

Том 30, №3, 2024



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;
Лагаринов 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;
Башикарёв А.А., 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;
Цемленко 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: 15.10.2024

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024

30 (3) 2024



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: 15.10.2024

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2024

Содержание

Энергетика. Электротехника

- Гун Б., Избяков Н.С., Барсков В.В., Хуа Л., Рассохин В.А.** Модернизация экспериментального стенда с целью валидации численного моделирования сверхкритического диоксида углерода на воздух в качестве рабочего тела для турбомашин..... 7
- Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Микушина О.В.** Перспективы достижения углеродной нейтральности развивающимися странами..... 23

Металлургия. Материаловедение

- Зайцева М.Я., Ерутин Д.П., Попович А.А., Суфияров В.Ш.** Влияние подогрева при селективном лазерном плавлении хромистой стали на структуру и свойства..... 43
- Микуленко А.Д., Панченко Е.В., Ожегов М.А., Наумов А.А.** Исследование и моделирование температурного поля при точечной сварке трением с перемешиванием листовых алюминиевых сплавов..... 52
- Абдрахманова А.Э., Сотов А.В., Зайцев А.И., Попович А.А.** Аддитивное производство полимерных функциональных ячеистых структур с эффектом памяти формы с использованием FDM-технологии..... 64
- Теплухин Г.Н., Теплухин В.Г., Кузнецов Р.В., Радкевич М.М.** Влияние углерода на положение мартенситной точки в сталях, легированных никелем..... 73
- Воеводенко Д.В., Стариков К.А., Попович А.А.** Исследование влияния параметров селективного лазерного плавления на формирование дефектов и микроструктуры в жаропрочных никелевых сплавах..... 83

Contents

Energetics. Electrical engineering

Gong B., Izbiakov N.S., Barskov V.V., Hua L., Rassokhin V.A. Modernization of the experimental stand for validation of numerical modeling of supercritical carbon dioxide to air as a working fluid for turbomachines.....	7
Klimenko V.V., Klimenko A.V., Tereshin A.G., Mikushina O.V. Prospects for achieving carbon neutrality by developing countries.....	23

Metallurgy. Material Science

Zaitceva M.Y., Erutin D.P., Popovich A.A., Sufiarov V.S. Effect of pre-heating during selective laser melting of chromium steel on structure and properties.....	43
Mikulenko A.D., Panchenko E.V., Ozhegov M.A., Naumov A.A. Research and modeling of the temperature field during friction stir spot welding of sheet aluminum alloys.....	52
Abdrakhmanova A.E., Sotov A.V., Zaytsev A.I., Popovich A.A. Additive manufacturing of polymer functional cellular structures with shape memory effect using FDM technology.....	64
Teplukhin G.N., Teplukhin V.G., Kuznetsov R.V., Radkevich M.M. The effect of carbon content on the martensite start temperature in nickel-alloyed steels.....	73
D.V. Voevodenko, K.A. Starikov, A.A. Popovich. Research of the influence of selective laser melting parameters on the formation of defects and microstructure in nickel-based superalloys.....	83

Энергетика. Электротехника Energetics. Electrical engineering

Научная статья

УДК 621.4

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30301>



Б. Гун¹ ✉, Н.С. Избяков¹,
В.В. Барсков¹, Л. Хуа², В.А. Рассохин¹

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

² Научно-исследовательский институт автомобильной промышленности
Университета Цинхуа, Сучжоу, Китайская Народная Республика

✉ outbowenlook@outlook.com

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА С ЦЕЛЬЮ ВАЛИДАЦИИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА НА ВОЗДУХ В КАЧЕСТВЕ РАБОЧЕГО ТЕЛА ДЛЯ ТУРБОМАШИН

Аннотация. К середине века выработка электроэнергии вырастет более чем в два раза, что приведет к увеличению выбросов парниковых газов, которые повышают вероятность глобального потепления. Одним из наиболее перспективных циклов по выработке электрической энергии является цикл Брайтона со сверхкритическим диоксидом углерода. Рабочее тело обладает высокой плотностью энергии, стабильными термическими и химическими свойствами. Для более глубокого исследования газодинамических и прочностных характеристик проточной части турбины, работающей на сверхкритическом диоксиде углерода, необходимо создание полномасштабного натурного экспериментального стенда. Однако свойства рабочего тела не до конца изучены, создание натурного стенда требует высоких затрат и повышенных мер безопасности, так как его работа характеризуется высокими значениями температуры и давления. В работе проведено моделирование сверхкритического диоксида углерода на воздух с использованием методики подобия. Для валидации численных экспериментов, проведенных в программном комплексе Ansys Workbench, выбран экспериментальный стенд, расположенный на базе Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Проведена комплексная оценка технического состояния стенда, выполнены замена и модернизация некоторых узлов. В рамках подготовки стенда выполнены тепловой и ресурсный расчеты подшипника. Разработаны и изготовлены новые форсунки подачи масла в подшипники. Проведены испытания масляной системы, которые показали, что объемный расход удовлетворяет оптимальным значениям из технического паспорта подшипника. Выполнен замер объемного расхода водяной системы. Была разработана современная измерительная система, обеспечивающая высокую точность экспериментов и позволяющая получать в настоящее время основные характеристики турбины для дальнейших экспериментальных исследований.

Ключевые слова: сверхкритический диоксид углерода, цикл Брайтона, турбомашина, экспериментальный стенд, теория подобия, валидация.

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда в рамках реализации проекта «Принципы создания автономных углекислотных турбинных установок для выработки тепловой и электрической энергии, с внешним подводом теплоты, работающих на сырой нефти» (Соглашение №23-29-00968, <https://rscf.ru/project/23-29-00968/>) в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого.

Для цитирования:

Гун Б., Избяков Н.С., Барсков В.В. и др. Модернизация экспериментального стенда с целью валидации численного моделирования сверхкритического диоксида углерода на воздух в качестве рабочего тела для турбомашин // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 3. С. 7–22. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30301>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30301>



B. Gong¹ ✉, N.S. Izbiakov¹,
V.V. Barskov¹, L. Hua², V.A. Rassokhin¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

² Suzhou Automotive Research Institute, Tsinghua University (TSARI),
Suzhou, People's Republic of China (PRC)

✉ outbowenlook@outlook.com

MODERNIZATION OF THE EXPERIMENTAL STAND FOR VALIDATION OF NUMERICAL MODELING OF SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE TO AIR AS A WORKING FLUID FOR TURBOMACHINES

Abstract. By the middle of the century, electricity generation will more than double, leading to increased greenhouse gas emissions, which increase the likelihood of global warming. One of the most promising ways to generate electric energy is the Brayton cycle with supercritical carbon dioxide as a working fluid. This fluid has a high energy density and stable thermal and chemical properties. To further investigate the gas dynamics and structural characteristics of the turbine flow paths operating on supercritical carbon dioxide, it is necessary to create a full-scale experimental stand. However, the properties of the working fluid are not yet fully understood, that is why the creation of such a stand requires high costs and increased safety measures, since its operation is characterized by high temperature and pressure. In this work, supercritical carbon dioxide to air is simulated using the similarity technique. To validate numerical experiments conducted in Ansys Workbench software package, an experimental stand at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University was selected. A comprehensive evaluation of technical condition of the stand was conducted, and some units were replaced and modernized. As part of the stand preparation, thermal and resource calculations of the bearings were performed, and new oil injection nozzles for the bearings were designed and manufactured. Tests of the oil system were conducted, which showed that the volumetric flow rate meets the optimum values from the bearing technical data sheet. The volumetric flow rate of water in the system was also measured. A modern measuring system was developed, ensuring high experimental accuracy and allowing to obtain the main characteristics of the turbine in real time for further experimental studies.

Keywords: supercritical carbon dioxide, Brayton cycle, turbomachinery, experimental stand, theory of similarity, validation.

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-29-00968 “Principles of creating autonomous carbon dioxide turbine units for generating thermal and electrical energy, with external heat supply, operating on crude oil” (available online: <https://rscf.ru/project/23-29-00968/>) and conducted at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

Citation:

Gong B., Izbiakov N.S., Barskov V.V. et al., Modernization of the experimental stand for validation of numerical modeling of supercritical carbon dioxide to air as a working fluid for turbomachines, Global Energy, 30 (03) (2024) 7–22, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30301>



Рис. 1. Сценарии выработки электроэнергии в диапазоне 2010–2050 годы [1]

Fig. 1. Scenarios of electricity generation for the period 2010–2050 [1]

Введение. Спрос на электроэнергию не перестает расти с каждым годом. Это объясняется технологическим прогрессом и экономическим ростом. Например, наращивание объемов производства, развитие технологий искусственного интеллекта, переход на электромобили, работа дата-центров и т. д. Поэтому для покрытия спроса повышается выработка электроэнергии, что является трендом по всему миру. По сценариям International Energy Agency к середине века выработка электроэнергии составит от 54 000 до 77 000 ТВт*ч, что показывает рост более чем в два раза по сравнению с сегодняшним днем [1]. На рис. 1 представлены три сценария развития выработки электрической энергии до 2050 года: сценарий заявленной политики, сценарий объявленных обещаний, сценарий «углеродная нейтральность к 2050 году».

В связи с ростом выработки электроэнергии растут выбросы парниковых газов в атмосферу, что ведет к разрушению озонового слоя и нагреванию планеты. В 2019 году Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) выпустила специальный доклад, в котором было объявлено, что с вероятностью 66–100% глобальное потепление достигнет 1,5°C в период 2032–2050 годов при сохранении нынешних темпов повышения [2].

С целью снижения выбросов парниковых газов разрабатываются и принимаются регулирующие законы и стандарты. Из-за этого появляется тенденция перехода к низкоуглеродной энергетике. Наибольшее распространение в последние годы наблюдается у замкнутых или полужамкнутых циклов. Одними из примеров являются органический цикл Ренкина, цикл Аллама и замкнутый цикл Брайтона.

В органическом цикле Ренкина в качестве рабочих тел применяются фреоны, спирты и другие жидкости с низкой точкой кипения. Верхняя температура цикла ограничивается температурой распада рабочего тела, поэтому максимальная температура достигает 500–600 К, что ведет к сравнительно малому теплоперепаду, низкому КПД и сравнительно малой мощности [3].

В полужамкнутом цикле Аллама происходит сжигание газообразного топлива в среде углекислого газа с подачей окислителя. При работе энергетической установки (ЭУ) часть углекислого газа высокой чистоты отводится из цикла (товарная углекислота). При этом работа цикла Аллама ограничивается, так как в качестве источника теплоты могут выступать только природный газ, водородное или прочие (неорганические) топлива. Также цикл характеризуется большим количеством основных устройств по сравнению с органическим циклом Ренкина и циклом Брайтона, что ведет к высоким первоначальным затратам [4].

Замкнутый цикл Брайтона исследуется с различными рабочими телами, такими как гелий, неон, углекислый газ в сверхкритическом состоянии ($s\text{-CO}_2$) и другие. Последнее рабочее тело имеет

Турбина	Мощность (МВт)						
	0,3	1,0	3,0	10	30	100	300
Скорость вращения (об/мин)/размер (см)	75,000/ 5		30,000/ 14		10,000/ 40		3600/ 120
Радиальный тип	Одноступенчатые и многоступенчатые						
Осевой тип				Одноступенчатые и многоступенчатые			

Рис. 2. Особенности турбин, работающих на сверхкритическом диоксиде углерода [7]

Fig. 2. Features of turbines operating on supercritical carbon dioxide [7]

преимущества по сравнению с другими, так как обладает высокой плотностью энергии, низкой стоимостью, термической и химической устойчивостями. Также это рабочее тело позволяет работать в широком диапазоне температур – от 500 до 1400 К [3, 5].

Цикл Брайтона с s-CO₂

Критическая точка углекислого газа: $T = 304,14$ К и давление $P = 7,38$ МПа. Низкая критическая температура позволяет использовать воздушное охлаждение и делает установку независимой от водяного ресурса [6].

Опубликованные аналитические исследования показывают, что в установках 0,3–30 МВт используются радиально-осевые турбины (РОТ) [7–10]. Это объясняется тем, что в таком диапазоне мощностей применение осевых ступеней характеризуется низкой эффективностью из-за малого размера лопаток. Радиальные турбомашин позволяют разработать высокоэффективную и компактную турбоустановку, так как способны срабатывать больший перепад энтальпий на ступень по сравнению с осевыми. Особенности турбин, работающих на сверхкритическом диоксиде углерода, представлены на рис. 2.

Несмотря на вышеперечисленные преимущества, существуют определенные ограничения. Работа энергетических установок характеризуется высокими давлениями: от 15 до 32 МПа, следовательно, необходимо применение высокопрочных сплавов для обеспечения надежности установки. Вблизи критической области углекислый газ обладает уникальными свойствами, в частности высокой теплоемкостью и теплопроводностью, при этом такие свойства затрудняют использование этого рабочего тела в ЭУ, так как характер их изменения изучен не до конца.

Эти ограничения замедляют исследования и проектирование ЭУ, работающих по циклу Брайтона со сверхкритическим диоксидом углерода. Проведение физических экспериментов, изготовление опытных образцов и демонстрационных установок характеризуется высокими затратами. Одним из способов решения этих задач является проведение газодинамических исследований цикла Брайтона с s-CO₂ на воздушных стендах с учетом теорий подобия [11].

Моделирование сверхкритического диоксида углерода на воздух

Метод моделирования рабочих тел на воздух позволяет проводить испытания с минимальными затратами. Теория подобия базируется на трех критериях: геометрическое, кинематическое и динамическое подобия. Однако сложность моделирования заключается в том, что характер изменения физических свойств s-CO₂ отличается от характера изменения идеального газа. Это требует особой внимательности к применению теории подобия.

Проведены численные газодинамические испытания в программном комплексе Ansys Workbench в пакете CFX для радиально-осевой турбинной ступени на сверхкритическом диоксиде углерода. Далее итерационным методом проводились газодинамические испытания на воздухе с целью соблюдения теории подобия. Результат показал возможность физически моделировать

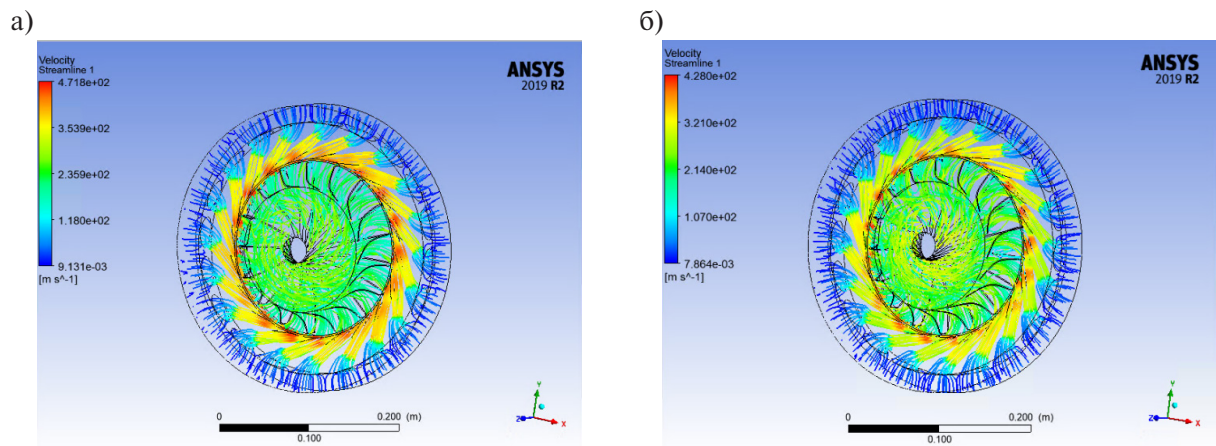


Рис. 3. Структура течения потока в ступени радиально-осевой турбины для рабочих тел:
а) сверхкритический диоксид углерода; б) воздух

Fig. 3. Flow structure in a stage of a radial-axial turbine for working fluids: a) supercritical carbon dioxide; b) air

на воздушном стенде, выдерживая критерии подобия, работу радиально-осевой турбинной ступени со сверхкритическим диоксидом углерода. Результаты численных газодинамических испытаний для сверхкритического диоксида углерода и воздуха представлены на рис. 3.

В качестве модели турбулентности была задана модель SST. В качестве граничных условий задавались полное давление и температура на входе в ступень РОТ и статическое давление на выходе из нее. Сходимость решения определялась значениями массовых имбалансов, расчет был остановлен при значениях менее 0,01. Значение было достигнуто после 700 итераций.

В табл. 1 приведены основные результаты для сверхкритического диоксида углерода и воздуха для моделирования.

Таблица 1

**Основные результаты моделирования радиально-осевой турбинной ступени
при натурных и модельных условиях**

Table 1

The main results of modelling a radial-axial turbine stage under full-scale and model conditions

№	Наименование параметра	Ед. измерения	Натурные условия	Модельные условия
1	Число Маха на выходе из направляющего аппарата, M_{cl}	—	0,8250	0,7765
2	Давление перед турбиной, p_0^*	Па	15112600	202574
3	Температура перед турбиной, T_0^*	К	825	343,3
4	Рабочее тело	—	s-CO ₂	Воздух
5	Расход рабочего тела, G	кг/с	73,043	1,282
6	Характеристическое число, u/C_0	—	0,48203	0,48220
7	Частота вращения ротора, n	об/мин	20000	16969
8	Мощность турбины, N_T	кВт	5109	57,717

С целью валидации результатов численного трехмерного моделирования РОТ далее описано экспериментальное исследование модели этой турбины на воздушном стенде.

а)



б)



Рис. 4. Состояния газосборника: а) исходное; б) измененное

Fig. 4. States of gas collector: a) initial; b) modified

Описание экспериментального стенда

В качестве экспериментального стенда выбрана ЭУ для исследования проточных частей РОТ, установленная на базе Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого в лаборатории им. И.И. Кириллова. Установка разработана, изготовлена и собрана на предприятии ООО «НТЦ «Микротурбинные технологии»» в 2014 году. ЭУ использовалась для проведения испытания частей компрессора и турбины. Подробное описание стенда представлено в работах [12, 13].

Последние испытания стенда проводились в 2017 году, для дальнейших исследований необходимо было проверить его работоспособность и модернизировать узлы. В ходе осмотра газосборника турбины обнаружено его неудовлетворительное состояние из-за деформации корпуса под высоким давлением. Для усиления конструкции были разработаны чертежи, деталь была отправлена на сварочные работы. Состояния газосборника представлены на рис. 4.

Подшипники вала индукторного тормоза нуждались в замене из-за недопустимого люфта. Их ресурс составлял не более 150 часов, что указывало на неэффективную систему подачи масла. Для модернизации были выбраны прецизионные однорядные радиально-упорные подшипники SKF 7212 CD/НСП4А с повышенной грузоподъемностью¹. Для достижения параметров моделирования необходимо применять жидкую смазку. В техническом паспорте подшипника оптимальный объемный расход масла составляет от 0,8 до 3,6 л/мин.

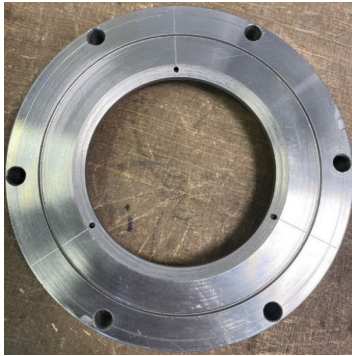
Для увеличения срока службы подшипника разработаны новые форсунки с тремя отверстиями для равномерной подачи масла. Созданы 3D-модели и чертежи для их изготовления. Изготовленные форсунки представлены на рис. 5.

