jeon C., Choi M., Jo I.** Impact of heat treatment and building direction on tensile properties and fracture mechanism of Inconel 718 produced by SLM process, *Metals*, 14 (4) (2024) 440. DOI: 10.3390/met14040440

[7] **Chauvet E., Tassin C., Blandin J.-J., Dendievel R., Martin G.** Producing Ni-base superalloys single crystal by selective electron beam melting, *Scripta Materialia*, 152 (2018) 15–19. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.03.041

[8] **Tao S., Gao R., Peng H., Guo H., Chen B.** High-reliability repair of single-crystal Ni-base superalloy by selective electron beam melting, *Materials & Design*, 224 (2022) 111421. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.111421

[9] **Jianjun Xu, Xin Lin, Pengfei Guo, Hongbiao Dong, Xiaoli Wen, Qiuge Li, Lei Xue, Weidong Huang.** The initiation and propagation mechanism of the overlapping zone cracking during laser solid forming of IN-738LC superalloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 749 (2018) 859–870. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.03.366

[10] **Kou S.** A criterion for cracking during solidification, *Acta Materialia*, 88 (2015) 366–374. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.01.034

- [11] Chunlei Qiu, Haoxiu Chen, Qi Liu, Sheng Yue, Huaming Wang. On the solidification behaviour and cracking origin of a nickel-based superalloy during selective laser melting, *Materials Characterization*, 148 (2019) 330–344. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.12.032
- [12] Jingjing Yang, Fangzhi Li, Zemin Wang, Xiaoyan Zeng. Cracking behavior and control of Rene 104 superalloy produced by direct laser fabrication, *Journal of Materials Processing Technology*, 225 (2015) 229–239. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.06.002
- [13] Han Q., Mertens R., Montero-Sistiaga M.L., Yang S., Setchi R., Vanmeensel K., Van Hooreweder B., Evans S.L., Fan H. Laser powder bed fusion of Hastelloy X: Effects of hot isostatic pressing and the hot cracking mechanism, *Materials Science and Engineering: A*, 732 (2018) 228–239. DOI: 10.1016/j.msea.2018.07.008
- [14] Zhaoyang Liu, Huan Qi, Liang Jiang. Control of crystal orientation and continuous growth through inclination of coaxial nozzle in laser powder deposition of single-crystal superalloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 230 (2016) 177–186. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.11.017
- [15] Jones R., Rans C., Iliopoulos A.P., Michopoulos J.G., Phan N., Peng D. Modelling the variability and the anisotropic behaviour of crack growth in SLM Ti-6Al-4V, *Materials*, 14 (6) (2021) 1400. DOI: 10.3390/ma14061400
- [16] Haselbozchaloe D., Correia J.A.F.O., Braga D.F.O., Cipriano G., Reis L., Manuel L., Moreira P.M.G.P. Quantifying uncertainty in fatigue crack growth of SLM 316L through advanced predictive modeling, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures (FFEMS)*, 47 (9) (2024) 3116–3132. DOI: 10.1111/ffe.14361
- [17] He Y., Zhao K., Zhang Y., Prashanth K.G., Ye Z., Yu Z., Zhang F. Evaluation of fatigue crack growth rates and fracture toughness in a selective laser-melted Ti-5.6 Al-3.8 V alloy with optimized microstructure after heat treatment, *Materials Science and Engineering: A*, 924 (2025) 147822. DOI: 10.1016/j.msea.2025.147822

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВОЕВОДЕНКО Даниил Витальевич – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: vovodenko.daniil@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3045-5923>

СТАРИКОВ Кирилл Андреевич – младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: starikovkirillandreevich@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8466-3340>

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич – директор ИММТ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: popovicha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

REFERENCES

- [1] H. Eskandari, H.R. Lashgari, Sh. Zangeneh, C. Kong, L. Ye, M. Eizadjou, H. Wang, Microstructural characterization and mechanical properties of SLM-printed Ti-6Al-4V alloy: Effect of build orientation, *Journal of Materials Research*, 37 (2022) 2645–2660. DOI: 10.1557/s43578-021-00468-z