Для продления срока службы подшипника установлены фильтр мелкой очистки и насос на сливной магистрали, чтобы предотвратить застой масла. На рис. 6 изображена принципиальная схема модернизированной масляной системы. Зеленым цветом выделены добавленные элементы.

После модернизации масляной системы необходимо провести испытания по замеру объемного расхода масла через каждый подшипник. Для этого отдельно от стенда были собраны подшипниковые узлы и помещены каждый в расходомерную емкость. В качестве жидкой смазки выбрано масло ЛАДОГА ТП-22, которое обладает необходимой вязкостью и оптимальной плотностью. Было проведено три испытания по замеру объемного расхода масла. По полученным данным произвели осреднение и построили график зависимости объемного расхода от времени. График изображен на рис. 7.

¹ SKF. Подшипник 7212 CD/НСП4А. Режим доступа: <https://www.skf.com/kz/products/super-precision-bearings/angular-contact-ball-bearings/productid-7212%20CD%20HCP4A> (дата обращения: 28.07.2024).

a)



б)

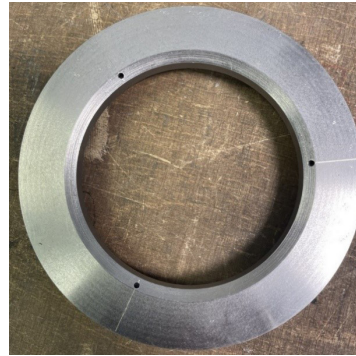


Рис. 5. Изготовленные форсунки для стенда: а) со стороны турбины; б) со стороны втулки
Fig. 5. Nozzles manufactured for the experimental stand: а) on the turbine side; б) on the bushing side

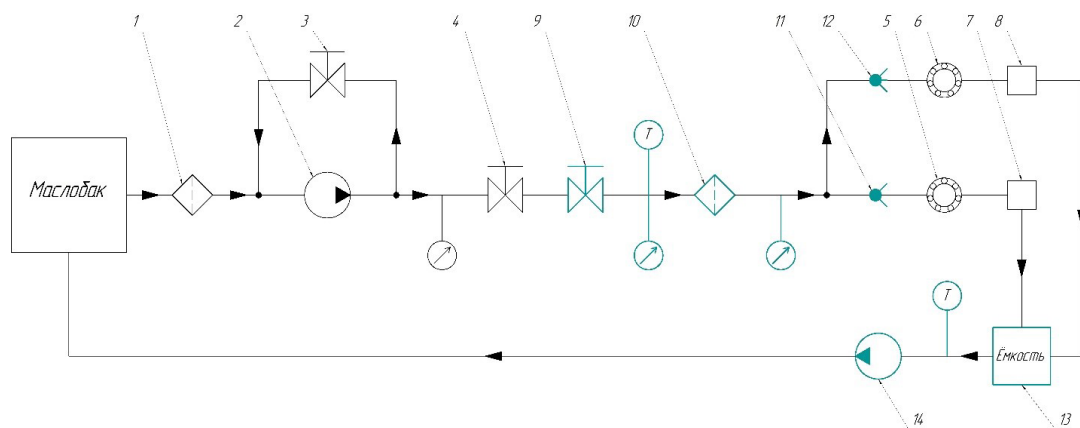


Рис. 6. Принципиальная схема модернизированной масляной системы: 1 – фильтр грубой очистки, 2 – насос «Авиадвигатель 623», 3 – регулирующий клапан байпас, 4 – регулирующий клапан, 5 – подшипник со стороны втулки, 6 – подшипник со стороны турбины, 7 – скоба сбора масла с подшипника со стороны втулки, 8 – скоба сбора масла с подшипника со стороны турбины, 9 – регулирующий клапан вблизи стенда ЭУ, 10 – фильтр мелкой очистки, 11 – форсунка для подшипника со стороны втулки, 12 – форсунка для подшипника со стороны турбины, 13 – специальная емкость сбора масла из скоб, 14 – насос ДVB-15

Fig. 6. Schematic diagram of the modernized oil system: 1 – coarse filter, 2 – “Aviadvigatel 623” pump, 3 – bypass control valve, 4 – control valve, 5 – bearing on the bushing side, 6 – bearing on the turbine side, 7 – oil collection bracket from the bearing on the bushing side, 8 – bracket for collecting oil from the bearing on the turbine side, 9 – control valve near the experimental stand, 10 – fine filter, 11 – nozzle for the bearing on the bushing side, 12 – nozzle for the bearing on the turbine side, 13 – special container for collecting oil from brackets, 14 – DVB-15 pump

Объемный расход на каждый подшипник лежит в диапазоне, рекомендованном в техническом паспорте подшипников.

Для предотвращения перегрева и обеспечения надежной эксплуатации подшипника необходимо произвести тепловой и ресурсный расчеты. Они помогают определить температуры масла на выходе из подшипника, а также оценить его ресурс работы, учитывая нагрузки, скорости вращения и форму тела качения.

Тепловой расчет проведен в соответствии с методикой теплового расчета подшипников².

Количество энергии (теплоты), выделяющейся в подшипнике за единицу времени:

² Справочник инженера. Тепловой расчет подшипников. Режим доступа: <https://inzhener-info.ru/razdely/konstruirovaniye/opory-skolzheniya/teplovoj-raschet-podshipnikov-skolzheniya.html> (дата обращения: 28.07.2024).

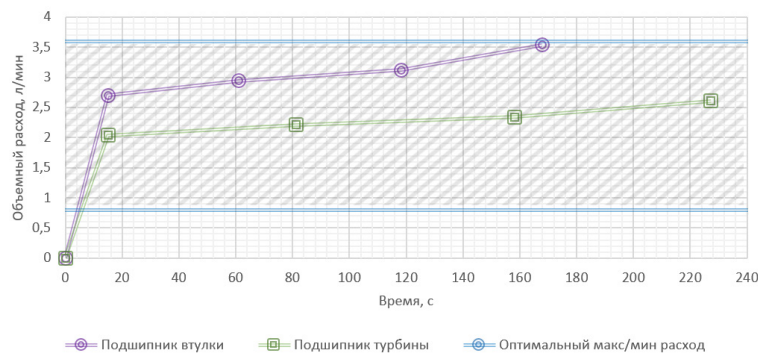


Рис. 7. График зависимости объемного расхода масла от времени с обозначением оптимального расхода

Fig. 7. Graph of volumetric oil flow rate versus time with optimum flow rate indicated

$$N_{\text{тр}} = P_1 \cdot V \cdot f, \quad (1)$$

где P_1 – результирующая нагрузка на подшипник, Н; V – окружная скорость, м/с; f – приведенный коэффициент трения, безразмерная величина.

$$P_1 = \sqrt{F_r^2 + F_a^2}, \quad (2)$$

где F_r – радиальная нагрузка, действующая на подшипник, Н; F_a – осевая нагрузка, действующая на подшипник, рассчитанная по методике расчета осевых сил, действующих в турбомашинах, Н [14].

$$V = \frac{\pi d n}{60}, \quad (3)$$

где d – средний диаметр подшипника, м; n – частота вращения, об/мин.

Рассчитаем количество теплоты, уносимой маслом из подшипника за единицу времени для минимального объемного расхода в установившемся состоянии:

$$N_{\text{охл}} = Q \rho c (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}), \quad (4)$$

где Q – минимальный объемный расход масла, м³/сек; ρ – плотность масла, кг/м³; c – удельная теплоемкость масла, Дж/кг·°С; $t_{\text{вых}}$ – оптимальная температура масла на выходе из подшипника, °С; $t_{\text{вх}}$ – температура на входе в подшипник, °С.

Коэффициент, показывающий способность охлаждающего тела воспринимать теплоту, возникающую в подшипнике выше расчетной:

$$s = \frac{N_{\text{охл}}}{N_{\text{тр}}}. \quad (5)$$

В технической документации подшипника предложена методика расчета срока службы³.

Базовый номинальный срок службы подшипника:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P_1} \right)^p, \quad (6)$$

³ SKF. Super-precision bearings. Режим доступа: <https://www.skf.com/group/products/super-precision-bearings> (дата обращения: 30.07.2024).

где C – базовая динамическая нагрузка из паспорта подшипника, кН; p – степенной показатель для шарикового подшипника, безразмерная величина.

Срок службы подшипника, выраженный в часах работы:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} L_{10}. \quad (7)$$

Результаты теплового и ресурсного расчетов подшипника представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты теплового и ресурсного расчетов подшипника

Table 2

Results of thermal and resource calculations of the bearing

№	Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
1	Количество теплоты, выделяющейся в подшипнике	$N_{тр}$	Вт	123,4
2	Результирующая нагрузка на подшипник	P_1	кН	0,462
3	Окружная скорость	V	м/с	89
4	Количество теплоты, уносимой маслом из подшипника	$N_{охл}$	Вт	3062
5	Коэффициент, показывающий способность охлаждающего тела воспринимать теплоту, возникающую в подшипнике	s	—	24,81
6	Базовый номинальный срок службы подшипника	L_{10}	млн оборотов	1922713
7	Срок службы подшипника	L_{10h}	экв. час	1602261

По проведенному ресурсному расчету видно, что срок службы подшипника превышает номинальный (1 млн оборотов). Это объясняется высокой грузоподъемностью по сравнению с нагрузкой на подшипник. Рассчитанный срок службы позволяет продолжительное время проводить испытания на стенде ЭУ, не подвергая подшипники замене.

Также были произведены испытания водяной системы. Система используется для охлаждения корпуса индукторного тормоза. Результаты испытаний водяной системы представлены на рис. 8. Объемного расхода воды достаточно для охлаждения корпуса индукторного тормоза.

После проведения испытаний масляной и водяной систем, теплового и ресурсного расчетов подшипника, а также модернизации газосборника турбины стенд ЭУ был собран. Собранный стенд ЭУ представлен на рис. 9.

Разработка измерительной системы

Разработана современная автоматическая цифровая измерительная система для экспериментального стенда.

В комплекс измерительной системы входят следующие датчики и устройства:

- 1 автоматический выключатель,
- 2 блока питания Siemens SITOP 6EP1333-2AA01,
- 6 модулей аналогового ввода MB210-101,
- 11 преобразователей давления ПД100И-ДИ0,6-111-0,25,
- 1 преобразователь давления ПД200-ДД0,2-155-0,1-2-Н,
- 22 термоэлектрического преобразователя ДТПК-011-0,5/3

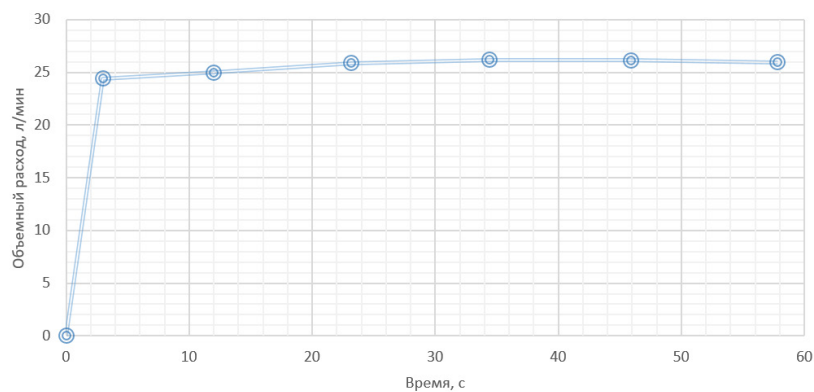


Рис. 8. График зависимости объемного расхода воды от времени
Fig. 8. Graph of volumetric water flow rate versus time

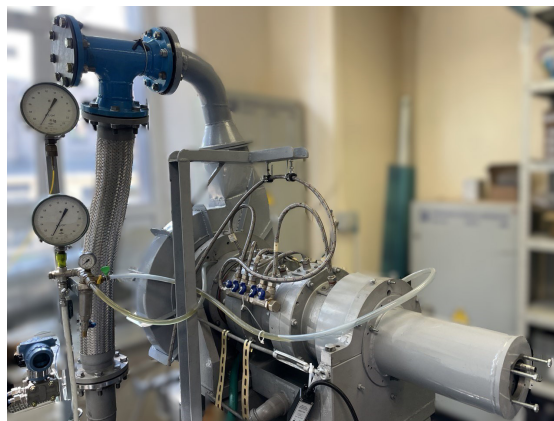


Рис. 9. Собранный модернизированный стенд ЭУ
Fig. 9. Modernized experimental stand

- 1 тахометр ТСП-04,
- 2 тензодатчика L6N-N-10/20kg
- 2 преобразователя сигнала JY-S85,
- 1 роутер.

Выходящий сигнал каждого из датчиков (4...20 мА) приходит в модуль аналогового ввода. Для преобразователей давлений параллельно включается резистор сопротивлением 51 кОм. Модули аналогового ввода передают сигнал по протоколу Modbus TCP по кабелю Ethernet. Электрическая схема подключения датчиков измерения представлена на рис. 10.

Сбор данных с датчиков измерения осуществляется посредством их соединения с программой MasterSCADA. В программе настроен алгоритм опроса датчиков, их первичная обработка, созданы графики зависимостей параметров от времени и мнемосхема, позволяющая в реальном времени следить за основными характеристиками ступени РОТ. Скриншот мнемосхемы во время проведения отладочных испытаний представлен на рис. 11.

Для проверки работоспособности стенда и датчиков измерения было произведено несколько отладочных испытаний. По результатам испытаний было рассчитано среднеквадратичное отклонение (СКО). Значения неопределенности датчиков по паспорту и СКО представлены в табл. 3.

После проведения испытаний параметры в зависимости от времени импортируются, усредняются и обрабатываются по методике определения внешних характеристик ступени.

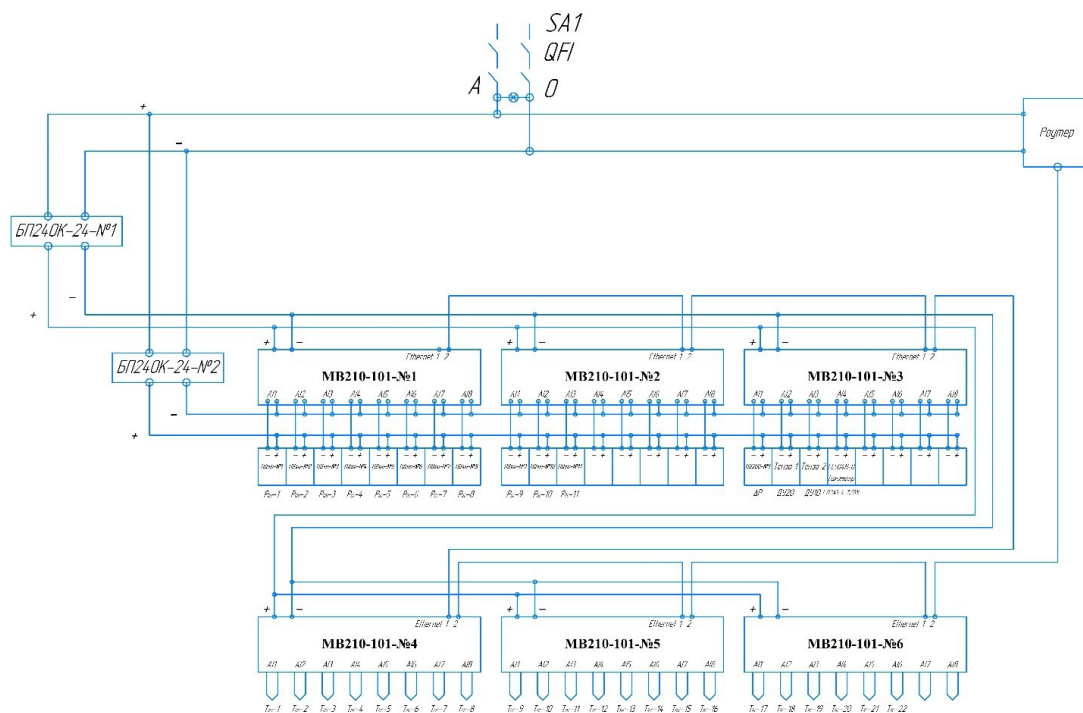


Рис. 10. Электрическая схема подключения датчиков измерения

Fig. 10. Electrical connection diagram of the measurement sensors

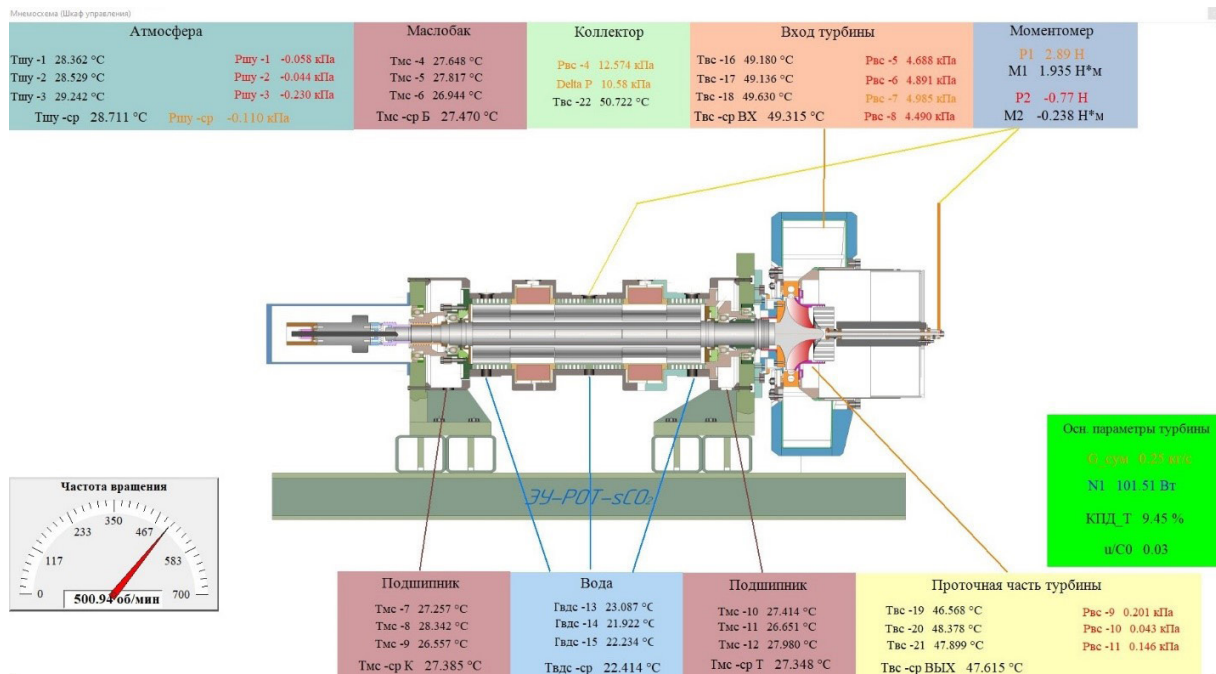


Рис. 11. Мнемосхема экспериментального стенда во время отладочных испытаний

Fig. 11. Mnemonic diagram of the experimental stand during debugging tests

Таблица 3

Неопределенность датчиков измерения, установленных на экспериментальном стенде

Table 3

Uncertainty of measurement sensors installed on the experimental stand

№	Датчик	Размерность	Значение	Неопределенность, %	СКО
1	Избыточного давления	кПа	4,77	0,25	0,026
2	Дифференциального давления	кПа	10,56	0,1	0,01
3	Температуры	К	47,9	0,75	0,144
4	Частоты вращения	об/мин	502	0,1	0,484
5	Силы	кг	2,95	0,02	0,068

СКО рассчитываемых величин по результатам отладочных испытаний представлено в табл. 4.