- [2] **Zhenglei Yu, Zezhou Xu, Yunting Guo, Pengwei Sha, Ruiyao Liu, Renlong Xin, Lunxiang Li, Lixin Chen, Xiebin Wang, Zhihui Zhang, Luquan Ren**, Analysis of microstructure, mechanical properties, wear characteristics and corrosion behavior of SLM-NiTi under different process parameters, *Journal of Manufacturing Processes*, 75 (2022) 637–650. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.01.010
- [3] **E. Farber, J.-N. Zhu, A. Popovich, V. Popovich**, A review of NiTi shape memory alloy as a smart material produced by additive manufacturing, *Materials Today: Proceedings*, 30 (3) (2020) 761–767. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.563
- [4] **E. Hosseini, V.A. Popovich**, A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718, *Additive Manufacturing*, 30 (2019) 100877.
- [5] **J. Praneeth, S. Venkatesh, L.S. Krishna**, Process parameters influence on mechanical properties of AlSi10Mg by SLM, *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.12.222
- [6] **S. Heo, Y. Lim, N. Kwak, C. Jeon, M. Choi, I. Jo**, Impact of heat treatment and building direction on tensile properties and fracture mechanism of Inconel 718 produced by SLM process, *Metals*, 14 (4) (2024) 440. DOI: 10.3390/met14040440
- [7] **E. Chauvet, C. Tassin, J.-J. Blandin, R. Dendievel, G. Martin**, Producing Ni-base superalloys single crystal by selective electron beam melting, *Scripta Materialia*, 152 (2018) 15–19. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.03.041
- [8] **S. Tao, R. Gao, H. Peng, H. Guo, B. Chen**, High-reliability repair of single-crystal Ni-base superalloy by selective electron beam melting, *Materials & Design*, 224 (2022) 111421. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.111421
- [9] **Jianjun Xu, Xin Lin, Pengfei Guo, Hongbiao Dong, Xiaoli Wen, Qiuge Li, Lei Xue, Weidong Huang**, The initiation and propagation mechanism of the overlapping zone cracking during laser solid forming of IN-738LC superalloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 749 (2018) 859–870. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.03.366
- [10] **S. Kou**, A criterion for cracking during solidification, *Acta Materialia*, 88 (2015) 366–374. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.01.034
- [11] **Chunlei Qiu, Haoxiu Chen, Qi Liu, Sheng Yue, Huaming Wang**, On the solidification behaviour and cracking origin of a nickel-based superalloy during selective laser melting, *Materials Characterization*, 148 (2019) 330–344. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.12.032
- [12] **Jingjing Yang, Fangzhi Li, Zemin Wang, Xiaoyan Zeng**, Cracking behavior and control of Rene 104 superalloy produced by direct laser fabrication, *Journal of Materials Processing Technology*, 225 (2015) 229–239. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.06.002
- [13] **Q. Han, R. Mertens, M.L. Montero-Sistiaga, S. Yang, R. Setchi, K. Vanmeensel, B. Van Hooreweder, S.L. Evans, H. Fan**, Laser powder bed fusion of Hastelloy X: Effects of hot isostatic pressing and the hot cracking mechanism, *Materials Science and Engineering: A*, 732 (2018) 228–239. DOI: 10.1016/j.msea.2018.07.008
- [14] **Zhaoyang Liu, Huan Qi, Liang Jiang**, Control of crystal orientation and continuous growth through inclination of coaxial nozzle in laser powder deposition of single-crystal superalloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 230 (2016) 177–186. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.11.017
- [15] **R. Jones, C. Rans, A.P. Iliopoulos, J.G. Michopoulos, N. Phan, D. Peng**, Modelling the variability and the anisotropic behaviour of crack growth in SLM Ti-6Al-4V, *Materials*, 14 (6) (2021) 1400. DOI: 10.3390/ma14061400
- [16] **D. Haselbozchaloe, J.A.F.O. Correia, D.F.O. Braga, G. Cipriano, L. Reis, L. Manuel, P.M.G.P. Moreira**, Quantifying uncertainty in fatigue crack growth of SLM 316L through advanced predictive modeling, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures (FFEMS)*, 47 (9) (2024) 3116–3132. DOI: 10.1111/ffe.14361
- [17] **Y. He, K. Zhao, Y. Zhang, K.G. Prashanth, Z. Ye, Z. Yu, F. Zhang**, Evaluation of fatigue crack growth rates and fracture toughness in a selective laser-melted Ti-5.6 Al-3.8 V alloy with optimized microstructure after heat treatment, *Materials Science and Engineering: A*, 924 (2025) 147822. DOI: 10.1016/j.msea.2025.147822

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Daniil V. VOEVODENKO – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: voevodenko.daniil@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3045-5923>

Kirill A. STARIKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: starikovkirillandreevich@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8466-3340>

Anatoliy A. POPOVICH – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: popovicha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

Поступила: 28.10.2025; Одобрена: 05.12.2025; Принята: 05.12.2025.

Submitted: 28.10.2025; Approved: 05.12.2025; Accepted: 05.12.2025.

Научная статья

УДК 621.762, 621.774

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32107>



Б.С. Ермаков¹, С.Б. Ермаков², О.В. Швецов¹ ✉

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

² Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

✉ shvec_off@mail.ru

ПРОИЗВОДСТВО ПОРОШКОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРРОЗИОННОГО СЛОЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ В УСЛОВИЯХ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АРКТИЧЕСКОГО ПОЯСА

Аннотация. К числу современных вызовов в нефтедобыче и переработке первичного флюида относится повышенная коррозионная агрессивность перекачиваемых сред. Одним из путей повышения сопротивляемости оборудования коррозионным повреждениям является применение в аппаратах и устройствах, контактирующих с агрессивными жидкостями, нержавеющей сталей или биметаллических материалов. Целью настоящей работы явилось изучение влияния технологических параметров распыления на гранулометрический состав и свойства порошков 08X18H15, 07X16H6 и 08X17H22 для напыления на сварные швы биметаллических материалов. По результатам исследований была подтверждена возможность использования порошков нержавеющей сталей для нанесения защитных антикоррозионных покрытий методом плазменного напыления на сварные соединения узлов и конструкций технологического оборудования нефтедобывающих предприятий.

Ключевые слова: порошки, аддитивные технологии, плазменный атомайзер, биметаллические трубы, порошки сталей, 08X18H15, 07X16H6, 08X17H22, сварные швы, Арктика.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Разработка комплексной модели надежности, работоспособности и определяющих показателей качества трубопроводных систем северного исполнения» (FEWN-2025-0001).