Таблица 4

Внешние характеристики турбины и их СКО по результатам отладочных испытаний

Table 4

Main characteristics of the turbine and their standard deviation according to the results of debugging tests

№	Величина	Формула	Размерность	Значение	СКО
1	π_T	$\frac{P_0^*}{P_2}$	—	1	0
2	h_0^*	$c_p * T_0^* \left[1 - (1/\pi_T)^{\frac{k-1}{k}} \right]$	Дж/кг	4299	18,35
3	C_0	$\sqrt{2h_0^*}$	м/с	92,7	0,18
4	ω_I	$\frac{\pi n_I}{30}$	с ⁻¹	52,53	0,048
5	M_I	$P_I l$	Н·м	1,91	0,047
6	N_I	$M_I \omega_I$	Вт	100	2,77
7	η	$\frac{N_I}{G_\Sigma h_0^*} \cdot 100\%$	%	9,37	0,27
8	u/C_0	$\frac{\pi d_{\text{ср}} n_I}{60 C_0}$	—	0,03	$4 \cdot 10^{-17}$

Вывод

В настоящее время наблюдается переход к низкоуглеродной энергетике в связи со стремлением к снижению выбросов парниковых газов в атмосферу. Исследуются различные замкнутые циклы для производства электрической энергии, которые при работе не производят парниковые газы и являются экологически чистыми. Наиболее перспективным является замкнутый цикл Брайтона со сверхкритическим диоксидом углерода. Это рабочее тело имеет уникальные свойства, которые позволяют вырабатывать электроэнергию с большой эффективностью. В то же время уникальные свойства являются ограничением к распространению таких энергетических

установок. Для исследования таких установок применяются методы моделирования рабочего тела на воздух по теории подобия. Были произведены численные испытания для турбинной ступени, работающей на $s\text{-CO}_2$ и на воздухе, для определения точек, сходственных в натуре и модели. Выбрали экспериментальный стенд для валидации численных расчетов, а также провели его подготовку. Были выполнены разработка и изготовление форсунок для подачи масла в подшипники, усиление конструкции газосборника, модернизация масляной системы, подбор подшипника и его тепловой и ресурсный расчеты, проведены испытания масляной и водяной систем. Разработали измерительную систему и подобрали методику обработки экспериментальных данных. После проведения всех работ экспериментальный стенд был собран и подготовлен к проведению испытаний по валидации численных расчетов моделирования. Провели отладочные испытания по определению среднеквадратичных отклонений для измеряемых и рассчитываемых величин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **IEA.** World Energy Outlook 2023. Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> (дата обращения: 05.07.2024).
- [2] **IPCC,** 2018: Summary for Policymakers // Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty / ed. by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield. Geneva: World Meteorological Organization Technical Document, 2018. P. 3–24. DOI: 10.1017/9781009157940.001
- [3] **Гун Б., Избяков Н.С., Барсков В.В., Рассохин В.А.** Аналитическое исследование тепловых схем утилизационных паро- и газотурбинных установок, применяемых для достижения углеродной нейтральности // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2024. Т. 8, № 773. С. 83–93. DOI: 10.18698/0536-1044-2024-8
- [4] **Allam R., Martin S., Forrest B., Fetvedt J., Lu X., Freed D., Brown G., Sasaki T., Itoh M., Manning J.** Demonstration of the Allam Cycle: an update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture // Energy Procedia. 2017. Vol. 14. P. 5948–5966. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1731
- [5] **Избяков Н.С., Гун Б., Барсков В.В.** Рассмотрение актуальных тепловых схем цикла Брайтона со сверхкритическим диоксидом углерода // Бутаковские чтения: сборник статей III Всероссийской с международным участием молодежной конференции. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2023. С. 397–400.
- [6] **Гун Б.** Применение диоксида углерода в сверхкритическом цикле Брайтона в гелиотермальной энергетике // Возобновляемая энергия планеты: II Всероссийский конкурс студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. С. 49–54.
- [7] **Fleming D., Holschuh T., Conboy T., Rochau G., Fuller R.** Scaling considerations for a multi-megawatt class supercritical CO₂ Brayton cycle and path forward for commercialization // Proceedings of the ASME Turbo Expo. 2012. Vol. 5. P. 953–960. DOI: 10.1115/GT2012-68484
- [8] **Deligant M., Huebel M., Djaname T., Ravelet F., Specklin M., Kebdani M.** Design and off-design system simulation of concentrated solar super-critical CO₂ cycle integrating a radial turbine meanline model // Energy Reports. 2022. Vol. 8. Suppl. 9. P. 1381–1393. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.07.141
- [9] **Persky R., Sauret E.** Loss models for on and off-design performance of radial inflow turbomachinery // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 150. P. 1066–1077. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.01.042

- [10] Qi J., Reddell T., Qin K., Hooman K., Jahn I.H.J. Supercritical CO₂ radial turbine design performance as a function of turbine size parameters // Journal of Turbomachinery. 2017. Vol. 139. Iss. 8. Art. no. 081008. DOI: 10.1115/1.4035920
- [11] Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. 8-е изд., перераб. М.: Наука, 1977. 440 с.
- [12] Барсков В.В., Рассохин В.А., Беседин С.Н., Тулубенский Е.В. Разработка методики испытаний малорасходных проточных частей турбины и компрессора // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. Т. 1, № 49. С. 9–15. DOI: 10.12737/18170
- [13] Барсков В.В. Выбор параметров и обоснование конструктивной схемы малогабаритной газотурбинной установки с независимым соотношением частот вращения роторов турбины и компрессора: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.12: защищена 25.04.12. СПб., 2017. 268 с.
- [14] Белоусов А.И., Иванов А.И. Расчет осевых сил, действующих в турбомашинах. Куйбышев: КуАИ, 1981. 84 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГУН Бовэнь — ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

E-mail: outbowenlook@outlook.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9818-7165>

ИЗБЯКОВ Никита Сергеевич — лаборант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

E-mail: nik.izbyakov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3053-5629>

БАРСКОВ Виктор Валентинович — директор Института энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: barskov_vv@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6914-8212>

ХУА Лунь — директор Института энергетики и защиты окружающей среды, Научно-исследовательский институт автомобильной промышленности Университета Цинхуа, Сучжоу, Ph.D.

E-mail: hualun@tsari.tsinghua.edu.cn

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6014-4942>

РАССОХИН Виктор Александрович — профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: rassohin_va@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4609-4252>

REFERENCES

- [1] IEA, World Energy Outlook 2023, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Accessed July 05, 2024).
- [2] IPCC, 2018: Summary for Policymakers, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.), Global Warming of 1.5°C.

An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, World Meteorological Organization Technical Document, Geneva, 2018, 3–24. DOI: 10.1017/9781009157940.001

[3] **B. Gong, N.S. Izbiakov, V.V. Barskov, V.A. Rassokhin**, Analytical analysis of thermal schemes of waste steam and gas turbine plants, used to achieve carbon neutrality, *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 8(773) (2024) 83–93. DOI: 10.18698/0536-1044-2024-8

[4] **R. Allam, S. Martin, B. Forrest, J. Fetvedt, X. Lu, D. Freed, G. Brown, T. Sasaki, M. Itoh, J. Manning**, Demonstration of the Allam Cycle: an update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture, *Energy Procedia*, 114 (2017) 5948–5966. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1731

[5] **N.S. Izbiakov, B. Gong, V.V. Barskov**, Rassmotrenie aktual'nykh teplovykh skhem tsikla Braitona so sverkhkriticheskim dioksidom ugleroda [Consideration of current thermal schemes of the Brayton cycle with supercritical carbon dioxide], *Butakovskie chteniia: Sbornik statei III Vserossiiskoi s mezhdunarodnym uchastiem molodezhnoi konferentsii* [Butakov Readings: Collection of Articles of the III All-Russian Youth Conference with International Participation], Izd-vo Tomskogo politechnicheskogo universiteta, Tomsk, 2023, 397–400.

[6] **B. Gong**, Primenenie dioksida ugleroda v sverkhkriticheskom tsikle Braitona v geliotermal'noi energietike [Application of carbon dioxide in the supercritical Brayton cycle in solar thermal energy], *Vozobnovliaemaia energiya planety: II Vserossiiskii konkurs studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem* [Renewable Energy of the Planet: II All-Russian Competition of Students, Postgraduates and Young Scientists with International Participation], Bauman State Technical University, Moscow, 2022, 49–54.

[7] **D. Fleming, T. Holschuh, T. Conboy, G. Rochau, R. Fuller**, Scaling considerations for a multi-megawatt class supercritical CO₂ Brayton cycle and path forward for commercialization, *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 5 (2012) 953–960. DOI: 10.1115/GT2012-68484

[8] **M. Deligant, M. Huebel, T. Djaname, F. Ravelet, M. Specklin, M. Kebdani**, Design and off-design system simulation of concentrated solar super-critical CO₂ cycle integrating a radial turbine meanline model, *Energy Reports*, 8 (9) (2022) 1381–1393. DOI: 10.1016/j.egy.2022.07.141

[9] **R. Persky, E. Sauret**, Loss models for on and off-design performance of radial inflow turbomachinery, *Applied Thermal Engineering*, 150 (2019) 1066–1077. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.01.042

[10] **J. Qi, T. Reddell, K. Qin, K. Hooman, I.H.J. Jahn**, Supercritical CO₂ radial turbine design performance as a function of turbine size parameters, *Journal of Turbomachinery*, 139 (8) (2017) 081008. DOI: 10.1115/1.4035920

[11] **L.I. Sedov**, *Metody podobiia i razmernosti v mekhanike* [Methods of similarity and dimensionality in mechanics], 8th ed., Nauka, Moscow, 1977.

[12] **V.V. Barskov, V.A. Rassokhin, S.N. Besedin, E.V. Tulubensky**, Test procedure development for low-spending parts of turbine and compressor, *Bulletin of Bryansk State Technical University*, 1 (49) (2016) 9–15. DOI: 10.12737/18170

[13] **V.V. Barskov**, Vybór parametrov i obosnovanie konstruktivnoi skhemy malogabaritnoi gazoturbinnoi ustanovki s nezavisimym sootnosheniem chastot vrashcheniia rotorov turbiny i kompressora: dis. kand. tekhn. nauk [Selection of parameters and justification of the design scheme of a small-sized gas turbine unit with an independent ratio of the rotation frequencies of the turbine and compressor rotors. Cand. phys. and math. sci. diss.], St. Petersburg, 2017.

[14] **A.I. Belousov, A.I. Ivanov**, Raschet osevykh sil, deistvuiushchikh v turbomashinakh [Calculation of axial forces acting in turbomachines], KuAI, Kuibyshev, 1981.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Bowen GONG – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: outbowenlook@outlook.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9818-7165>

Nikita S. IZBIAKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: nik.izbyakov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3053-5629>

Victor V. BARSKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: barskov_vv@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6914-8212>

Lun HUA – *Suzhou Automotive Research Institute, Tsinghua University (TSARI).*

E-mail: hualun@tsari.tsinghua.edu.cn

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6014-4942>

Victor A. RASSOKHIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: rassohin_va@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4609-4252>

Поступила: 05.08.2024; Одобрена: 16.09.2024; Принята: 24.09.2024.

Submitted: 05.08.2024; Approved: 16.09.2024; Accepted: 24.09.2024.

Научная статья

УДК 620.9

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30302>



В.В. Клименко¹ ✉, А.В. Клименко²,
А.Г. Терешин¹, О.В. Микушина³

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, Россия;

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Москва, Россия;

³ Институт энергетических исследований Российской академии наук,
Москва, Россия

✉ nilgpe@mpei.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ДОСТИЖЕНИЯ УГЛЕРОДНОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ РАЗВИВАЮЩИМИСЯ СТРАНАМИ

Аннотация. Исследованы перспективы достижения углеродной нейтральности крупнейшими развивающимися странами (Китай, Индия, Индонезия, Бразилия, Иран, Саудовская Аравия). Выполнен анализ структуры энергетики и землепользования в этих странах. Разработаны сценарные оценки динамики углеродных показателей экономик исследуемых стран. Показано, что существующие темпы декарбонизации и развития индустрии улавливания и хранения углерода (CCS) в исследуемых странах не позволяют выполнить их обязательства по достижению климатической нейтральности в 2050–2070 гг. — эта цель не может быть достигнута ранее конца столетия. Центральной проблемой в достижении климатической нейтральности становится быстрое и масштабное внедрение технологий CCS во всех ее возможных проявлениях. Однако из исследованных стран только Китай и Бразилия располагают собственными возможностями для захоронения углерода на период более ста лет. Несмотря на то, что изменения климата занимают едва ли не лидирующее место в мировой повестке, действительные результаты усилий в этой области далеки от декларируемых и сдержать потепление в пределах 1,5°C сейчас уже невозможно. Ключевой задачей становится максимальное сокращение времени пребывания глобальной климатической системы в опасной запредельной зоне (выше 1,5°C), что потребует создания мировой экономики с отрицательной эмиссией парниковых газов.

Ключевые слова: развивающиеся страны, энергетика, эмиссия и поглощение парниковых газов, климатическая нейтральность, сценарии.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в НИУ «МЭИ» (проект «Разработка методов, моделей и программных средств оценки эффективности и надежности энергетических систем и комплексов с использованием климатических данных», соглашение № 20-19-00721-П, <https://rscf.ru/project/20-19-00721/>) в части энергетических исследований и в НИТУ «МИСИС» (проект «Исследование возможностей снижения эмиссии метана и перспектив присоединения России к Глобальному обязательству по метану», соглашение № 23-19-00398, <https://rscf.ru/project/23-19-00398/>) в части исследования улавливания, захоронения и поглощения парниковых газов.

Для цитирования:

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: <https://doi.org/10.18721/JEST.30302>



V.V. Klimenko¹ ✉, A.V. Klimenko²,
A.G. Tereshin¹, O.V. Mikushina³

¹ National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI),
Moscow, Russia;

² National University of Science and Technology (MISIS), Moscow, Russia;

³ The Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences (ERI RAS),
Moscow, Russia

✉ nilgpe@mpei.ru

PROSPECTS FOR ACHIEVING CARBON NEUTRALITY BY DEVELOPING COUNTRIES

Abstract. The article examines the prospects for achieving carbon neutrality by the largest developing countries (China, India, Indonesia, Brazil, Iran, and Saudi Arabia). An analysis of the structure of energy and land use in these countries is carried out. Scenario estimates of the dynamics of carbon indicators for the economies of the countries under study are developed. It is shown that the current pace of decarbonization and development of the carbon capture and storage (CCS) industry in the countries under study do not allow them to fulfill their commitments to achieve climate neutrality in 2050–2070. This goal cannot be achieved before the end of the century. The central challenge in achieving climate neutrality is the rapid and large-scale implementation of CCS technologies in all their possible manifestations. Of the countries under study, however, only China and Brazil have their own carbon storage capabilities for more than a hundred years. Despite the fact that climate change occupies almost a leading place on the global agenda, the actual results of efforts in this area are far from declared, and it is no longer possible to keep warming within 1.5°C. The key task is to minimize the time that the global climate system remains in the dangerous extreme zone (above 1.5°C), which will require the creation of a global economy with negative greenhouse gas emissions.

Keywords: developing countries, energy, greenhouse gas emissions and absorption, climate neutrality, scenarios.

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation: in terms of energy research – project “Development of methods, models and software for assessing the efficiency and reliability of energy systems and complexes using climate data” (MPEI, agreement No. 20-19-00721-P, available online: <https://rscf.ru/project/20-19-00721/>) and in terms of the study of the capture, storage and absorption of greenhouse gases – project “Study of the possibilities of reducing methane emissions and the prospects for Russia’s accession to the Global Methane Pledge” (MISIS, agreement No. 23-19-00398, available online: <https://rscf.ru/project/23-19-00398/>).

Citation:

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: <https://doi.org/10.18721/JEST.30302>

Введение. 2023 год оказался самым теплым в истории инструментальных наблюдений и завершился установлением поразительного рекорда среднеглобальной температуры, превысившей (по данным Climate Research Unite, CRU) доиндустриальный (1850–1900 гг.) уровень на 1,46°C. При этом прежний рекорд 2016 г. был превышен сразу на 0,17°C, что является беспрецедентным событием за всю эпоху инструментальных наблюдений и вызывает серьезную тревогу мировой научной общественности [1]. В 2024 г. каскад рекордов продолжился, и к настоящему времени зафиксирована уникальная 13-месячная (июнь 2023 г. – июнь 2024 г.) серия ежемесячных максимумов.

В итоге средняя температура некалендарного года (июль 2023 г. — июнь 2024 г.) оказалась выше доиндустриального уровня на $1,59^{\circ}\text{C}$, преодолев тем самым первый критический рубеж, обозначенный Парижским соглашением. И хотя пока это лишь температура одного года, произошедшее событие является важным сигналом и тревожным посланием мировому сообществу, что опасный уровень потепления находится совсем рядом. Несмотря на то, что мощный Эль-Ниньо¹, в значительной мере ставший причиной прошлогоднего резкого всплеска температуры, завершился еще в мае 2024 г., температура не снижается, и 2024 год станет свидетелем нового рекорда. Климатически значимая средняя за десятилетие (2015–2024 гг.) аномалия среднеглобальной температуры составит, по предварительным данным, $1,26^{\circ}\text{C}$, и таким образом мир окажется в шаге от достижения рубежа в $1,5^{\circ}\text{C}$, что однозначно рассматривается мировым сообществом как крайне нежелательное событие [2]. При сохранении достигнутых за последние 30 лет скоростей потепления примерно в $0,2^{\circ}\text{C}$ за декаду следует ожидать, что критический рубеж будет преодолен уже в середине 2030-х гг. В сложившейся ситуации оптимальным и все еще возможным выглядит сценарий временного превышения (the Overshoot) рубежа в $1,5^{\circ}\text{C}$ с достижением пика потепления и последующим снижением температуры в результате последовательного осуществления инициатив саммитов в Глазго (2021) и Дубае (2023) [3] либо реализации низких демографических сценариев [4]. Превышение представляет собой значительную угрозу для стабильности глобальной климатической системы, и мировое сообщество уже сейчас ставит перед собой задачу максимального сокращения времени пребывания в зоне повышенных температур.

Мировое сообщество за последние 30 лет предпринимает значительные усилия для борьбы с опасным потеплением, и центральное место в них занимают мероприятия по сокращению эмиссии парниковых газов (ПГ), целью которых видится достижение так называемой климатической нейтральности, когда эмиссия ПГ уравнивается их стоком в естественные или антропогенные резервуары [5–6].

В своих недавних работах [7–11] авторы исследовали возможности решения ведущими экономиками мира и Россией поставленных задач в области охраны климата — достижения к 2050–2060 гг. углеродной нейтральности национальных экономик. Нами было показано, что, несмотря на существенный потенциал снижения выбросов парниковых газов в различных отраслях экономики, как Россия, так и страны Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) сталкиваются со значительными затруднениями в решении поставленных задач.

В настоящей работе мы исследуем возможности развивающихся стран, которые в ближайшем будущем станут основой мировой экономики, достичь своих целей в установленные ими сроки. Избранные шесть стран (табл. 1), по данным Института мировых ресурсов (World Resources Institute, WRI), в настоящее время ответственны почти за половину глобальной эмиссии парниковых газов, и траектории их развития в решающей степени определяют возможность реализации Парижского соглашения об ограничении глобального потепления рубежом «значительно ниже 2°C и желательно в пределах $1,5^{\circ}\text{C}$ ».

Как видно из табл. 1, все указанные страны, кроме Ирана², поставили целью достичь климатической нейтральности в 2050–2070 гг. с прохождением пика эмиссии ПГ до 2030 г. Цель настоящей работы — выяснить, насколько велики шансы избранных стран на реализацию столь амбициозных планов.

История и современное состояние

Все избранные страны характеризуются существенным ростом эмиссии ПГ за последние десятилетия (рис. 1), лишь в Иране и Саудовской Аравии за последние 5–7 лет наметилась

¹ Эль-Ниньо — иррегулярное (один раз в 3–7 лет) повышение температуры воды в тропической части Тихого океана, основная причина межгодовых колебаний среднеглобальной температуры.

² Иран ставит принятие обязательств по ограничению эмиссии ПГ и достижению климатической нейтральности в зависимости от отмены экономических санкций.

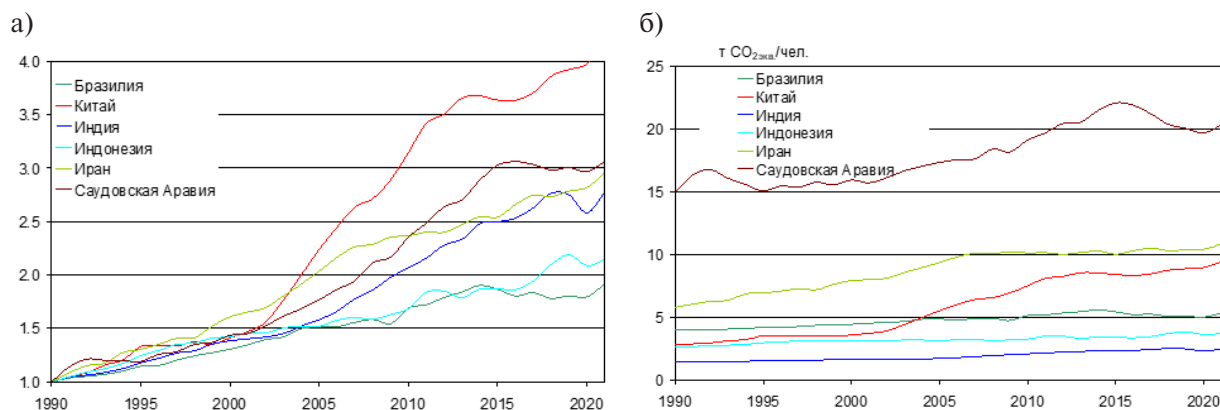


Рис. 1. Эмиссия ПГ (без учета ЗИЗЛХ) – валовая относительно уровня 1990 г. (а) и на душу населения (б) (по данным WRI и Демографической службы ООН)

Fig. 1. GHG emissions (excluding LULUCF) – gross, relative to 1990 (a) and per capita (b) (according to WRI and UN)

Таблица 1

**Добровольные обязательства по снижению нетто-эмиссии парниковых газов
сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК)**

Table 1

**Voluntary commitments to reduce net greenhouse gas emissions
of parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)**

Сторона РКИК	Базовый год	Эмиссия, в % к базовому году		Год достижения	
		в 2030 г.	в 2050 г.	пика эмиссии	климатической нейтральности
Бразилия	2008	47			
Китай	2005	175	55	до 2030	2060
Индия	2005	100	62	до 2025	2070
Индонезия	2010	95	50	2030	2060
Иран	2010				
Саудовская Аравия	2020	61		2016	2060

стабилизация этого показателя. Темпы роста удельной (на душу населения) эмиссии значительно ниже, и стабилизация этого показателя заметна уже во всех странах, а в Бразилии и Саудовской Аравии наблюдается его снижение.

Наземная биота за счет землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ) (рис. 2) может быть как нетто-стоком (Китай и Индия, где расширенное лесовосстановление превышает убыль лесов за счет вырубок и пожаров), так и нетто-источником ПГ (Бразилия и Индонезия, где продолжающееся масштабное сведение тропических лесов не компенсируется посадками). Эмиссия диоксида углерода из сектора ЗИЗЛХ Индонезии за последние 20 лет вообще составляла почти 50%, а в Бразилии – около 30% от общей национальной эмиссии.

Интенсивность выбросов основного ПГ – диоксида углерода – в значительной мере определяется объемом энергопотребления и структурой топливно-энергетического баланса (рис. 3). На долю производства цемента в исследуемых странах приходится не более 5% от общей эмиссии CO₂.

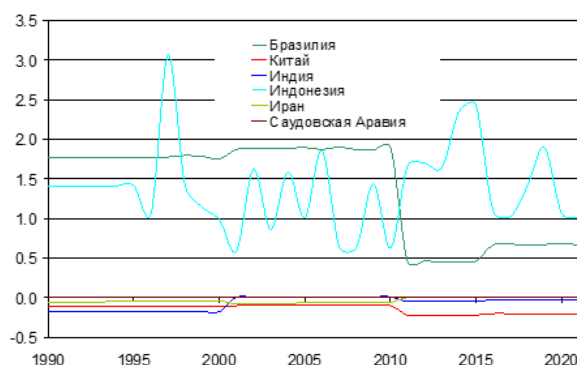


Рис. 2. Эмиссия/сток ПГ за счет ЗИЗЛХ (по отношению к 1990 г.) (по данным WRI)

Fig. 2. GHG emissions/absorption from LULUCF (relative to 1990) (according to WRI)

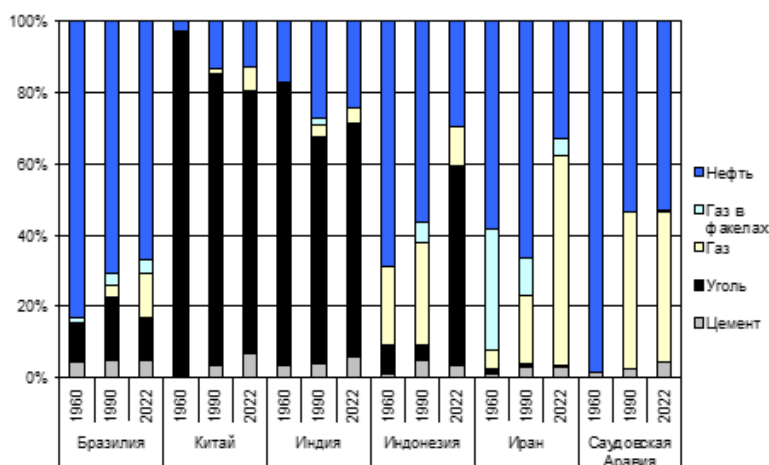


Рис. 3. Структура выбросов CO_2 от сжигания различных видов топлива и производства цемента (по данным WRI)

Fig. 3. Structure of CO_2 emissions from the fossil fuel combustion and cement production (according to WRI)

Как все бурно развивающиеся национальные экономики, исследуемые страны характеризуются интенсивным ростом энергопотребления (рис. 4а). Так, за период 1990–2022 гг. валовое потребление первичной энергии в Китае увеличилось почти в 5,5 раз, в Индии, Индонезии и Иране – в 4–4,5 раза, в Бразилии и Саудовской Аравии – в 2,5–3,5 раза.

Динамика удельных показателей энергопотребления (рис. 4б) выглядит более сдержанно. В Китае, Бразилии и Саудовской Аравии за последние годы наблюдается стабилизация и даже некоторое снижение этого показателя, а в Индии, Индонезии и Иране темпы роста заметно снизились.

Существенные различия имеются в структуре топливно-энергетического баланса (рис. 5а).

Энергетика Китая, Индии и Индонезии преимущественно основана на угле. При этом за последние 60 лет доля этого ископаемого топлива в национальном топливно-энергетическом балансе Китая и Индии планомерно снижалась, составив в 2022 г. около 55%, в то время как в Индонезии, напротив, она выросла до 45%. На безуглеродные источники энергии (ГЭС, АЭС, а также возобновляемые источники энергии – ВИЭ) в этих трех странах приходится 5–15% суммарного энергопотребления, и их доля в энергобалансе постоянно растет. Эта тенденция в ближайшие десятилетия обретет мощный дополнительный импульс – так, Китай, являясь абсолютным мировым лидером

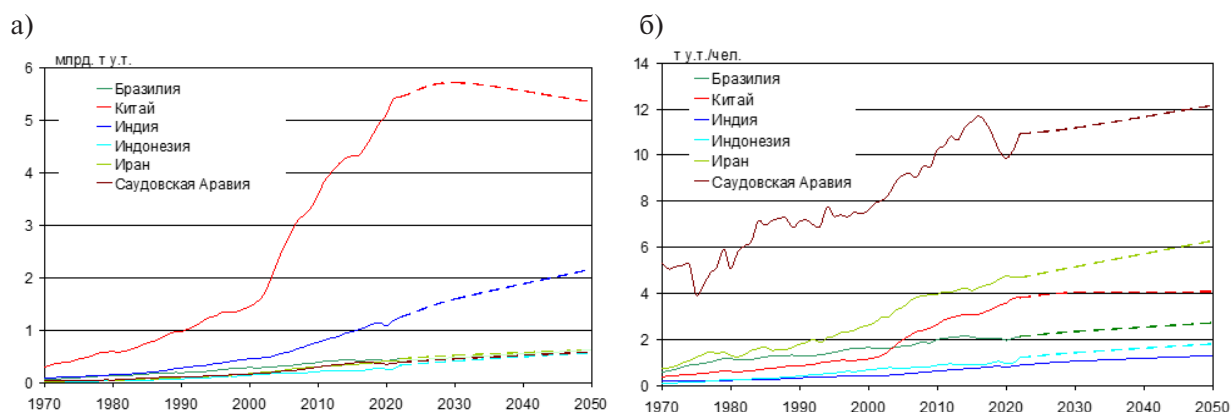


Рис. 4. Потребление первичной энергии – валовое (а) и на душу населения (б) (по историческим данным [12] и ООН и сценарию STEPS³ [13, 14])

Fig. 4. Primary energy consumption – gross (a) and per capita (b) (according to historical data [12] and UN and the STEPS scenario³ [13, 14])

по вводу безуглеродных источников энергии, намерен уже к 2028 г. производить 50% электроэнергии с помощью ВИЭ (включая ГЭС).

Основным источником энергии нефтегазодобывающих Ирана и Саудовской Аравии являются углеводороды, причем за последние 60 лет наблюдается явная тенденция перехода от нефти к газу, доля которого к 2022 г. в Саудовской Аравии достигла почти 40%, а в Иране – 70%. Безуглеродные источники энергии в этих странах сегодня практически не дают вклада в энергобаланс.

Наиболее сбалансированным энергетическим комплексом обладает Бразилия, почти половина энергопотребления которой в настоящее время обеспечивается гидроэнергетикой, доля нефти снизилась до 40%, доля газа увеличилась до 10%, в то время как на уголь приходится не более 5% энергобаланса.

В электроэнергетике (рис. 5б) картина еще ярче. В Иране и Саудовской Аравии практически вся электроэнергия вырабатывается на тепловых электростанциях (ТЭС), сжигающих природный газ и нефтетопливо. В Индии и Индонезии около 20% электрогенерации приходится на безуглеродные источники (ГЭС, АЭС и ВИЭ), остальное обеспечивается угольными ТЭС. В Китае более трети выработки электростанций происходит без сжигания органического топлива, теплоэнергетика в качестве топлива преимущественно использует уголь. Бразилия почти 90% своей электроэнергии производит за счет ГЭС, ВИЭ и АЭС, являясь одним из мировых лидеров по безуглеродной электроэнергетике.

Объем и структура энергопотребления определяют масштаб выбросов диоксида углерода в энергетике (рис. 6). Валовая эмиссия CO_2 в исследуемых странах (рис. 6а) растет меньшими темпами, чем энергопотребление (рис. 4а), что объясняется ростом доли низкоуглеродных (природный газ) и безуглеродных (ГЭС, АЭС, ВИЭ) источников энергии в энергобалансах.

В результате во всех исследуемых странах наблюдается снижение удельных (на единицу потребляемой первичной энергии) выбросов углекислого газа (рис. 6б), называемых углеродной интенсивностью, или карбоноемкостью энергопотребления.

В Бразилии этот процесс интенсивно протекал еще в 1970-е гг. за счет строительства больших ГЭС, в результате чего энергоемкость ее энергетики вот уже более 40 лет находится на очень

³ В последнем прогнозе Международного энергетического агентства (МЭА, International Energy Agency, IEA) [13] рассматриваются два сценария – STEPS (Stated Policies Scenario), ориентирующийся на уже действующие программы декарбонизации национальных экономик, и APS (Announced Pledges Scenario), предполагающий достижение национальных целей, согласно Парижскому соглашению, своевременно и в полной мере.

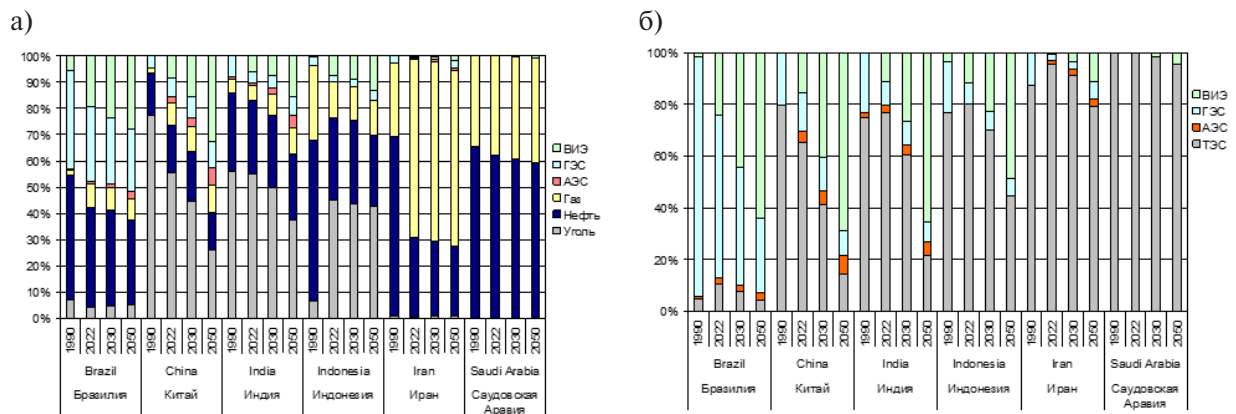


Рис. 5. Структура энергопотребления (а) и производства электроэнергии (б) (по историческим данным [12] и сценарию STEPS [13])

Fig. 5. Structure of primary energy consumption (a) and electricity production (b) (according to historical data [12] and the STEPS scenario [13])

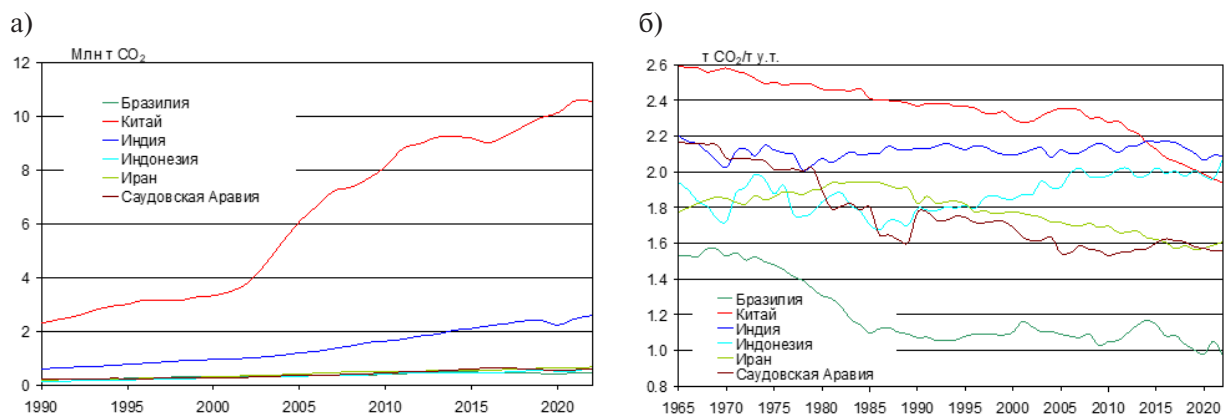


Рис. 6. Выбросы диоксида углерода в энергетике – валовые (а) и на единицу первичной энергии (б) (по данным [12])

Fig. 6. Carbon dioxide emissions in the energy sector – gross (a) and per unit of primary energy (b) (according to [12])

низком уровне в $1,0 \text{ т CO}_2/\text{т у.т.}$, что существенно ниже, чем в ЕС или США. Иран и Саудовская Аравия последние десятилетия постоянно снижают углеродную интенсивность своего энергопотребления благодаря замещению в своем энергобалансе нефти природным газом, в результате чего удельные выбросы снизились с $1,9 \text{ т CO}_2/\text{т у.т.}$ в 1980 г. до $1,6 \text{ т CO}_2/\text{т у.т.}$ в 2022 г., что заметно ниже среднемирового значения в $1,75 \text{ т CO}_2/\text{т у.т.}$

Китай также планомерно снижает удельные выбросы в национальной энергетике, до 2005 г. – в основном за счет ввода крупных ГЭС и АЭС, а последние два десятилетия – еще более высокими темпами за счет масштабного строительства солнечных и ветровых электростанций. Следствием такой перестройки энергетики стало снижение удельных выбросов с $2,57 \text{ т CO}_2/\text{т у.т.}$ в 1970 г. до $2,35 \text{ т CO}_2/\text{т у.т.}$ в 2005 г. и до $1,94 \text{ т CO}_2/\text{т у.т.}$ в 2022 г. Рис. 4б показывает, что энергетика является весьма инерционной сферой экономики, и для достижения значимых результатов здесь требуются десятилетия.

Сектор землепользования является еще более инерционным, чем энергетика, и также важен для обеспечения базовых потребностей населения. Данные Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (Food and Agriculture Organization, FAO) с 1961 г. (рис. 7а) свидетельствуют

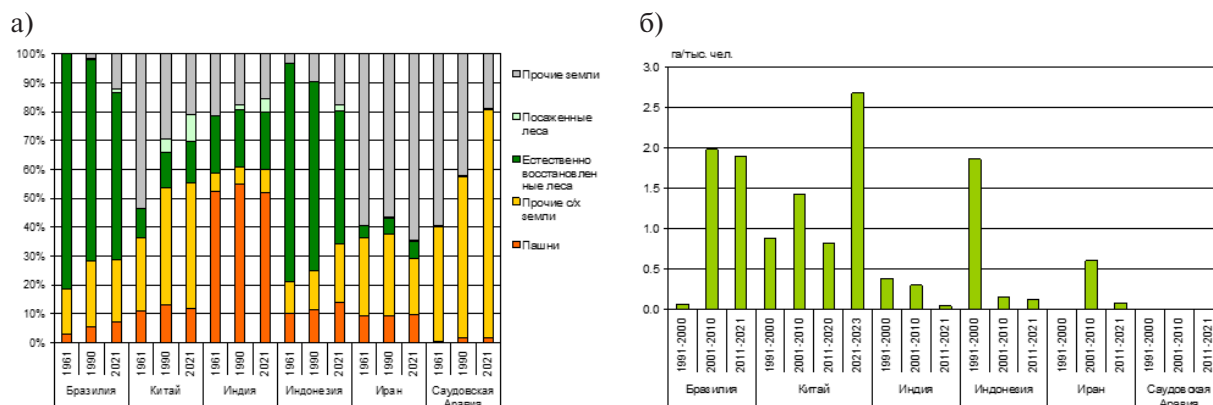


Рис. 7. Структура землепользования (а) и площадей лесопосадок, приходящихся на душу населения (б) (по данным FAO)

Fig. 7. Structure of land use (a) and forest planted areas per capita (b) (according to FAO)

о замедлении скорости роста площади сельскохозяйственных земель, в том числе пашен, во всех рассматриваемых странах, причем в тропических странах (Бразилия и Индонезия) это происходит за счет сведения лесов. Рост площади лесов отмечается в Индии, Иране и в особенности в Китае, в том числе за счет масштабных лесопосадок (рис. 7б). Мероприятия по лесовосстановлению в Бразилии и Индонезии сегодня находятся в зачаточной стадии и пока не могут компенсировать вырубки, в том числе часто нелегальные.