Для цитирования:

Ермаков Б.С., Ермаков С.Б., Швецов О.В. Производство порошков для изготовления коррозионного слоя биметаллических труб в условиях нефтегазовых месторождений Арктического пояса // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 1. С. 84–94. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32107>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32107>*B.S. Ermakov¹, S.B. Ermakov², O.V. Shvetsov¹* ✉¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;² Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia✉ shvec_off@mail.ru

PRODUCTION OF POWDERS FOR THE MANUFACTURE OF A CORROSION LAYER OF BIMETALLIC PIPES IN ARCTIC OIL AND GAS FIELDS

Abstract. The increased corrosive aggressiveness of the pumped media is one of the modern challenges in oil production and primary fluid processing. One of the ways to increase the equipment resistance to corrosion damage is the use of stainless steels or bimetallic materials in devices that come into contact with aggressive liquids. The aim of this work was to study the effect of the technological parameters of spraying on the granulometric composition and properties of powders 08Cr18Ni15, 07Cr16Ni6 and 08Cr17Ni22 for spraying bimetallic materials onto the welds. According to the research results, the possibility of using stainless steel powders for applying protective anti-corrosion coatings by plasma spraying onto welded joints of components and structures of technological equipment at oil producing enterprises was confirmed.

Keywords: powders, additive technologies, plasma atomizer, bimetallic pipes, powder, steel, 08Cr18Ni15, 07Cr16Ni6, 08Cr17Ni22, weld, Arctic.

Acknowledgements: The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment “Development of a comprehensive model of reliability, performance and key quality indicators of northern pipeline systems” (FEWN-2025-0001).

Citation:

Ermakov B.S., Ermakov S.B., Shvetsov O.V., Production of powders for the manufacture of a corrosion layer of bimetallic pipes in Arctic oil and gas fields, *Global Energy*, 32 (01) (2026) 84–94, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32107>

Введение. К числу современных вызовов в нефтедобыче и переработке первичного флюида относится повышенная коррозионная агрессивность перекачиваемых сред. Постепенная миграция нефтедобычи на север изменила принципиальный состав нефтяного флюида – в добываемых средах северных широт содержится значительно большее количество сероводорода, углекислого газа и т.п. Это приводит к ускоренному коррозионному износу оборудования – систем перекачки, фильтрации и очистки первичного продукта. Появляется риск ускоренного износа и аварийных остановок оборудования, повышаются затраты компаний на техническое обслуживание и замены вышедших из строя узлов и деталей. Как показал анализ эксплуатации технологического оборудования на месторождениях нефти, коррозия является одной из наиболее острых проблем, требующих скорейшего решения. Особо остро эта проблема встала в последние десятилетия, когда основные добывающие мощности крупных российских вертикально интегрированных нефтяных компаний переместились в северные области РФ – Арктику, Восточную и Западную Сибирь, Якутию и на Дальний Восток. Слабая транспортная инфраструктура, сложность организации своевременных ремонтных работ из-за сурового климата, малой численности населения и необходимости организации работ вахтовым методом, отсутствие в регионах ремонтно-восстановительных мощностей потребовали применять для

нефтедобычи и перекачки нефтяного флюида и попутного газа такие материалы, которые бы позволили снизить затраты на ремонт и замену оборудования, в разы повысить их коррозионную стойкость. К настоящему времени именно расходы на замену и ремонт поврежденного коррозией оборудования являются одной из основных статей расходов компаний, а общемировые расходы нефтяной промышленности на борьбу с коррозией составляют 3,7 млрд долл. в год [2–4]. К основным видам коррозии на трубопроводах нефти и газа относятся питтинг, щелевая коррозия, межкристаллитная коррозия, стресс-коррозия, особенно в средах, насыщенных сероводородом и углекислым газом, и водородное охрупчивание.

Одним из путей повышения сопротивляемости оборудования коррозионным повреждениям является применение в аппаратах и устройствах, контактирующих с агрессивными жидкостями, нержавеющей сталей или биметаллических материалов. Однако наряду с достоинством биметаллических материалов их применение сталкивается с рядом как экономических (высокая стоимость), так и технологических проблем, таких как защита сварных швов, которые при сварке часто теряют антикоррозионные свойства, присущие нержавеющей стали. Используемая на месторождениях ингибиторная или электрохимическая защита не всегда оказывается эффективной, а применение полимерных защитных покрытий не обеспечивает надежную защиту швов в присутствии в жидкости абразивных частиц, разрушающих полимер или при работе оборудования при повышенных температурах порядка 2000°C и выше [5]. По нашему мнению, одним из наиболее перспективных путей защиты сварных соединений биметаллических материалов является нанесение антикоррозионных лакирующих покрытий методом газотермического или плазменного напыления. Нанесение на поверхность швов относительно дешевых защитных покрытий является наиболее перспективным методом антикоррозионной защиты промышленных трубопроводов [6]. Однако к настоящему времени до конца не решен вопрос получения дешевых и качественных отечественных порошковых материалов для данного типа покрытий, а получение импортной продукции сталкивается с трудностями в связи с введением санкций рядом недружественных стран.