В результате площадь лесов увеличивается только в Индии, Китае и Иране (на 15%, 20% и 40% по сравнению с 1990 г. соответственно) и продолжает сокращаться в Бразилии и Индонезии (на 15% и 22% по сравнению с 1990 г. соответственно) (рис. 8а).

Еще одной важной тенденцией является снижение удельных площадей пашен, приходящихся на душу населения (рис. 8б). Развитие сельскохозяйственных технологий приводит к тому, что для обеспечения продовольствием требуется меньшая площадь обрабатываемых земель — в настоящее время на уровне 0,1–0,2 га/чел., что в 2–3 раза меньше, чем 60 лет назад.

Таким образом, современное состояние энергетики и землепользования в исследуемых странах как источников ПГ имеет следующие основные черты:

- сохраняющийся рост валового энергопотребления на фоне стабилизации (и даже снижения в отдельных странах) его удельных показателей (на душу населения);
- снижение углеродной интенсивности энергопотребления за счет перехода к низкоуглеродным (природный газ) и быстрого развития безуглеродных (ГЭС, АЭС, ВИЭ) источников энергии;
- увеличение площади сельскохозяйственных земель (в том числе пашен) при снижении их площадей в расчете на душу населения за счет интенсификации агротехнологий;
- формирование тенденции к росту лесовосстановления, которое в некоторых странах (Китай, Индия) уже превышает объемы вырубок, что ведет к росту площади лесов — основного поглотителя углекислого газа.

Сценарии

Для оценки перспектив декарбонизации экономик развивающихся стран была проанализирована связь темпов изменения удельных выбросов ПГ на душу населения с ВВП на душу населения (рис. 9). В качестве исходных данных были использованы показатели эмиссии ПГ (без учета ЗИЗЛХ) WRI и экономические данные МВФ. Для исследования были выбраны 130 стран с национальными выбросами ПГ более 10 млн т $\text{CO}_{2\text{экв}}$ /год каждая, страны с нестабильным политическим состоянием (Судан, Сирия, Сомали, Йемен) были исключены из рассмотрения.

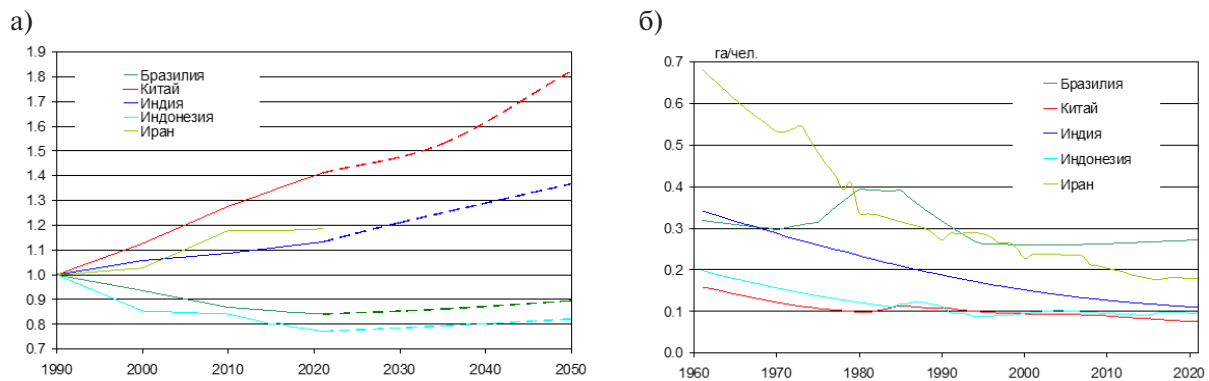


Рис. 8. Площадь лесов относительно уровня 1990 г. (а) и пашни, приходящихся на душу населения (б) (по историческим данным FAO и национальным планам⁴)

Fig. 8. Forest area relative to 1990 level (a) and arable land per capita (b) (according to FAO historical data and national plans⁴)

Как и следовало ожидать, низкие душевые показатели ВВП не способствуют снижению карбоноёмкости экономики — для стран с удельным ВВП ниже примерно 10 тыс. долл. США/чел. преимущественно характерен рост удельных выбросов ПГ на душу населения. Здесь приоритетной задачей правительств является борьба с бедностью, а экологические проблемы, в частности проблемы ограничения выбросов ПГ, неизбежно отходят на второй план. В то же время при превышении уровнем жизни порога в 14 тыс. долл. США/чел. (эта величина совпадает с условной границей, отделяющей богатые и бедные страны по терминологии МВФ) наблюдается практически линейная зависимость темпов снижения удельных выбросов ПГ от удельного ВВП. Очевидно, что более богатые страны уже могут себе это позволить и охотно вкладывают средства в энергопереход и декарбонизацию экономики.

Для оценки возможностей декарбонизации исследуемых стран в ближайшие десятилетия в рамках предложенного подхода были использованы средний сценарий численности населения [14] и долгосрочный экономический прогноз группы Goldman Sachs [16]. По данным МВФ (рис. 9а), в настоящее время лишь Саудовская Аравия имеет удельный ВВП более 14 тыс. долл. США/чел. Согласно перспективным оценкам [16], эту планку Китай преодолит к 2030 г., Бразилия и Иран — в 2050 г., а Индонезия — лишь после 2060 г. Индия из-за неконтролируемого роста населения достигнет этого уровня лишь в конце текущего столетия. Полученные оценки динамики удельных выбросов на душу населения приведены на рис. 10, а валовые выбросы — на рис. 11.

Как следует из результатов выполненных расчетов, при сохранении действующих тенденций в сфере охраны климата только Бразилия и Китай способны достичь климатической нейтральности до конца столетия, но со значительным, в 20–40 лет, опозданием относительно декларируемого срока. Для этого Бразилия должна будет решительно отказаться от дальнейшей brutальной вырубке своих лесов и постепенно привести свою лесохозяйственную практику в соответствие с нормами, принятыми в других странах Южной Америки [17], а Китай — поддерживать рекордные темпы декарбонизации энергетики, достигнутые за последние 15 лет. Более

⁴ 2030–2050 Vision. The future of forests and agriculture in Brazil [online] URL: <https://coalizaobr.com.br/wp-content/uploads/2023/05/2030-2050-The-Future-of-Forests-and-Agriculture-in-Brazil.pdf>. Accessed September 19, 2024; Reducing Carbon Emissions | Saudi Green Initiative Target [online] URL: <https://www.greeninitiatives.gov.sa/about-sgi/sgi-targets/reduce-carbon-emissions/>. Accessed September 19, 2024; China sets ambitious forestry development goals for 2050 [online] URL: <https://bioenergyinternational.com/china-sets-ambitious-forestry-development-goals-2050/>. Accessed September 19, 2024; INDONESIA. Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience 2050 (Indonesia LTS-LCCR 2050) [online] URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Indonesia_LTS-LCCR_2021.pdf. Accessed September 19, 2024; India's Long-Term Low-Carbon Development Strategy [online] URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/India_LTLEDS.pdf. Accessed September 19, 2024.

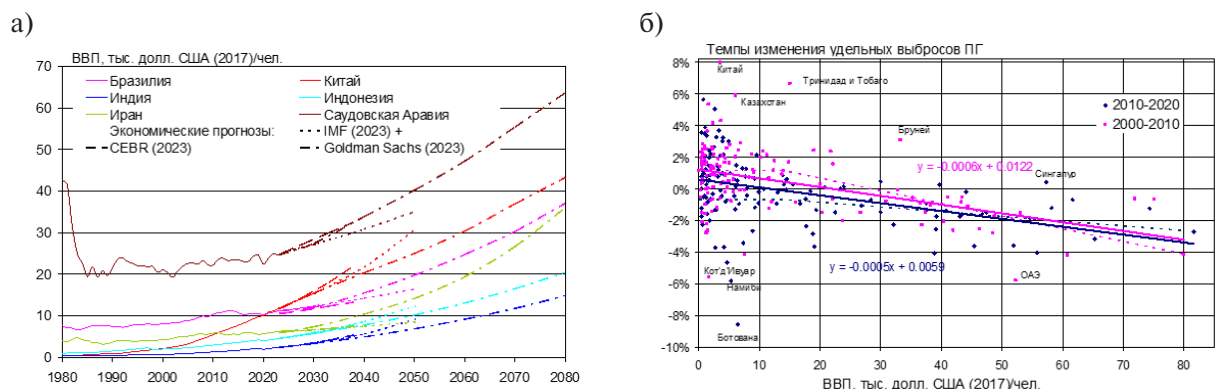


Рис. 9. ВВП на душу населения в постоянных ценах (данные МВФ, [15, 16]) (а)
и его взаимосвязь с темпами изменения удельных выбросов ПГ душу населения (по данным МВФ и WRI) (б)
Fig. 9. GDP per capita at constant prices (IMF data, [15, 16]) (a)
and its relationship with the rate of change in specific GHG emissions per capita (according to IMF and WRI) (b)

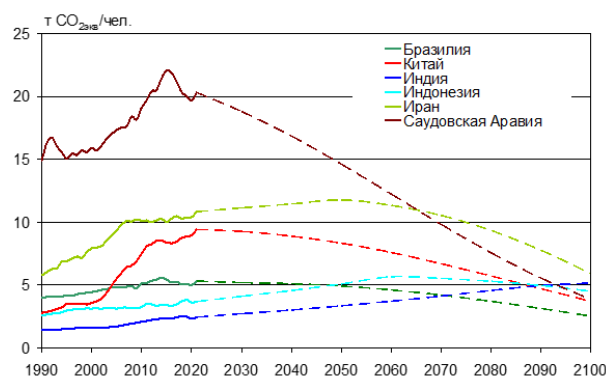


Рис. 10. Динамика удельных (на душу населения) выбросов ПГ
Fig. 10. Dynamics of specific (per capita) GHG emissions

того, Бразилия остается единственной из больших стран, сохраняющей возможность достичь климатической нейтральности за счет полной активизации своего биологического резервуара углерода. Все другие страны не способны даже к 2100 г., не говоря уже о более ранних сроках, достичь климатической нейтральности, поскольку выбросы ПГ в экономике не компенсируются ростом поглощающей способности лесных насаждений. Современных усилий явно недостаточно — это станет совершенно очевидным уже через пять лет, когда на рубеже 2030 г. выяснится, что Китай, Бразилия и Саудовская Аравия, скорее всего, окажутся на плато выбросов, не приступив еще толком к их снижению, а Индия, Индонезия и Иран нарастят свои выбросы еще на 15–20%. Вообще, хронические неудачи многих стран в осуществлении планов по охране климата связаны с тем, что желаемые скорости трансформации весьма инерционных областей человеческой деятельности, в первую очередь энергетики, по-видимому, превосходят возможности этих стран, сформированные историческим опытом.

Тем не менее потенциал снижения выбросов ПГ в некоторых из рассмотренных экономик весьма значителен — так, к 2080 г. эмиссия ПГ по сравнению с уровнем 1990 г. снизится в Китае на 60%, в Саудовской Аравии — на 50%, а в Бразилии и Иране — на 30%. Индия и Индонезия ввиду сохраняющегося роста населения и отставания в экономическом развитии продолжают увеличивать свои выбросы ПГ вплоть до второй половины столетия, оставаясь их основными эмитентами.

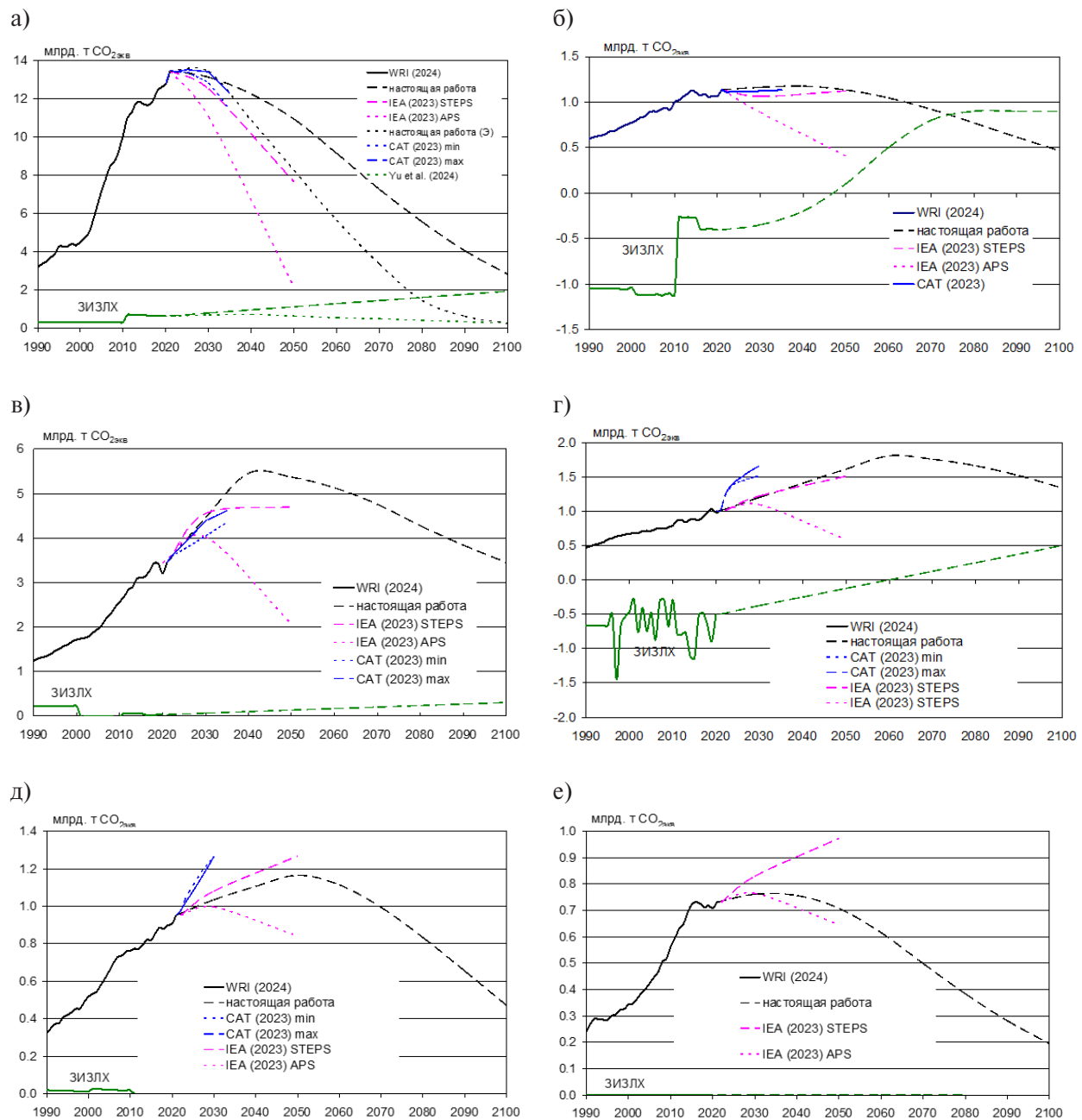


Рис. 11. Динамика валовых выбросов ПГ (без ЗИЗЛХ) и нетто-сток ЗИЗЛХ (по данным WRI и расчетам настоящей работы, а также сценариям IEA [13] и CAT⁵) в Китае (а), Бразилии (б), Индии (в), Индонезии (г), Иране (д) и Саудовской Аравии (е)

Fig. 11. Dynamics of gross GHG emissions (excluding LULUCF) and net flux of LULUCF (according to WRI data and calculations of present study, as well as IEA [13] and CAT⁵ scenarios) in China (a), Brazil (b), India (c), Indonesia (d), Iran (e) and Saudi Arabia (f)

Возможности увеличения стока углерода в леса также весьма ограничены. Несмотря на амбициозные планы Китая, Индии, Индонезии и Бразилии ([18] и рис. 8) по увеличению площадей лесов в ближайшие десятилетия, их будет явно недостаточно для нейтрализации значительных остаточных выбросов везде, кроме Бразилии. Кроме того, все страны, располагающие значительными

⁵ Climate Action Tracker, Мониторинг действий в защиту климата, <https://climateactiontracker.org>.

лесными ресурсами, за исключением разве что Китая, сталкиваются с упорным сопротивлением бизнеса и повальными нарушениями при исполнении законов, направленных на сохранение лесов.

Таким образом, единственным решением проблемы климатической нейтральности для этих стран являются технологии улавливания и захоронения углекислого газа (carbon capture and storage, CCS) [19–21]. Однако современные оценки геологических ресурсов горных пород для захоронения CO₂ (табл. 2) свидетельствуют о наличии достаточных возможностей лишь у Бразилии, единственной страны, способной депонировать свои выбросы при их современном уровне в течение сотен лет. Если же говорить о горизонте ближайших десятилетий, когда, собственно, и планируется достижение климатической нейтральности, то только Китай имеет перспективные планы реализации проектов CCS достаточной мощности (табл. 3).

Таблица 2

**Оценки геологических ресурсов горных пород для захоронения CO₂
по странам и регионам мира, Гт CO₂ [19, 20]**

Table 2

Estimates of geological resources for CO₂ storage by country and region of the world, Gt CO₂ [19, 20]

Страна	Нижние оценки			Верхние оценки		
	Суша	Шельф	Всего	Суша	Шельф	Всего
Бразилия	224	73	297	1572	515	2087
Китай	325	78	403	2286	544	2830
Индия	75	24	99	525	172	697
Индонезия	96	67	163	672	472	1144
Иран*	68	22	90	477	156	633
Саудовская Аравия*	89	29	119	629	206	835

* Оценка авторов настоящей работы.

Таблица 3

**Емкость Q (Гт CO₂) и мощность G (Мт CO₂/год) действующих,
проектируемых и перспективных проектов CCS (по данным OGCI⁶ и [21])**

Table 3

**Storage Q (Gt CO₂) and capacity G (MtCO₂/year) of operating,
projected and prospective CCS projects (according to OGCI and [21])**

Страна	Действующие		Проектируемые	Перспективные	Всего
	Q	G	Q	Q	Q
Бразилия	0,08	3.0	2.47		2.48
Китай		2.3	10.5	3067	3078
Индия			0.84	63.3	64
Индонезия			2.46	13.4	16
Иран	—	—	—	—	—
Саудовская Аравия		1.3	44		44

⁶ OGCI (The Oil and Gas Climate Initiative) – Нефтегазовая климатическая инициатива, <https://www.ogci.com/ccus/>.

Обсуждение результатов

Выполненные расчеты показывают, что ни одна из исследованных стран не способна в ожидаемые сроки достичь углеродной нейтральности без использования технологий CCS, поскольку снижающиеся выбросы ПГ в экономике не компенсируются ростом поглощающей способности лесных насаждений. При этом следует иметь в виду, что интенсивность глобального биотического стока имеет естественный предел не выше 6–9 Гт CO_2 [22] и может начать снижение уже в середине текущего столетия.

В результате реализации политики декарбонизации экономики в исследованных странах эмиссия ПГ к 2080 г. по сравнению с уровнем 2020 г., в Китае снизится на 90%, в Саудовской Аравии – на 50%, в Бразилии и Иране – на 30%. Индия и Индонезия в результате сохранения высоких темпов роста населения и невысокого уровня экономического развития продолжают увеличивать свои выбросы ПГ, которые к 2080 г. превысят современный уровень в 1,2 и 1,7 раз соответственно.

Увеличение поглощения углерода земными экосистемами также имеет свои пределы. Масштабные планы Китая, Индии, Индонезии и Бразилии по увеличению площадей лесов в ближайшие десятилетия хоть и сыграют заметную роль в снижении антропогенных выбросов ПГ, но не смогут полностью их компенсировать (табл. 4).

Таблица 4

Оценки эмиссии (E), поглощения за счет ЗИЗЛХ (S) ПГ и мощности CCS (G), необходимых для достижения климатической нейтральности в ожидаемые сроки, а также требуемых объемов захоронения до 2100 г. (Q_{2100}) и имеющихся геологических резервуаров (Q)

Table 4

Estimates of GHG emissions (E), absorption due to LULUCF (S), and CCS capacity (G) required to achieve climate neutrality within the expected timeframe, as well as required CCS storage volumes up to 2100 (Q_{2100}) and available geological reservoirs (Q)

Страна	Год	E , Гт $\text{CO}_{2\text{экв}}$ /год	S , Гт $\text{CO}_{2\text{экв}}$ /год	G , Гт $\text{CO}_{2\text{экв}}$ /год	Q_{2100} , Гт	Q , Гт
Бразилия	2050	1.07	0.10	0.97	31	224
Китай	2060	5.44	0.56	4.88	257	325
Индия	2070	4.42	0.12	4.30	318	75
Индонезия	2060	1.75	0.00	1.75	194	96
Иран	2080	0.62	0.00	0.62	21	68
Саудовская Аравия	2060	0.60	0.00	0.60	58	89

Единственным решением проблемы климатической нейтральности для всех этих стран являются технологии улавливания и захоронения углекислого газа CCS [23–25]. Хотя современные оценки геологических ресурсов горных пород для захоронения CO_2 (табл. 2) свидетельствуют о наличии таких теоретических возможностей у всех исследуемых стран, инвентаризация действующих, проектируемых и перспективных проектов CCS на ближайшие десятилетия (табл. 3) оставляет в этом списке лишь Китай.

В качестве перспективных объемов геологических хранилищ CO_2 в табл. 4 использованы «нижние» оценки из табл. 2. Результаты простых расчетов показывают, что при условии освоения всех этих громадных резервуаров только Бразилия будет обладать практически неограниченными возможностями по захоронению объемов ПГ, необходимых для достижения и обеспечения в дальнейшем своей климатической нейтральности. Геологические резервуары Китая и Саудовской Аравии способны обеспечить захоронение необходимых объемов ПГ, для выполнения их

климатических обязательств, Индонезия обеспечена ими лишь наполовину, и, наконец, Индия со своими высокими показателями выбросов ПГ и низкой обеспеченностью ресурсами CCS не имеет даже теоретических возможностей для достижения своих климатических целей. Через несколько десятилетий именно Индия займет место Китая в качестве главного эмитента ПГ (рис. 11) и станет основным препятствием на пути осуществления Парижских соглашений.

Чтобы оценить масштабность задач по развитию технологий CCS, следует сравнить полученные оценки их необходимых мощностей из табл. 4 с современными показателями из табл. 3, которые различаются на два порядка. Это означает необходимость безотлагательного создания в течение ближайших двух-трех десятилетий целой отрасли промышленности, по масштабам сравнимой с газовой. Эта новая отрасль, включающая хранилища, трубопроводы и компрессорные станции⁷ [24, 25], должна к 2075 г. располагать мощностью, превышающей 15 Гт CO_{2экв}/год. Современные (2010–2023 гг.) весьма высокие темпы развития индустрии CCS (11% в год [21]) позволяют к 2075 г. достичь в глобальном масштабе мощности захоронения ПГ на уровне 7,5 Гт CO_{2экв}/год, из которых предположительно лишь треть будет размещена в изучаемых странах, чего явно недостаточно для решения поставленных задач (табл. 5). Поэтому следует предполагать, что достижение климатической нейтральности развивающимися странами в целом отодвигается на конец столетия, на 30–40 лет позже ее достижения ведущими странами ОЭСР, которые к этому времени должны будут создать развитую экономику с отрицательными выбросами ПГ для того, чтобы сохранить возможность ограничить потепление 2°C.

Таблица 5

Оценки эмиссии (E), поглощения за счет ЗИЗЛХ (S), захоронения (CCS), а также нетто-эмиссии ($E_{\text{нет}}$) ПГ в 2021 и 2100 гг. в России, развитых и развивающихся странах и мире в целом (Гт CO_{2экв}/год)

Table 5

Estimates of GHG emissions (E), absorption due to LULUCF (S), storage (CCS), and net emissions (E_{net}) of GHGs in 2021 and 2100 in Russia, developed and developing countries and the world (Gt CO_{2eq}/year)

Страна	2021	2050					2075					2100				
	E	E	S^{**}	$E_{\text{ост}}$	CCS	$E_{\text{нет}}$	E	S^{**}	$E_{\text{ост}}$	CCS	$E_{\text{нет}}$	E	S^{**}	$E_{\text{ост}}$	CCS	$E_{\text{нет}}$
Россия [7, 9]	2,3	1,6	0,8	0,8	0,0	0,8	1,4	0,8	0,6	0,2	0,4	0,8	0,8	0,0	0,1	−0,1
Шесть развитых стран [10]	10,3	6,5	1,2	5,3	3,0	2,3	3,5	1,2	2,3	3,5	−1,2	2,0	1,2	0,8	3,5	−2,7
Шесть развивающихся стран*	19,7	17,1	0,8	16,4	1,0	15,4	10,8	1,5	9,3	2,5	6,8	5,7	2,0	3,7	3,7	0,0
Прочие страны*	13,7	10,7	0,7	10,0	1,0	9,0	6,7	0,7	6,0	1,3	4,7	3,6	0,7	2,9	2,9	0,0
Мир в целом*	46,1	35,9	3,4	32,5	5,0	27,5	22,4	4,2	18,2	7,5	10,7	12,1	4,7	7,4	10,2	−2,8
STEPS [12]	46,1	37,4	3,4	34,0	0,4	33,6										
APS [12]	46,1	15,2	3,4	11,7	3,7	8,0										

* Оценки настоящей работы.

** Сценарий GEPL1997 [22].

⁷ Official report on CCUS development in China released [online] URL: https://enviliance.com/regions/east-asia/cn/report_3908. Accessed September 19, 2024.

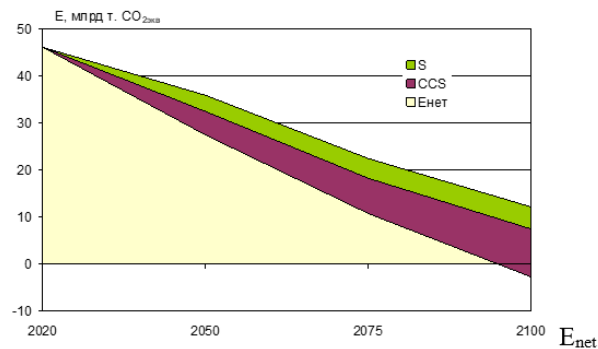


Рис. 12. Динамика мировых валовых выбросов ПГ (без ЗИЗЛХ) (E), нетто-сток за счет ЗИЗЛХ (S), объемы захоронения CCS и остаточная эмиссия E_{net} по расчетам настоящей работы

Fig. 12. Dynamics of global gross GHG emissions (excluding LULUCF) (E), net flux due to LULUCF (S), CCS storage volumes and residual emission E_{net} according to the calculations of this study

Полученные в настоящей работе оценки выбросов в исследованных странах (рис. 11) на период до 2050 г. близки к сценариям STEPS [13], предполагающим реализацию текущей политики декарбонизации энергетики, что подтверждает плодотворность используемого в настоящей работе подхода. Динамика выбросов ПГ по сценарию APS [13], направленному на реализацию заявленных целей по достижению нулевых нетто-выбросов, предполагает значительно более высокие темпы декарбонизации национальных экономик, не имеющие аналогов в истории.

Также стоит отметить соответствие предложенных в настоящей работе сценариев для Китая, Бразилии и Индии диапазону оценок авторитетного портала анализа климатической политики САТ (рис. 11). В то же время обращают на себя внимание неоправданно завышенные оценки этой организацией будущих выбросов ПГ в Индонезии и Иране (рис. 11), не соответствующие ни текущим трендам, ни прогнозам экспертов [13].

Таким образом, по предложенному в настоящей работе и в [8, 10–11] сценариям мировая эмиссия ПГ к 2050 г. составит 75%, а к 2100 г. — 25% от уровня 2020 г. (рис. 12), что находится примерно посередине между «Парижским» и «Глазго»-сценариями из нашей недавней работы [26]. Как показывают модельные расчеты [26, 27], полная реализация сценария «Глазго» позволяет удерживать среднеглобальную температуру в пределах $1,5^{\circ}\text{C}$ от доиндустриального уровня, в то время как по «Парижскому» сценарию к концу текущего столетия она превышает этот уровень на $2,4^{\circ}\text{C}$. В рамках предложенного в настоящей работе довольно оптимистического сценария повышение температуры составит $1,8^{\circ}\text{C}$, и это означает, что период опасного превышения (the Overshoot) будет весьма продолжительным и займет не менее столетия [27].

Сейчас не должно быть сомнений, что нынешние усилия мирового сообщества по достижению климатической нейтральности к середине столетия обречены на неудачу, но они не напрасны. Несмотря на то, что удержать повышение температуры в пределах $1,5^{\circ}\text{C}$ сейчас уже невозможно, реально и все еще достижимо остаться под потолком в 2°C и максимально сократить время пребывания в опасной запределной зоне. По нашим предварительным оценкам, запределный период продлится более столетия, и в это время центральной задачей мирового сообщества станет адаптация к неизведанным ранее условиям и формирование мировой экономики с отрицательными выбросами ПГ. Основы этой экономики создаются сегодня.

Выводы

1. Все исследованные страны следуют со значительным опозданием относительно графика сокращения эмиссии, и ни одна из них не способна достичь климатической нейтральности в означенные сроки.

2. В различных релевантных сферах человеческой деятельности, характеризующихся значительной инерцией (энергетика, сельское и лесное хозяйство, промышленность), действуют определенные исторические закономерности, которые не позволяют осуществлять желаемые трансформации с произвольными скоростями.

3. Поставленные исследованными странами цели в области охраны климата превосходят исторические возможности этих стран к трансформации экономики даже в условиях нарастающего климатического риска.

4. Потолок условно безопасного потепления в 1,5°C будет неизбежно превышен уже в ближайшее 10 лет, и период опасного превышения продлится более столетия.

5. Акцент усилий мирового сообщества должен постепенно смещаться с митигации на адаптацию к беспрецедентным климатическим условиям на основе проактивных мероприятий.

Благодарности

В работе использованы данные Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК, <https://unfccc.int/>), базы данных для глобальных исследований атмосферы, базы данных по эмиссии парниковых газов Института мировых ресурсов (WRI, <https://www.wri.org/data/climate-watch-cait-country-greenhouse-gas-emissions-data>), Организации ООН по лесному и сельскому хозяйству (FAO, <http://www.fao.org/faostat/en/#data>), Демографической службы ООН (UN, <https://population.un.org/wpp/>), базы данных Экономического прогноза Мирового валютного фонда (МВФ, <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/>), Всемирного института улавливания и захоронения углерода (GCCSI, <https://www.globalccsinstitute.com>), Нефтегазовой климатической инициативы (OGCI, <https://www.ogci.com/ccus/>), портала мониторинга действий по охране климата Climate Action Tracker (CAT, <https://climateactiontracker.org/>).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Schmidt G. Climate models can't explain 2023's huge heat anomaly – we could be in uncharted territory // Nature. 2024. Vol. 627. Art. P. 467. DOI: 10.1038/d41586-024-00816-z

[2] King D. et al. The Overshoot: Crossing the 1.5°C threshold and finding our way back. Cambridge, UK: Climate Crisis Advisory Group, 2023. Режим доступа: https://cdn.prod.website-files.com/660df44c73d9da2a5912020a/6621e7c7661fd29dd2a16d3e_18.%20The%2BOvershoot%2B-digital.pdf (дата обращения: 19.09.2024).

[3] Клименко В.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. Глазго-2021: Трудная дорога к цели в 1,5°C // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 505. № 1. С. 66–72. DOI: 10.31857/S2686740022040046

[4] Клименко В.В., Клименко А.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. Энергетика, демография, климат – есть ли альтернатива отказу от ископаемого органического топлива? // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 506. № 2. С. 66–72. DOI: 10.31857/S2686740022070070

[5] Fragkos P., Soest H.L. van, Schaeffer R., Reedman L., Köberle A.C., Macaluso N., Evangelopoulou S., De Vita A., Sha F., Qimin C., Kejun J., Mathur R., Shekhar S., Dewi R.G., Diego S.H., Oshiro K., Fujimori S., Park C., Safonov G., Iyer G. Energy system transitions and low-carbon pathways in Australia, Brazil, Canada, China, EU-28, India, Indonesia, Japan, Republic of Korea, Russia and the United States // Energy. 2021. Vol. 216. Art. no. 119385. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119385

[6] Das A., Ghosh A. Vision Net Zero: A review of decarbonisation strategies to minimise climate risks of developing countries // Environment, Development and Sustainability. 2023. DOI: 10.1007/s10668-023-03318-6

[7] Клименко А.В., Терешин А.Г., Прун О.Е. Перспективы России в снижении выбросов парниковых газов // Известия РАН. Энергетика. 2023. № 2. С. 3–15. DOI: 10.31857/S0002331023020036

- [8] Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г. Безуглеродная Россия: есть ли шанс достичь углеродной нейтральности к 2060 году? // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2023. Т. 511. С. 67–77. DOI: 10.31857/S2686740023040065
- [9] Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Локтионов О.А. Дорога к климатической нейтральности: через леса под землю // Энергетическая политика. 2023. Т. 185. № 7. С. 8–25.
- [10] Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г. На пути к климатической нейтральности: выстоит ли русский лес против энергетики? // Теплоэнергетика. 2024. № 1. С. 5–20. DOI: 10.56304/S0040363624010053
- [11] Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г. Перспективы достижения углеродной нейтральности экономически развитыми странами // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2024. Т. 517. С. 162–171.
- [12] Statistical Review of World Energy 2023. London: Energy Institute, 2023. 64 p.
- [13] IEA World Energy Outlook 2023. Paris: IEA, 2023. 355 p.
- [14] World Population Prospects 2022. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2022. 52 p.
- [15] World Economic League Table 2024: A world economic league table with forecasts for 190 countries to 2038. London: Centre for Economics and Business Research, 2023. 226 p.
- [16] Daly K., Gedminas T. The Path to 2075 – Slower Global Growth, but Convergence Remains Intact. New York: Goldman Sachs, 2022. 45 p.
- [17] Harris N.L., Gibbs D.A., Baccini A. et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes // Nature Climate Change. 2021. Vol. 11. P. 234–240. DOI: 10.1038/s41558-020-00976-6
- [18] Yu Z., Liu S., Li H. et al. Maximizing carbon sequestration potential in Chinese forests through optimal management // Nature Communications. 2024. Vol. 15. Iss. 1. P. 3154–3166. DOI: 10.1038/s41467-024-47143-5
- [19] Филиппов С.П., Жданев О.В. Возможности использования технологий улавливания и захоронения диоксида углерода при декарбонизации мировой экономики (обзор) // Теплоэнергетика. 2022. № 9. С. 5–21. DOI: 10.56304/S0040363622090016
- [20] Kearns J., Teletzke G., Palmer J., Thomann H., Kheshgi H., Chen Y.-H.H., Paltsev S., Herzog H. Developing a Consistent Database for Regional Geologic CO₂ Storage Capacity Worldwide // Energy Procedia. 2017. Vol. 114. P. 4697–4709. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1603
- [21] Global Status of CCS Report 2023. Scaling up through 2023. Melbourne: Global Carbon Capture and Storage Institute, 2023. 98 p.
- [22] Клименко В.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. Динамика биотических потоков углерода при различных сценариях изменения площади лесов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 462–472. DOI: 10.31857/S0002351520040033
- [23] Debarre R., Gahlot P., Grillet C., Plaisant M. Carbon Capture Utilization and Storage. Towards Net-Zero. FactBook. Kearney Energy Transition Institute, 2021. 166 p.
- [24] Cai B., Li Q., Zhang X. China Status of CO₂ Capture, Utilization and Storage (CCUS) 2021 – China's CCUS Pathway. Chinese Academy for Environmental Planning, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, The Administrative Centre for China's Agenda 21, 2021. 72 p.
- [25] Rao T.J., Pandey K.K. Carbon Capture and Storage (CCS) for India: Bottlenecks and Their Role in Adoption // Future Energy. Green Energy and Technology / ed. by X. Wang. Springer, Cham., 2023. P. 247–254. DOI: 10.1007/978-3-031-33906-6_22
- [26] Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Микушина О.В. Борьба за спасение климата: эйфория планов против холодной реальности // Теплоэнергетика. 2023. № 3. С. 5–19. DOI: 10.56304/S0040363623030013
- [27] Клименко В.В., Клименко А.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. Безуглеродный мир: возможно ли достижение глобальной климатической нейтральности // Теплоэнергетика. 2024. № 12. (в печати)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КЛИМЕНКО Владимир Викторович — главный научный сотрудник, руководитель лаборатории, Национальный исследовательский университет «МЭИ», д-р техн. наук.

E-mail: nilgpe@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1397-1311>

КЛИМЕНКО Александр Викторович — главный научный сотрудник, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», д-р техн. наук.

E-mail: KlimenkoAV@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1376-0864>

ТЕРЕШИН Алексей Германович — ведущий научный сотрудник, Национальный исследовательский университет «МЭИ», д-р техн. наук.

E-mail: TereshinAG@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6864-8792>

МИКУШИНА Ольга Викторовна — старший научный сотрудник, Институт энергетических исследований РАН, канд. техн. наук.

E-mail: MikushinaOV@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1595-1365>

REFERENCES

- [1] **G. Schmidt**, Climate models can't explain 2023's huge heat anomaly — we could be in uncharted territory, *Nature*, 627 (2024) 467. DOI: 10.1038/d41586-024-00816-z
- [2] **D. King et al.**, The Overshoot: Crossing the 1.5°C threshold and finding our way back, Climate Crisis Advisory Group, Cambridge, UK, 2023, https://cdn.prod.website-files.com/660df44c73d9da2a5912020a/6621e7c7661fd29dd2a16d3e_18.%20The%2BOvershoot%2B-digital.pdf. Accessed September 19, 2024.
- [3] **V.V. Klimenko, O.V. Mikushina, A.G. Tereshin**, Glasgow-2021: The Difficult Road to the 1,5°C Goal, *Doklady Physics*, 67 (7) (2022) 215–221. DOI: 10.1134/S1028335822070023
- [4] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, O.V. Mikushina, A.G. Tereshin**, Energy, Demography, Climate — Is There an Alternative to Abandoning Fossil Fuels? *Doklady Physics*, 67 (10) (2022) 433–438. DOI: 10.1134/S102833582210007X
- [5] **P. Fragkos, H.L. van Soest, R. Schaeffer, L. Reedman, A.C. Köberle, N. Macaluso, S. Evangelopoulou, A. De Vita, F. Sha, C. Qimin, J. Kejun, R. Mathur, S. Shekhar, R.G. Dewi, S.H. Diego, K. Oshiro, S. Fujimori, C. Park, G. Safonov, G. Iyer**, Energy system transitions and low-carbon pathways in Australia, Brazil, Canada, China, EU-28, India, Indonesia, Japan, Republic of Korea, Russia and the United States, *Energy*, 216 (2021) 119385. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119385
- [6] **A. Das, A. Ghosh**, Vision Net Zero: A review of decarbonisation strategies to minimise climate risks of developing countries, *Environment, Development and Sustainability*, 2023. DOI: 10.1007/s10668-023-03318-6
- [7] **A.V. Klimenko, A.G. Tereshin, O.E. Prun**, Prospects for Reducing Greenhouse Gas Emissions in Russia, *Izvestiâ Rossiyskoi Akademii nauk SSSR, Énergetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2 (2023) 3–15. DOI: 10.31857/S0002331023020036
- [8] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin**, Carbon-free Russia: Is There a Chance to Achieve Carbon Neutrality by 2060? *Doklady Physics*, 68 (7) (2023) 66–77. DOI: 10.31857/S2686740023040065
- [9] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin, O.A. Loktionov**, The road to climate neutrality: Through the forest underground, *Energeticheskaya Politika* [Energy Policy], 185 (7) (2023) 8–25.