Среди методов получения порошков для газотермического напыления наибольшее развитие получил метод газовой атомизации, т.е. распыление расплава материалов в среде инертного газа. Это метод достаточно изучен, однако имеет целый ряд недостатков, таких как значительное число распыленных частиц с дефектами – сателлитами, недостаточной сферичностью, пористостью. Также к числу недостатков газовой атомизации относится то, что сам процесс становится рентабельным при получении значительных (от сотни килограммов) объемов порошка, требует значительного времени и усилий для перехода с одного распыляемого материала на другой. Поэтому для опытных производств, для малых и средних компаний, где процесс напыления не так велик, эти порошки оказываются достаточно дорогостоящими. В этом случае на смену газовой приходит плазменная атомизация, т.е. распыление твердого фидстока (чаще всего проволоки материала) в среде плазменного факела [7–11]. Такой метод достаточно экономичен, не требует сложного дорогостоящего оборудования и высококвалифицированного обслуживающего персонала, позволяет достаточно быстро переориентировать процесс с материала одного химического состава на другой. Одним из главных недостатков плазменной атомизации является невысокая производительность установок – обычно около 5–10 кг порошка в час – и достаточно строгие требования к геометрическим размерам и качеству распыляемых фидстоков [9, 12].

В СПбПУ был разработан и успешно внедрен в промышленность плазменный атомайзер [13], предназначенный для получения сферических порошков средних размеров (~40–140 мкм), что максимально полно удовлетворяет требованиям плазменного напыления. Данное устройство построено по принципу свободного распыления в колонне одного или нескольких фидстоков при одновременном использовании от одного до трех генераторов плазмы. Такая

«развязанная» схема установки позволяет максимально полно использовать теплофизические характеристики плазмы, что обеспечивает высокий – более 60% – выход частиц заданного гранулометрического состава [9, 14].

Целью настоящей работы явилось изучение влияния технологических параметров распыления на гранулометрический состав и свойства порошков 08X18H15, 07X16H6 и 08X17H22 для напыления на сварные швы биметаллических материалов.

Методы и материалы

Исследования были проведены на проволоках трех марок сталей диаметром 1,8 мм. Химический состав проволок полностью соответствует требованиям ГОСТ 5632–2014 к данным маркам сталей. Распыление проволок осуществлялось в среде аргона различного качества:

- аргоном технической чистоты первого сорта (ГОСТ 10157–2016) с содержанием аргона в газовой смеси не менее 99,987%, кислорода – 0,002%, азота – 0,01%, содержание паров воды – 0,001%;
- аргоном высокой чистоты марки 5.6 (ТУ 2114-005-53373468-2006) с содержанием аргона в газовой смеси не менее 99,9996%, кислорода – 0,00012%, азота, водорода и углекислого газа в сумме не более 0,003%.

При проведении процесса были выдержаны следующие технологические параметры:

- сила тока на плазмотроне изменялась в пределах 190 до 280 А;
- скорость подачи плазмообразующего газа – от 30 до 60 л/мин;
- скорость подачи проволоки – от 1,0 до 2,5 м/мин;
- скорость подачи защитного газа через систему кипящего слоя колонны – от 0 до 24 л/мин.

Для сокращения объема экспериментов был использован метод математического планирования путем построения и реализации квази D-оптимального плана второго порядка. В качестве параметра оптимизации был выбран гранулометрический состав получаемой порошковой массы при условии, что получаемые частицы будут соответствовать требованиям, предъявляемым к порошкам сферической формы, – т.е. отношение максимального линейного размера проекции частицы к ее минимальному размеру будет находиться в пределах 1,0–1,2 (ГОСТ 25849–83).

Результаты

В ходе первого этапа реализации плана были построены уравнения регрессии, определяющие связь между основными переменными – силой тока, скоростями плазмообразующего и защитного газов и скоростью подачи проволоки. Проверка адекватности модели проводилась по критерию Фишера (F-критерию) и путем оценки полученных полиномов по t-критерию Стьюдента, дисперсия проверена с помощью G-критерия Кохрена [15–16]. Второй этап – этап крутого восхождения модели – был проведен на суперкомпьютере СПбПУ методом крутого восхождения Бокса–Уилсона [17].

Благодаря проведенным расчетам были оптимизированы параметры распыления исследуемых проволок. Было показано, что для хромоникелевых сталей возможно подобрать единые технологические параметры (силы тока и скорость защитного газа) режима распыления; скорость подачи фидстока и скорость плазмообразующего газа зависят только от диаметра распыляемого фидстока. Учитывая, что диаметры всех проволок идентичны и составляли $1,8 \pm 0,05$ мм, режим распыления, обеспечивающий наилучшее качество получаемых порошков по сочетанию характеристик (величина гранулометрического состава в рамках фракций – 40–140 мкм, сферичность порошка – процент выхода годных фракций, табл. 1) имел следующие параметры:

- сила тока – 230–250 А;
- скорость подачи плазмообразующего газа – 40–45 л/мин;

- скорость подачи фидстока диаметром 1,8 мм – 1,9–2,2 м/мин;
- подача защитного газа на систему кипящего слоя – 120–150 л/мин.

Эти параметры обеспечивают сферичность порошка не ниже 95–98%, практически полностью отсутствуют сателлиты (т.е. число частиц порошка с сателлитами не превышает 0,05–0,08%), внутренняя пористость составляет около 0,1%, что полностью удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 58418–2019.

Таблица 1

Распределение по величине гранулометрического состава порошка фракций

Table 1

Distribution of the granulometric composition of the powder fractions

Марка стали	Процент содержания порошка фракций в распыленной массе*					Выход годного
	40–60 мкм	60–80 мкм	80–100 мкм	100–120 мкм	120–140 мкм	
08X18H15	13	17	14	11	8	63
07X16H6	12	16	12	13	9	63
08X17H22	11	17	13	13	12	64

Примечание: * содержание фракций ≤ 40 мкм – до 15%, причем фракция менее 20 мкм крайне сложно сепарируется на виброситах, и оценить ее количество точно не удается; фракция ≥ 140 мкм ~ 20%.

Несоблюдение оптимизированного режима распыления снижает качество получаемых частиц. Так, уменьшение силы тока на 30 А (до 190–210 А) приводит к смещению основной формы частиц от сферической к округлой, а при дальнейшем снижении силы тока форма частиц приобретает оскольчатую форму (см. ГОСТ 25849–83). Снижение скорости плазмообразующего газа также изменяет форму и размер частиц, и постепенно, по мере снижения скорости, наиболее массовая фракция порошка смещается от 60–80 мкм в сторону больших размеров – 100 мкм и меньшей сферичности. В табл. 2 приведены характеристики получаемого порошка в зависимости от параметров распыления, в той же таблице показано влияние качества плазмообразующего газа на развитие пористости в поверхности и теле распыленных частиц (рис. 1).

Следует отметить, что качественные показатели распыленных порошков (форма, гранулометрический состав, процент дефектных частиц) всех трех сталей практически не зависят от их химического состава, а определяются только параметрами распыления, в первую очередь – силой тока и скоростью плазмообразующего газа, что позволяет считать, что разработанный режим распыления может использоваться для всех марок хромоникелевых сталей. К числу главных показателей качества процесса распыления также следует отнести стабильность химического состава исходных фидстоков и получаемых порошков (табл. 3), которая была проверена на микроспектрометре, входящем в комплекс сканирующего электронного микроскопа SUPRA 55VP-25–78.

Анализ табл. 3 подтверждает, что плазменное распыление не приводит к потере концентрации основных легирующих элементов, и составы исходных фидстоков и получаемых порошков остаются практически неизменными.

В ходе исследований частиц методом Оже-спектроскопии (табл. 2) было отмечено весьма неравномерное распределение элементов по объему металла. Измерение концентраций элементов по глубине от поверхности было произведено на металлографическом шлифе частицы диаметром около 48 мкм. Очистка поверхности перед Оже-спектроскопией выполнена методом ионного травления. Показано, что максимальные концентрации хрома и других тугоплавких элементов находятся в центральных зонах частиц, там же отмечено повышенное содержание

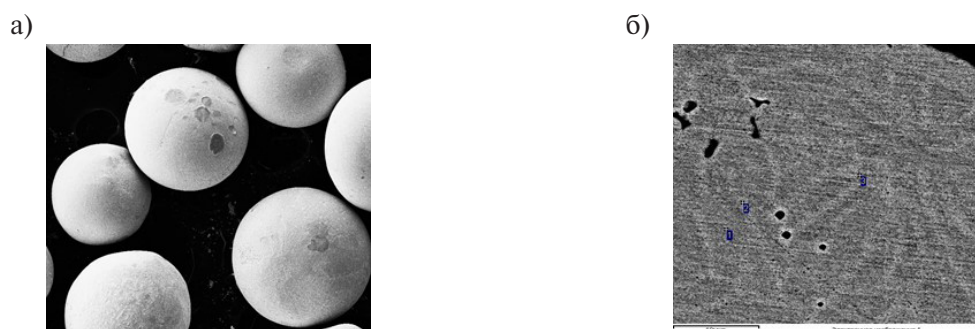


Рис. 1. Поверхностная (а) и внутренняя (б) пористость в частицах распыленного порошка 08X17H22

Fig. 1. Surface (a) and internal (b) porosity in particles of atomized powder 08Cr17Ni22

Таблица 2

Влияние параметров распыления на форму, гранулометрический состав и дефектность порошковых частиц

Table 2

Effect of spraying parameters on the shape, granulometric composition and defects of powder particles

Сталь, марка	Режим		Фракция, мкм (%)			Форма (%)			Пористость, %	
	I, А	V _г , л/м	60–80	80–100	100–120	1*	2	3	4**	5
08X18H15	230	45	17	14	11	97	3	0	0,08	0,14
	230	30	16	14	13	94	6	0	0,11	0,19
	190	45	14	16	14	91	8	1	0,23	0,43
	190	30	12	15	18	88	10	2	0,45	0,77
08X17H22	230	45	17	13	13	96	4	0	0,04	0,12
	230	30	15	15	15	92	89	0	0,14	0,21
	190	45	12	14	17	89	9	2	0,27	0,41
	190	30	10	13	19	84	12	4	0,56	0,86

Примечания: * порошки 1 – сферической; 2 – округлой и 3 – оскользящей (ГОСТ 25849–83) формы; ** 4 – аргон высокой чистоты марки 6; 5 – аргон технической чистоты первого сорта (по ГОСТу 10157–2016).