- [10] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin**, Towards Climate Neutrality: Will Russian Forest Stand Against Energy? *Thermal Engineering*, 1 (2024) 5–20. DOI: 10.56304/S0040363624010053
- [11] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin**, Prospects for achieving carbon neutrality by economically developed countries, *Doklady Physics*, 69 (2024) (in press)
- [12] *Statistical Review of World Energy 2023*, Energy Institute, London, 2023.
- [13] *IEA World Energy Outlook 2023*, IEA, Paris, 2023.
- [14] *World Population Prospects 2022*, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York, 2022.
- [15] *World Economic League Table 2024: A world economic league table with forecasts for 190 countries to 2038*, Centre for Economics and Business Research, London, 2023.
- [16] **K. Daly, T. Gedminas**, *The Path to 2075 – Slower Global Growth, but Convergence Remains Intact*, Goldman Sachs, New York, 2022.
- [17] **N.L. Harris, D.A. Gibbs, A. Baccini et al.**, Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes, *Nature Climate Change*, 11 (2021) 234–240. DOI: 10.1038/s41558-020-00976-6
- [18] **Z. Yu, S. Liu, H. Li et al.**, Maximizing carbon sequestration potential in Chinese forests through optimal management, *Nature Communications*, 15 (1) (2024) 3154–3166. DOI: 10.1038/s41467-024-47143-5
- [19] **S.P. Filippov, O.V. Zhdaneev**, Opportunities for the application of carbon dioxide capture and storage technologies in case of global economy decarbonization (review), *Thermal Engineering*, 69 (9) (2022) 637–652. DOI: 10.1134/s0040601522090014
- [20] **J. Kearns, G. Teletzke, J. Palmer, H. Thomann, H. Kheshgi, Y.-H.H. Chen, S. Paltsev, H. Herzog**, Developing a Consistent Database for Regional Geologic CO₂ Storage Capacity Worldwide, *Energy Procedia*, 114 (2017) 4697–4709. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1603
- [21] *Global Status of CCS Report 2023. Scaling up through 2023*, Global Carbon Capture and Storage Institute, Melbourne, 2023.
- [22] **V.V. Klimenko, O.V. Mikushina, A.G. Tereshin**, Dynamics of Biotic Carbon Fluxes under Different Scenarios of Forest Area Changes, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 56 (4) (2020) 405–413. DOI: 10.1134/S0001433820040039
- [23] **R. Debarre, P. Gahlot, C. Grillet, M. Plaisant**, *Carbon Capture Utilization and Storage. Towards Net-Zero*. FactBook. Kearney Energy Transition Institute, 2021.
- [24] **B. Cai, Q. Li, X. Zhang**, *China Status of CO₂ Capture, Utilization and Storage (CCUS) 2021 – China’s CCUS Pathway*, Chinese Academy for Environmental Planning, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, The Administrative Centre for China’s Agenda 21, 2021.
- [25] **T.J. Rao, K.K. Pandey**, Carbon Capture and Storage (CCS) for India: Bottlenecks and Their Role in Adoption, X. Wang (ed.), *Future Energy. Green Energy and Technology*, Springer, Cham., (2023) 247–254. DOI: 10.1007/978-3-031-33906-6_22
- [26] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin, O.V. Mikushina**, Struggle for Climate Rescue: The Euphoria of Plans versus Cold Reality, *Thermal Engineering*, 70 (3) (2023) 161–174. DOI: 10.1134/S0040601523030011
- [27] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin, O.V. Mikushina**, Carbon-Free World: Is It Possible to Achieve Global Climate Neutrality, *Thermal Engineering*, 71 (12) (2024) (in press)

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Vladimir V. KLIMENKO – *National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI).*

E-mail: nilgpe@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1397-1311>

Alexander V. KLIMENKO – *National University of Science and Technology MISIS.*

E-mail: KlimenkoAV@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1376-0864>

Alexei G. TERESHIN – *National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI).*

E-mail: TereshinAG@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6864-8792>

Olga V. MIKUSHINA – *Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences.*

E-mail: MikushinaOV@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1595-1365>

Поступила: 27.08.2024; Одобрена: 20.09.2024; Принята: 21.09.2024.

Submitted: 27.08.2024; Approved: 20.09.2024; Accepted: 21.09.2024.


Металлургия. Материаловедение Metallurgy. Material Science

Научная статья

УДК 621.762

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30303>



М.Я. Зайцева , Д.П. Ерутин,
А.А. Попович, В.Ш. Суфияров

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

 zajtsevamy@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ПОДОГРЕВА ПРИ СЕЛЕКТИВНОМ ЛАЗЕРНОМ ПЛАВЛЕНИИ ХРОМИСТОЙ СТАЛИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния температуры подогрева платформы при селективном лазерном плавлении (СЛП) и термической обработке на микроструктуру, фазовый состав и механические свойства хромистой стали. Была выявлена зависимость пористости компактного материала от плотности энергии селективного лазерного плавления. Микроструктура образцов характеризуется узкими, вытянутыми вдоль направления построения зернами. При печати с подогревом платформы средняя длина зерен увеличивается с 156 до 563 мкм, средняя ширина при этом не изменяется и составляет около 30 мкм. После термической обработки на границах зерен выделились включения, предположительно карбиды типов MC и M₂₃C₆. Дифрактограммы образцов содержат пики, соответствующие объемно-центрированной кубической решетке. Подогрев платформы в процессе СЛП позволил повысить пластичность материала на 6% (с 12 до 18%) при сохранении прочностных свойств. Результаты показали, что применение подогрева платформы и термической обработки позволяют изменять микроструктуру и механические свойства. Материалы статьи были представлены на Международной научно-практической конференции «Перспективные машиностроительные технологии (Advanced Engineering Technologies) AET 2024», проходившей в Санкт-Петербурге 13–17 мая 2024 года.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, аддитивное производство, хромистая сталь, подогрев платформы, термическая обработка.

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

Для цитирования:

Зайцева М.Я., Ерутин Д.П., Попович А.А., Суфияров В.Ш. Влияние подогрева при селективном лазерном плавлении хромистой стали на структуру и свойства // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 3. С. 43–51. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30303>



M.Y. Zaitceva ✉, D.P. Erutin,
A.A. Popovich, V.S. Sufiiarov

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

✉ zajtsevamyayandex.ru

EFFECT OF PRE-HEATING DURING SELECTIVE LASER MELTING OF CHROMIUM STEEL ON STRUCTURE AND PROPERTIES

Abstract. The paper presents the results of investigation of the influence of platform pre-heating temperature during selective laser melting (SLM) and subsequent heat treatment on the microstructure, phase composition and mechanical properties of chromium steel. The dependence of the porosity of the compact material on energy density of SLM was revealed. The microstructure of the samples is characterized by narrow grains elongated along the building orientation. During printing with platform pre-heating, the average length of grains increases from 156 to 563 μm , while the average width stays the same, about 30 μm . After heat treatment, carbides of the MC and M₂₃C₆ types are located at the grain boundaries. X-ray diffraction patterns of the samples contain peaks corresponding to the body-centered cubic lattice. Platform pre-heating during SLM process allowed to increase the ductility of the material by 6% (from 12 to 18%), while maintaining the strength properties. The results showed that the application of platform pre-heating and subsequent heat treatment enables to control the microstructure and mechanical properties. The materials of the article were presented at the International Scientific and Practical Conference “Advanced Engineering Technologies (AET 2024)” held in St. Petersburg on May 13–17, 2024.

Keywords: selective laser melting, additive manufacturing, chromium steel, platform pre-heating, heat treatment.

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:

M.Y. Zaitceva, D.P. Erutin, A.A. Popovich, V.S. Sufiiarov, Effect of pre-heating during selective laser melting of chromium steel on structure and properties, *Global Energy*, 30 (03) (2024) 43–51, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30303>

Введение. Аддитивное производство металлических конструкций уже широко применяется в ряде отраслей, таких как аэрокосмическая, медицинская, судостроительная [1, 2], благодаря ряду потенциальных преимуществ, таких как сокращение расхода материалов и ускорение процесса производства, возможность получения конструкций со сложными и оптимизированными формой и структурой, в том числе функционально-градиентных [3]. На данный момент активно исследуются возможности внедрения методов аддитивного производства в атомную энергетику для создания конструкций для атомных реакторов нового поколения из хромистых ДУО-сталей [4–6].

Селективное лазерное плавление (СЛП) является технологией, относящейся к процессу синтеза на подложке с воздействием лазера. В процессе металлический порошковый слой избирательно расплавляется лазерным лучом согласно сечению заданной 3D-модели [7, 8].

Хромистые стали при производстве СЛП склонны к трещинообразованию и деформациям из-за быстрого охлаждения (103–106 К/с [9]), высоких температур и фазовых переходов, возникающих при 3D-печати, что приводит к образованию термических напряжений [10]. Подогрев

платформы при СЛП в ряде случаев позволяет снизить температурный градиент и уменьшить количество внутренних напряжений, улучшить механические свойства и предотвратить появление трещин [11]. Температура закалки для данной группы сталей составляет 1050–1100°C [12–13]. Температура отпуска, как правило, выбирается выше, чем температура эксплуатации, и обычно составляет 700–740°C.

В данной работе было выполнено исследование влияния подогрева платформы при СЛП и термической обработки на микроструктуру и механические свойства хромистой стали марки ЭП-450.

Материалы и методы исследования

В исследовании использовался порошок стали марки ЭП-450 с химическим составом, представленном в табл. 1. Размер частиц применяемого порошка составил от 22 до 71 мкм.

Таблица 1

Химический состав стали ЭП-450

Table 1

Chemical composition of EP-450 steel

Содержание элементов, масс. %										
C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Ni	V	Nb	Fe
0,12	0,42	0,022	0,008	0,004	12,9	1,44	0,04	0,2	0,41	ост.

Процесс СЛП осуществлялся на установке 3DLAM Mid с системой подогрева до 500°C и лазером с максимальной мощностью 500 Вт. Образцы кубической формы со сторонами 10 мм были использованы для анализа структуры.

Были выполнены эксперименты с варьированием мощности лазера (P), скорости печати (v) и расстояния между проходами (h) в следующих диапазонах: $P = 150–300$ Вт, $v = 500–750$ мм/с, $h = 50–80$ мкм. Толщина слоя (t) составляла 30 мкм. Были получены две группы образцов: без предварительного нагрева и с предварительным нагревом 500°C. Все построения проводились в защитной атмосфере аргона.

Процесс термической обработки проводился в муфельной печи ЛОИП LF-5/13-V2. Режим термической обработки включал в себя выдержку образцов при температуре 1050°C в течение 30 минут, закалку в воду и последующий высокотемпературный отпуск при температуре 720°C в течение 2 часов.

Анализ микроструктуры проводился на сканирующем электронном микроскопе Mira Tescan 3 LMU. Для травления использовался раствор «царской водки» (HNO_3 и HCl в соотношении 3:1). Определение фазового состава образцов выполнялось рентгенофазовым анализом на дифрактометре Bruker D8 Advance. Для анализа было использовано $\text{Cu K}\alpha$ излучение с длиной волны 1,5406 Å.

Пористость оценивалась на полированных микрошлифах с помощью программного обеспечения анализа изображений ImageJ путем вычисления доли пор по отношению ко всей площади изображения. При этом использовалось не менее пяти изображений с оптического микроскопа при 50-кратном увеличении.

Значения плотности энергии СЛП E (Дж/мм³) были рассчитаны по следующей формуле:

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t}, \quad (1)$$

где P — мощность лазера (Вт); v — скорость сканирования (мм/с); h — расстояние между проходами (мм); t — толщина слоя (мм).

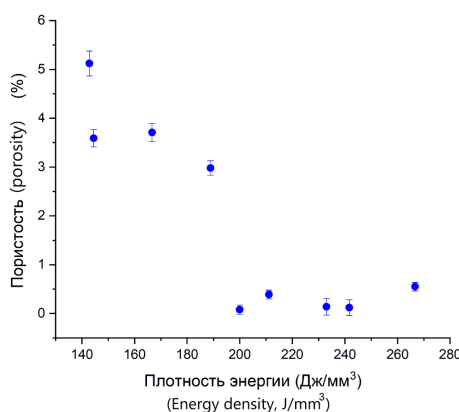


Рис. 1. Изменение пористости образцов от плотности энергии СЛП

Fig. 1. Dependence of sample's porosity on SLM energy density

Испытания на растяжение с целью определения механических характеристик полученных образцов были выполнены с помощью испытательной машины Zwick/Roell Z100 при комнатной температуре. Измерения микротвердости были выполнены по методу Виккерса на твердомере Buehler Micromet 5103.

Результаты исследования

На рис. 1 представлен график зависимости изменения пористости от плотности энергии СЛП. Выявлена тенденция снижения пористости образцов при увеличении плотности энергии СЛП до 240 Дж/мм³. Плотность энергии до 200 Дж/мм³ является недостаточной для расплавления металлического порошка, вследствие чего в зонах примыкания соседних проходов формируются дефекты. Наименьшая пористость образцов была получена при плотности энергии в диапазоне 200–240 Дж/мм³, поскольку при дальнейшем увеличении количества подаваемой энергии ванна расплава перегревается, с чем связаны испарение материала, образование крупных сферических пор, и, следовательно, повышение пористости.

Была проведена оценка внутренней пористости образцов, изготовленных без нагрева платформы. На поверхности ряда образцов в процессе СЛП образовались горизонтальные трещины глубиной около 500 мкм. Применение подогрева платформы (500°C) при печати позволило получить образцы без горизонтальных трещин.

После СЛП микроструктура образцов (рис. 2) состоит из крупных вытянутых вдоль оси построения зерен, окруженных более мелкими зернами (5–10 мкм). Средняя длина зерна составила 156 мкм при печати без подогрева и 563 мкм при печати с подогревом платформы до 500°C, при этом средняя ширина зерен не изменилась и составила около 30 мкм для всех образцов.

При использовании подогрева платформы в процессе СЛП происходит снижение температурного градиента, в этой связи создаются более благоприятные условия для эпитаксиального роста при переходе от одного слоя к другому и формировании вытянутых зерен вдоль направления выращивания.

Из-за быстрых скоростей охлаждения в процессе СЛП выделение карбидов не успевает произойти (рис. 3а). При последующей закалке вследствие выдержки при высоких температурах по границам зерен образовались включения, предположительно карбиды типов MC или M₂₃C₆ (рис. 3б). После закалки и отпуска наблюдаются незначительный рост среднего размера зерна и увеличение количества включений (рис. 3в).

При использовании подогрева платформы требуется меньше теплового воздействия лазера для расплавления порошкового материала, благодаря чему возможно использовать более высокие

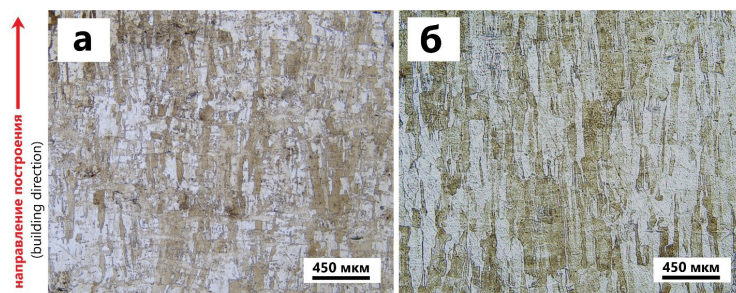


Рис. 2. Микроструктура образцов после СЛП: а) без подогрева; б) с подогревом платформы 500°C
Fig. 2. Microstructure of SLM processed samples: a) without pre-heating; b) with pre-heating at 500°C

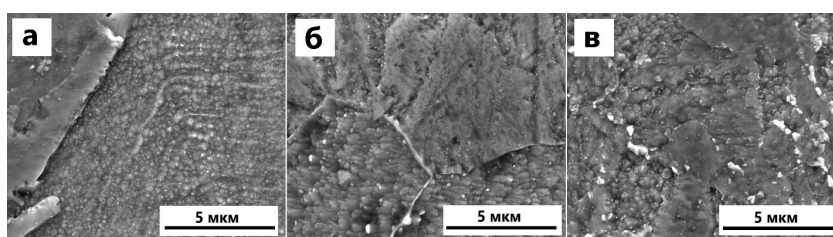


Рис. 3. Микроструктура образцов после СЛП и термической обработки:
а) после печати; б) после закалки; в) после отпуска
Fig. 3. Microstructure of samples after SLM and heat treatment: a) after printing; b) after quenching; c) after tempering

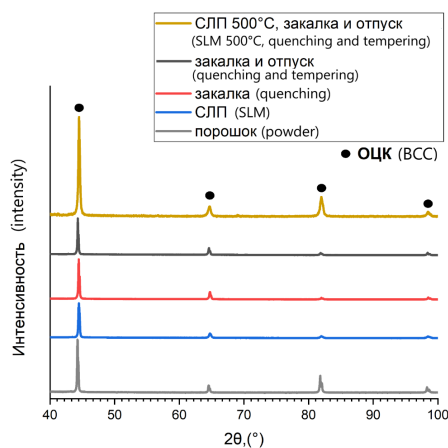


Рис. 4. Дифрактограммы компактных образцов, изготовленных СЛП
Fig. 4. XRD diffraction pattern of bulk samples produced by SLM

скорости сканирования для достижения аналогичной плотности компактного материала [14]. Кроме того, при подогреве платформы ванна расплава становится более стабильной [14].

Анализ дифрактограмм образцов показал, что все образцы имеют одинаковый фазовый состав, содержащий пики, соответствующие ОЦК решетке железа (рис. 4). Выделение карбидных фаз на рентгенограмме зафиксировано не было, ввиду низкого содержания карбидов одного типа и их малого размера (до 300 нм). Явное наличие мартенсита выявлено не было, что может быть связано с относительно небольшим содержанием углерода (0,10–0,15 масс. %) в данной марке стали относительно других сталей ферритно-мартенситного класса.