углерода, хотя карбидных включений как простых – типа MC, так и сложных – MxSy – обнаружено не было. Высокие скорости охлаждения металла не позволяют сформироваться химическим соединениям с жесткой кристаллической решеткой, и в данном случае, вероятно, имеют место кластерные предвыделения карбидообразующих элементов. Распределение кремния и серы носило скачкообразный характер, напоминающий ликвационные процессы, происходящие при кристаллизации сварочной ванны. Распределение никеля и марганца можно признать равномерным, с учетом концентрационных флуктуаций. Азот равномерно распределен по объему частицы. Максимальная концентрация кислорода была отмечена на поверхности, с постепенным снижением по мере удаления в тело частицы (табл. 4).

Анализ табл. 5 показал, что качество плазмообразующего газа критически сказывается на качестве распыленных порошков. Использование аргона с примесями других газов резко ухудшает структуру порошковой частицы – на ее поверхности и в объеме возникают сложные неметаллические частицы, в первую очередь, оксиды и нитриды, которые могут привести к снижению прочности изделия в ходе 3D-печати.

Таблица 3а

**Химический состав исходной проволоки Cr-Ni сталей
и средний состав распыленного порошка. Основные элементы**

Table 3a

**Chemical composition of the initial Cr-Ni steel wire
and the average composition of the sprayed powder. Basic elements**

Материал	Химический состав, масс. %				
	C	Si	Mn	Cr	Ni
Проволока 08X18H15	0,074	0,375	1,312	17,33	14,21
Средний состав порошка	0,077	0,373	1,314	17,21	14,09
Проволока 08X17H22	0,065	0,456	0,941	16,86	21,24
Средний состав порошка	0,064	0,456	0,937	16,93	21,26
Проволока 07X16H6	0,053	0,407	0,665	16,93	6,97
Средний состав порошка	0,051	0,396	0,644	16,95	6,99

Таблица 3б

**Химический состав исходной проволоки Cr-Ni сталей и средний состав распыленного порошка.
Среднее содержание примесных элементов в частицах порошка**

Table 3b

**Chemical composition of the initial Cr-Ni steel wire and the average composition of the sprayed powder.
Average content of impurity elements in powder particles**

Состав газа	Сталь, марка								
	08X18H15			08X17H22			07X16H6		
	N	O	S	N	O	S	N	O	S
1	0,011	0,031	0,010	0,0012	0,025	0,009	0,009	0,027	0,011
2	0,005	0,014	0,009	0,004	0,012	0,009	0,006	0,009	0,010

Оценка технологических свойств порошков – их насыпной плотности и текучести – показала полное соответствие требованиям (ГОСТ 14086–68 и ГОСТ 20899–98). Установлено, что насыпная плотность порошка стали 08X18H15 составила 21,39 с, 07X16H6 – 21,48 с, 08X17H22 – 21,53 с, а текучесть порошков – 21,92, 21,73 и 21,88 соответственно.

Обсуждение

На основании проведенных исследований представляется возможным сделать несколько выводов. Определены параметры распыления порошков нержавеющей хромоникелевых сталей, при соблюдении оптимизированного режима распыления которых частицы порошка имеют правильную сферическую форму, соответствующую уровню требований к порошкам (ГОСТ Р 58418–2019).

Анализ полученных в ходе экспериментов функций отклика и качества полученных порошков всех исследованных в работе марок сталей показал их практическую идентичность, что позволяет считать, что разработанный режим распыления может использоваться не только для изученных, но и для всех других марок метастабильных и стабильных хромоникелевых сталей, что подтверждается данными, приведенными в [8], обеспечивая в порошке неизменность химического состава распыляемого фидстока.

Таблица 4

Распределение элементов в объеме частицы порошка стали 08X17H22

Table 4

Distribution of elements in the volume of a 08Cr17Ni22 steel powder particle

Элемент	Среднее	На глубине от поверхности частицы (мкм)								
		0,001	0,1	1000	2	5	10	15	20	24
Cr	16,93	16,662	16,772	17,032	17,453	17,421	17,531	16,871	16,667	16,443
C	0,065	0,056	0,061	0,069	0,074	0,077	0,081	0,069	0,065	0,054
Si	0,64	0,731	0,411	0,781	0,772	0,637	0,599	0,511	0,700	0,597
S	0,009	0,014	0,012	0,009	0,007	0,009	0,014	0,007	0,011	0,013
Mn	0,94	0,871	0,966	0,946	0,993	0,889	0,943	1,021	0,885	0,937
Ni	21,26	21,288	21,564	21,331	21,197	21,195	20,843	20,779	20,931	21,287
N	0,004	0,009	0,003	0,005	0,003	0,007	0,007	0,006	0,004	0,009
O	0,012	0,039	0,031	0,014	0,012	0,011	0,009	0,010	0,011	0,004

Таблица 5

Неметаллические включения в частицах порошка сталей

Table 5

Nonmetallic inclusions in steel powder particles

Порошок		Неметаллические включения (по методу Ш4, ГОСТ 1778-70)*								
		ОТ	ОС	СХ	СП	СН	С	НС	НТ	НА
08X18H15	1**	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	0	0	0	0	0	1	1	1
07X16H6	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	1	0	0	0	0	2	1	0
08X17H22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	3	0	0	1	0	0	1	1	1

*Примечание: ОТ – оксиды точечные, ОС – оксиды строчечные, СХ – силикаты хрупкие, СП – силикаты пластичные, СН – силикаты недеформирующиеся, С – сульфиды, НС – нитриды строчечные, НТ – нитриды и карбонитриды точечные, НА – нитриды алюминия; ** 1 – аргон высокой чистоты марки 6; 2 – аргон технической чистоты (ГОСТ 10157–2016, марка В)

Исследования технологических свойств порошков текучести и насыпной плотности опытных проб порошков показал соответствие требованиям НТД.

Заклучение

Результатами исследований была подтверждена возможность использования порошков нержавеющей сталей для нанесения защитных антикоррозионных покрытий методом плазменного напыления на сварные соединения узлов и конструкций технологического оборудования нефтедобывающих предприятий. Проведенные исследования коррозионной стойкости сварных соединений ряда малоуглеродистых низколегированных сталей, используемых в качестве материалов технологических трубопроводов перекачки нефтяного флюида, подтвердили высокий уровень антикоррозионной защиты против питтинговой коррозии и коррозии в средах, насыщенных сероводородом и углекислым газом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Иванов С.С., Перекупка А.Г., Багин Д.Е.** Анализ причин высокой коррозионной агрессивности попутного нефтяного газа месторождений Западной Сибири // *ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти.* 2022. Т. 1, № 7. С. 110–117. DOI: 10.51890/2587-7399-2022-7-1-110-117
- [2] **Царьков И.В., Мозговой Г.С., Шерер С.А.** Факторы, вызывающие осложнения при эксплуатации оборудования нефтегазовой отрасли, а также способы борьбы с ними // *Булатовские чтения.* 2021. Т. 2. С. 204–206.
- [3] **Гоник А.А.** Коррозия нефтепромыслового оборудования и меры ее предупреждения. М.: Недра, 1976.
- [4] **Хусаинова Д.А.** Обоснование технологии предупреждения образования солеотложения и коррозии оборудования в нефтяных скважинах с использованием ингибиторов комплексного действия: дисс. ... канд. техн. наук, СПб.: Горный университет, 2018.
- [5] **Поварова Л.В., Мунтян В.С., Скиба А.С.** Анализ современных методов защиты нефтепромыслового оборудования от коррозии // *Булатовские чтения.* 2020. Т. 4. С. 121–129.
- [6] **Ермаков Б.С., Альхименко А.А., Шапошников Н.О., Ермаков С.Б., Шатский Т.Е., Иголкин А.Ф.** Использование распыленных порошков для создания покрытий в сварных швах труб промышленных трубопроводов // *Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке.* 2019. Т. 1. С. 113–118.
- [7] **Рудской А.И., Волков К.Н., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Физические процессы и технологии получения металлических порошков из расплава. СПб.: СПбПУ, 2018. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id18-12
- [8] **Сироткин О.С.** Современное состояние и перспективы развития аддитивных технологий // *Авиационная промышленность.* 2015. № 2. С. 22–25.
- [9] **Ермаков С.Б.** Разработка технологии и оборудования плазменного распыления порошков для аддитивных машин: автореферат дисс. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбРПУ, 2024.
- [10] **Ермаков С.Б., Гюлиханданов Е.Л.** Получение порошков для аддитивных машин методом плазменного распыления // *Наукоемкие технологии в машиностроении.* 2021. № 6. С. 29–41. DOI: 10.30987/2223-4608-2021-6-29-41
- [11] **Кисон В.Э., Мустафаев А.С., Сухомлинов В.С.** Разработка новой плазменной технологии получения чистого белого корунда // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.* 2021. Т. 21, № 3. С. 380–385. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-380-385
- [12] **Григорьев А.В., Разумов Н.Г., Попович А.А., Самохин А.В.** Плазменная сфероидизация порошков на основе сплавов Nb-Si, полученных механическим легированием // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.* 2017. Т. 23, № 1. С. 247–254. DOI: 10.18721/JEST.230125
- [13] **Ермаков Б.С., Ермаков С.Б., Одноблюдов М.А.** Устройство для получения металлических порошков. Патент RU 204335 U1 Российская Федерация, МПК В22F 9/14; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «СПбПУ»; заявл. 09.12.20; опубл. 20.05.21, Бюл. № 14.
- [14] **Ермаков С.Б.** Регулирование формы и размеров частиц порошков при плазменном распылении // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета.* 2021. Т. 55, № 1. С. 7–15. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-7-15
- [15] **Сурков В.А.** Исследование воздействия высокочастотной плазмы пониженного давления на механические свойства порошковых материалов // *Заготовительные производства в машиностроении.* 2010. № 11. С. 39–41.
- [16] **Чуновкина А.Г., Ястребов А.П., Чабаненко А.В., Рассыхаева М.Д.** Качество технологических процессов в аддитивном приборостроении: модели машинного обучения // *Компетентность.* 2024. № 6. С. 46–50. DOI: 10.24412/1993-8780-2024-6-46-50
- [17] **Сычёв В.В.** К асимптотической теории отрывного обтекания тел // *Известия Российской Академии Наук. Механика Жидкости и Газа.* 2010. № 3. С. 110–128.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЕРМАКОВ Борис Сергеевич – главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: ermakov55@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0932-2408>

ЕРМАКОВ Сергей Борисович – директор, Тюменский индустриальный университет, канд. техн. наук.

E-mail: ermakovsb@tyuiu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4243-0984>

ШВЕЦОВ Олег Викторович – инженер-исследователь, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: shvec_off@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9368-4074>

REFERENCES

[1] **S.S. Ivanov, A.G. Perekupka, D.E. Bagin**, Analysis of the causes of high corrosive aggressiveness of associated petroleum gas from Western Siberia fields, *PRoneft. Professionally about Oil*, 7(1) (2022) 110–117. DOI: 10.51890/2587-7399-2022-7-1-110-117

[2] **I.V. Tsarkov, G.S. Mozgovoy, S.A. Sherer**, Factors that cause complications in the operation of oil and gas equipment and ways to deal with them, *Bulatovskie chteniia (Bulatov Readings)*, 2 (2021) 204–206.

[3] **A.A. Gonik**, *Korroziia neftepromyslovogo oborudovaniia i mery ee preduprezhdeniia* [Corrosion of oilfield equipment and measures for its prevention]. Moscow: Nedra, 1976

[4] **D.A. Khusainova**, *Obosnovaniia tekhnologii preduprezhdeniia obrazovaniia soleotlozheniia i korrozii oborudovaniia v neftianykh skvazhinakh s ispol'zovaniem ingibitorov kompleksnogo deistviia: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Justification of technology for preventing the formation of scaling and corrosion of equipment in oil wells using inhibitors of complex action], St. Petersburg, 2018.

[5] **L.V. Povarova, V.S. Muntian, A.S. Skiba**, Analysis of modern methods for protecting oilfield equipment from corrosion, *Bulatovskie chteniia (Bulatov Readings)*, 4 (2020) 121–129.

[6] **B.S. Ermakov, A.A. Al'khimenko, N.O. Shaposhnikov, S.B. Ermakov, T.E. Shatskii, A.F. Igolkin**, *Is-pol'zovanie raspylennykh poroshkov dlia sozdaniia pokrytii v svarnykh shvakh trub promyslovykh truboprovodov* [Using atomized powders to create coatings in welded joints of industrial pipelines], *Nizkotemperaturnye i pishchevye tekhnologii v XXI veke* [Low-temperature and food technologies in the 21st century], 1 (2019) 113–118.

[7] **A.I. Rudskoi, K.N. Volkov, S.Yu. Kondratev, Y.A. Sokolov**, *Physical processes, and technology of obtaining metal powders from a melt*, St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2018. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id18-12

[8] **O.S. Sirotkin**, State-of-the-art and prospects of development of additive technologies, *Aviation Industry*, 2 (2015) 22–25.

[9] **S.B. Ermakov**, *Razrabotka tekhnologii i oborudovaniia plazmennogo raspyleniia poroshkov dlia additivnykh mashin: avtoreferat diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development of technology and equipment for plasma spraying of powders for additive machines]. St. Petersburg: SPbRPU, 2024.

[10] **S.B. Ermakov, E.L. Gulihandanov**, Manufacturing powders for additive machines through plasma atomizing, *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 6 (2021) 29–41. DOI: 10.30987/2223-4608-2021-6-29-41

- [11] **V.E. Kison, A.S. Mustafaev, V.S. Sukhomlinov**, Development of a new plasma technology for producing pure white corundum, *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 21 (3) (2021) 380–385. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-380-385
- [12] **A.V. Grigoriev, N.G. Razumov, A.A. Popovich, A.V. Samokhin**, Plasma spheroidization of Nb-Si-based powder alloys obtained by mechanical alloying, *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Sciences and Technology*, 23 (1) (2017) 247–255. DOI: 10.18721/JEST.230125
- [13] **B.S. Ermakov, S.B. Ermakov, M.A. Odnobliudov**, *Ustroistvo dlia polucheniia metallicheskih poroshkov* [Device for producing metal powders], Russian Federation Patent, No. RU 204335 U1 (2021).
- [14] **S.B. Ermakov**, Regulation of powder particles shape and size at plasma spraying, *Frontier Materials & Technologies*, 1 (55) (2021) 7–15. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-7-15
- [15] **V.A. Surkov**, Study of low-pressure high-frequency plasma influence on mechanical properties of powdered materials, *Blanking Productions in Mechanical Engineering*, 11 (2010) 39–41.
- [16] **A.G. Chunovkina, A.P. Yastrebov, A.V. Chabanenko, M.D. Rassykhaeva**, Quality of Technological Processes in Additive Instrumentation: Machine Learning Models, *Competency*, 6 (2024) 46–50. DOI: 10.24412/1993-8780-2024-6-46-50
- [17] **V.V. Sychev**, *K asimptoticheskoi teorii otravnogo obtekaniia tel* [On an asymptotic theory of separated flow around bodies], *Izvestiia Rossiiskoi Akademii Nauk. Mekhanika Zhidkosti i Gaza* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Fluid and Gas Mechanics], 3 (2010) 110–128.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Boris S. ERMAKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: ermakov55@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0932-2408>

Sergey B. ERMAKOV – *Industrial University of Tyumen.*

E-mail: ermakovsb@tyuiu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4243-0984>

Oleg V. SHVETSOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: shvec_off@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9368-4074>

Поступила: 27.11.2025; Одобрена: 10.12.2025; Принята: 11.12.2025.

Submitted: 27.11.2025; Approved: 10.12.2025; Accepted: 11.12.2025.