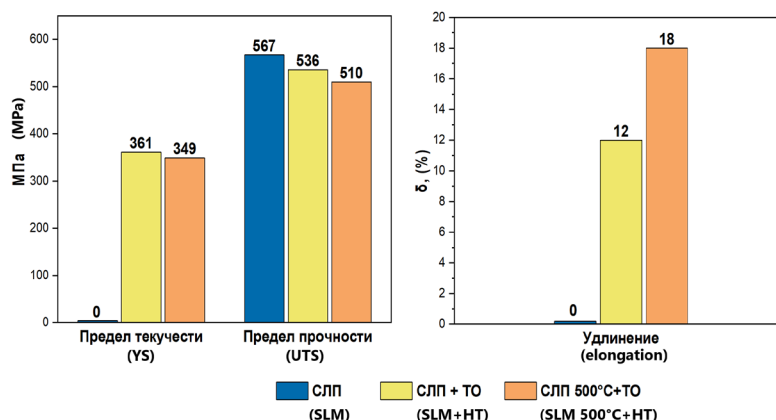


Рис. 5. Механические характеристики образцов

Fig. 5. Mechanical properties of samples

Значения микротвердости после СЛП (378–388 HV) указывают на формирование закаленной структуры в процессе печати. Последующая термическая обработка способствует уменьшению внутренних напряжений и увеличению пластических свойств. После закалки уровень микротвердости сохраняется, после отпуска микротвердость снижается до 357–362 HV. Результаты измерений микротвердости (357–388 HV) соответствуют опубликованным значениям для данной группы материалов [15].

Механические свойства образцов из стали ЭП-450 представлены на рис. 5.

Сравнение механических характеристик полученных образцов показало, что самый высокий уровень прочности (567 МПа) имеют образцы после СЛП без термической обработки, однако пластичность отсутствует. Прочностные свойства термообработанных образцов, полученных без подогрева платформы и при подогреве 500°С, являются близкими по значениям. Применение подогрева платформы 500°С позволило повысить пластичность на 6% (с 12 до 18%). Из полученных результатов можно сделать заключение, что с помощью подогрева платформы и термической обработки возможно управлять получаемыми механическими свойствами.

Заключение

В рамках проведенного исследования были получены данные о структуре, фазовом составе и механических свойствах хромистой стали, полученной методом СЛП. При печати с подогревом платформы 500°С увеличивается средняя длина зерна (с 156 до 563 мкм) и повышается пластичность материала на 6% (с 12 до 18%) при сохранении уровня прочностных свойств.

Применение подогрева платформы и относительно высокой плотности энергии позволило получить компактный материал с пористостью менее 0,5% без поверхностных трещин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Gardner. L. Metal additive manufacturing in structural engineering — review, advances, opportunities and outlook // Structures. 2023. Vol. 47. P. 2178–2193. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.12.039
- [2] Vafadar A., Guzzomi F., Rassau A., Hayward K. Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 3. Art. no. 1213. DOI: 10.3390/app11031213

- [3] **Sufiiarov V., Borisov E., Polozov I.** Investigation of Functional Graded Steel Parts Produced by Selective Laser Melting // *Key Engineering Materials*. 2019. Vol. 822. P. 563–568. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.822.563
- [4] **Sufiiarov V.S., Razumov N.G., Mazeeva A.K. et al.** Modern Methods of Creation and Application of Powder Ferritic/Martensitic ODS Steels // *Metal Science and Heat Treatment*. 2024. Vol. 66. P. 76–86. DOI: 10.1007/s11041-024-01021-5
- [5] **Zhou Y., Yin S., Jiang Y., Zhou Q., Peng J., Yan Y.** Wire and arc additive manufacturing fabrication of ODS-RAFM steels and preliminary evaluation on microstructures and mechanical properties // *Journal of Nuclear Materials*. 2022. Vol. 572. Art. no. 154068. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2022.154068
- [6] **Wang Z., Liu Z., Ma J., Su Y., Deng H., Zhou N., Zhai H., Wu J.** Investigation on microstructure and mechanical properties of electron-beam-welded joint of reduced activation ferritic/martensitic steel fabricated by selective laser melting // *Materials Science and Engineering: A*. 2023. Vol. 881. Art. no. 145333. DOI: 10.1016/j.msea.2023.145333
- [7] **Mansoura A., Omid N., Barka N. et al.** Selective Laser Melting of Stainless Steels: A review of Process, Metals and Microstructure and Properties // *Metals and Materials International*. 2024. Vol. 30. P. 2343–2371. DOI: 10.1007/s12540-024-01650-8
- [8] **Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M.** Additive manufacturing technologies. 3rd ed. Springer Cham, 2021. 675 p. DOI: 10.1007/978-3-030-56127-7
- [9] **Esmailzadeh R., Hamidi-Nasab M., de Formanoir C., Schlenger L., Van Petegem S., Navarre C., Cayron C., Casati N., Grolimund D., Logé R.E.** In-situ selective laser heat treatment for microstructural control of additively manufactured Ti-6Al-4V // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 78. Art. no. 103882. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103882
- [10] **Krakhmalev P., Yadroitsava I., Fredriksson G., Yadroitsev I.** In situ heat treatment in selective laser melted martensitic AISI 420 stainless steels // *Materials & Design*. 2015. Vol. 87. P. 380–385. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.08.045
- [11] **Mertens R., Dadbakhsh S., Van Humbeeck J., Kruth J.-P.** Application of base plate preheating during selective laser melting // *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 74. P. 5–11. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.002
- [12] **Ланская К.А.** Высокохромистые жаропрочные стали. М.: Металлургия, 1976. 216 с.
- [13] **Polekhina N.A., Litovchenko I.Yu., Tyumentsev A.N., Astafurova E.G., Chernov V.M., Leontyeva-Smirnova M.V.** The effect of tempering temperature on the features of phase transformations in the ferritic–martensitic steel EK-181 // *Journal of Nuclear Materials*. 2014. Vol. 455. Iss. 1–3. P. 496–499. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2014.08.012
- [14] **Kempen K., Thijs L., B., Vrancken Buls S., Van Humbeeck J., Kruth J.-P.** Lowering thermal gradients in selective laser melting by pre-heating the baseplate // *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings*. 2013.
- [15] **Khan S., Cheng C.-Q., Cao T.-S. et al.** Microstructure and Corrosion Properties of S400E Sorbite Stainless Steel // *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2022. Vol. 11. P. 649–660. DOI: 10.1007/s13632-022-00863-w

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЗАЙЦЕВА Мария Ярославовна — инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, магистр.

E-mail: zajtsevamyayandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6124-7439>

ЕРУТИН Данил Петрович — инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

E-mail: erutin@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2797-0316>

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>

СУФИЯРОВ Вадим Шамилевич — ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: vadim.spbstu@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1889-4183>

REFERENCES

- [1] **L. Gardner**, Metal additive manufacturing in structural engineering – review, advances, opportunities and outlook, Structures, 47 (2023) 2178–2193. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.12.039
- [2] **A. Vafadar, F. Guzzomi, A. Rassau, K. Hayward**, Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges, Applied Sciences, 11 (3) (2021) 1213. DOI: 10.3390/app11031213
- [3] **V. Sufiiarov, E. Borisov, I. Polozov**, Investigation of Functional Graded Steel Parts Produced by Selective Laser Melting, Key Engineering Materials, 822 (2019) 563–568. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.822.563
- [4] **V.S. Sufiyarov, N.G. Razumov, A.K. Mazeeva et al.**, Modern Methods of Creation and Application of Powder Ferritic/Martensitic ODS Steels, Metal Science and Heat Treatment, 66 (2024) 76–86. DOI: 10.1007/s11041-024-01021-5
- [5] **Y. Zhou, S. Yin, Y. Jiang, Q. Zhou, J. Peng, Y. Yan**, Wire and arc additive manufacturing fabrication of ODS-RAFM steels and preliminary evaluation on microstructures and mechanical properties, Journal of Nuclear Materials, 572 (2022) 154068. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2022.154068
- [6] **Z. Wang, Z. Liu, J. Ma, Y. Su, H. Deng, N. Zhou, H. Zhai, J. Wu**, Investigation on microstructure and mechanical properties of electron-beam-welded joint of reduced activation ferritic/martensitic steel fabricated by selective laser melting, Materials Science and Engineering: A, 881 (2023) 145333. DOI: 10.1016/j.msea.2023.145333
- [7] **A. Mansoura, N. Omid, N. Barka et al.**, Selective Laser Melting of Stainless Steels: A review of Process, Metals and Microstructure and Properties, Metals and Materials International, 30 (2024) 2343–2371. DOI: 10.1007/s12540-024-01650-8
- [8] **I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, M. Khorasani**, Additive manufacturing technologies, 3rd ed., Springer Cham, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-56127-7
- [9] **R. Esmailzadeh, M. Hamidi-Nasab, C. de Formanoir, L. Schlenger, S. Van Petegem, C. Navarre, C. Cayron, N. Casati, D. Grolimund, R.E. Logé**, In-situ selective laser heat treatment for microstructural control of additively manufactured Ti-6Al-4V, Additive Manufacturing, 78 (2023) 103882. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103882
- [10] **P. Krakhmalev, I. Yadroitsava, G. Fredriksson, I. Yadroitsev**, In situ heat treatment in selective laser melted martensitic AISI 420 stainless steels, Materials & Design, 87 (2015) 380–385. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.08.045
- [11] **R. Mertens, S. Dadbakhsh, J. Van Humbeeck, J.-P. Kruth**, Application of base plate preheating during selective laser melting, Procedia CIRP, 74 (2018) 5–11. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.002
- [12] **K.A. Lanskaia**, Vysokokhromistye zharoprochnye stali [High chromium heat-resistant steels], Metallurgiya, Moscow, 1976.
- [13] **N.A. Polekhina, I.Yu. Litovchenko, A.N. Tyumentsev, E.G. Astafurova, V.M. Chernov, M.V. Leontyeva-Smirnova**, The effect of tempering temperature on the features of phase transformations in the ferritic–

martensitic steel EK-181, *Journal of Nuclear Materials*, 455(1–3) (2014) 496–499. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2014.08.012

[14] **K. Kempen, L. Thijs, B. Vrancken, S. Bols, J. Van Humbeeck, J.-P. Kruth**, Lowering thermal gradients in selective laser melting by pre-heating the baseplate, *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings*, 2013.

[15] **S. Khan, C.-Q. Cheng, T.-S. Cao et al.**, Microstructure and Corrosion Properties of S400E Sorbite Stainless Steel, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 11 (2022) 649–660. DOI: 10.1007/s13632-022-00863-w

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Maria Y. ZAITCEVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: zajtsevamy@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6124-7439>

Danil P. ERUTIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: erutin@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2797-0316>

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

E-mail: popovicha@mail.ru

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

Vadim S. SUFIIAROV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: vadim.spbstu@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1889-4183>

Поступила: 07.08.2024; Одобрена: 11.09.2024; Принята: 23.09.2024.

Submitted: 07.08.2024; Approved: 11.09.2024; Accepted: 23.09.2024.

Научная статья

УДК 621.791.1

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30304>



А.Д. Микуленко  , Е.В. Панченко,
М.А. Ожегов, А.А. Наумов

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

 mikulenko02@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ЛИСТОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию распределения температурных полей при точечной сварке трением с перемешиванием (ТСТП) алюминиевых листов толщиной 2 мм из АМг5 и В95АТ при помощи компьютерного моделирования. Модель создавалась в программном комплексе для моделирования процессов обработки металлов давлением DEFORM-2D/3D. В результате работы была создана модель процесса ТСТП для алюминиевых сплавов АМг5 и В95АТ, которая была верифицирована по экспериментальным данным измерения температур с помощью термопар. С помощью верифицированной модели было исследовано влияние параметров процесса на температурные поля алюминиевых сплавов. Результаты исследования показали, что основное влияние на повышение температуры при ТСТП оказывает скорость вращения инструмента, а также теплопроводность самого материала. Усложнение геометрии заплечика, в частности нанесение резьбы, дополнительно увеличивает тепловыделение и скачкообразное поведение температуры.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, точечная сварка трением с перемешиванием, алюминиевые сплавы, АМг5, В95АТ1, термоциклы, температурное поле, DEFORM-3D.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда в рамках реализации проекта «Исследование напряженно-деформированного состояния материала при точечной сварке трением с перемешиванием с помощью программно-математического аппарата конечноэлементного 3D-моделирования» (Соглашение №23-29-00842, <https://rscf.ru/project/23-29-00842/>).

Для цитирования:

Микуленко А.Д., Панченко Е.В., Ожегов М.А., Наумов А.А. Аддитивное производство полимерных функциональных ячеистых структур с эффектом памяти формы с использованием FDM-технологии // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 3. С. 52–63. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30304>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30304>

A.D. Mikulenko ✉, E.V. Panchenko,
M.A. Ozhegov, A.A. Naumov

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

✉ mikulenko02@mail.ru

RESEARCH AND MODELING OF THE TEMPERATURE FIELD DURING FRICTION STIR SPOT WELDING OF SHEET ALUMINUM ALLOYS

Abstract. This work is devoted to the study of the distribution of temperature fields during friction stir spot welding (FSSW) of 2 mm thick aluminum sheets made of Al5Mg and V95AT using computer modeling. The model was created in the DEFORM-2D/3D software package for modeling metal forming processes. As a result of the work, a FSSW process model was created for aluminum alloys Al5Mg and V95AT, which was verified using experimental temperature measurement data using thermocouples. Using a verified model, the influence of process parameters on the temperature fields of aluminum alloys was studied. The results of the study showed that the main influence on the temperature increase during FSSW is the rotation speed of the tool, as well as the thermal conductivity of the material itself. The complication of the shoulder geometry, in particular the application of threads, additionally increases heat generation and the abrupt behavior of the temperature.

Keywords: computer modeling, friction stir spot welding, aluminum alloys, Al5Mg, V95AT1, thermal cycles, temperature field, DEFORM-3D.

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-29-00842 “Study of the stress-strain state of the material during friction stir spot welding using the software and mathematical apparatus of finite element 3D modeling”. Available online: <https://rscf.ru/project/23-29-00842/>.

Citation:

A.D. Mikulenko, E.V. Panchenko, M.A. Ozhegov, A.A. Naumov, Research and modeling of the temperature field during friction stir spot welding of sheet aluminum alloys, *Global Energy*, 30 (03) (2024) 52–63, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30304>

Введение. Проблемы при сварке некоторых видов металлов и сплавов приводят к появлению новых технологий соединения. На данный момент перспективным и вызывающим интерес для изучения является процесс сварки трением с перемешиванием (СТП), в том числе процесс точечной сварки трением с перемешиванием (ТСТП).

СТП – это недавно появившаяся технология соединения в твердом состоянии, запатентованная британским институтом сварки (The Welding Institute, TWI) в 1991 году [1]. Впоследствии этот процесс сварки был использован для соединения магниевых [2], титановых [3] и медных сплавов [4], нержавеющей стали [5], сталей [6] и термопластов [7]. Суть данного вида сварки состоит в том, что материалы путем воздействия нерасходуемого вращающегося инструмента на заготовку соединяются не в жидкой фазе (расплавленном металле), а нагреваются за счет сил трения и работы деформации до температур 0,5–0,9 от температуры плавления, тем самым доводятся до пластичного состояния, перемешиваются и при остывании образуют сварное соединение [8].

СТП широко используется в различных областях промышленности для соединения металлов и сплавов, плохо поддающихся традиционным видам сварки [9]. Данный процесс применяют в основном для соединения материалов со сравнительно низкой температурой плавления,

прежде всего алюминиевых сплавов. Помимо шовной ТСП достаточное распространение получило нахлесточное соединение ТСП деталей из сплавов цветных металлов на основе алюминия и меди. Данная технология хорошо зарекомендовала себя в автомобильной промышленности и имеет перспективы развития и в других областях применения [10].

В автомобилестроении одним из распространенных материалов является алюминиевый сплав АМг5, который обладает высокой прочностью, пластичностью и устойчивостью к коррозии [4].

Также интересно изучение ТСП термоупрочненных алюминиевых сплавов, таких как В95АТ, Д16АТ1 и АД35Т1, которые имеют широкое применение в аэрокосмической, автомобильной и судостроительной промышленности и отличаются своими высокими прочностными характеристиками. Основной задачей является получение качественного сварного соединения за счет подбора необходимых параметров процесса ТСП.

Несмотря на кажущуюся простоту, процесс ТСП в действительности сложен. В нем взаимодействуют различные физические явления, контролировать которые можно только подбором параметров ТСП. Однако, поскольку технология еще недостаточно изучена, для этого приходится проводить множество экспериментов, что отнимает время и экономические ресурсы. Поэтому рационально создать численную модель, которая может решить данную проблему. Математическое моделирование в сочетании с другими видами исследований позволяет получить картину физико-механических процессов, протекающих в процессе сварки этого вида. Одной из основных тем исследований в ТСП является оценка температурного поля [11].

Цель работы — определение влияния параметров процесса ТСП на температурные поля в алюминиевых сплавах В95АТ и АМг5 при ТСП с помощью компьютерного моделирования.

Материалы и методика

В данном исследовании использовался термоупрочненный алюминиевый сплав В95АТ1, который плохо соединяется обычными видами сварки. Также был использован один из самых распространенных сплавов алюминия в автомобилестроении — АМг5. Химический состав и механические свойства данных сплавов представлены в табл. 1.

Таблица 1
Химический состав и прочностные характеристики алюминиевых сплавов

Table 1

Chemical composition and strength characteristics of aluminum alloys

Сплав	Содержание химических элементов, масс %								σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti			
АМг5	4,8	0,24	0,25	0,06	0,44	0,03	0,09	0,04	325	167	17
В95АТ1	2,8	0,1	0,15	1,77	0,27	0,12	6,12	0,05	555	502	7

Перед моделированием ТСП был проведен сам процесс ТСП алюминиевых сплавов АМг5 и В95АТ на установке Mates 40P со снятием термоциклов с помощью термопар. Листы имели размер $100 \times 100 \times 2$ мм и соединялись внахлест. Термопары были приварены на расстояниях 15 и 20 мм от центра введения инструмента.

Данные режимов процесса и тип инструмента приведены в табл. 2.

Для последующего моделирования в программе DEFORM-2D/3D для сплавов В95АТ и АМг5 была выбрана реологическая модель Джонсона—Кука (1), параметры которой для каждого материала представлены в табл. 3. После анализа литературных источников наиболее подходящей оказалась именно эта модель [12]. Она была выбрана также потому, что параметры этой модели известны для многих материалов [13].

Таблица 2

Режимы ТСТП

Table 2

FSSW modes

Материал	Вращение инструмента	Усилие сварки, кН	Скорость погружения инструмента, мм/мин	Длина наконечника, мм	Время выдержки, с
АМг5	2000	4	50	2,7	10
	4000	4	85	2,7	10
	8000	4	150	2,7	10
В95АТ1	2000	4	95	2,7	10
	4000	4	95	2,7	10
	8000	4	150	2,7	10

$$\bar{\sigma} = \left[A + B \bar{\epsilon}^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right]. \quad (1)$$

Таблица 3

Параметры модели Джонсона–Кука

Table 3

Johnson–Cook model parameters

Параметр	Материал	
	АМг5	В95АТ
A	218,3	520
B	704,6	420
C	0,001	0,001
n	0,62	0,52
m	0,93	1,61
T _R	20	20
T _M	620	620

Первым шагом было создание геометрических моделей инструментов в программе Solid Works, которые в дальнейшем будут использоваться при моделировании в DEFORM-3D. Инструменты состояли из наконечника и заплечика, без основной части инструмента, это значительно упрощает расчеты, уменьшая время решения одной задачи. Было выбрано три вида различных инструментов:

- 1) основной инструмент, используемый в физическом эксперименте, с плоским заплечиком с диаметром 12 мм и цилиндрическим наконечником диаметром 5 мм и длиной 2,7 мм (рис. 1а);
- 2) инструмент с увеличенным заплечиком с диаметром 16 мм (рис. 1б);
- 3) инструмент с измененной геометрией заплечика (резьбовая поверхность) с диаметром 16 мм (рис. 1в).

Различные виды инструментов были выбраны для того, чтобы проанализировать влияние геометрии инструмента на температурные поля.

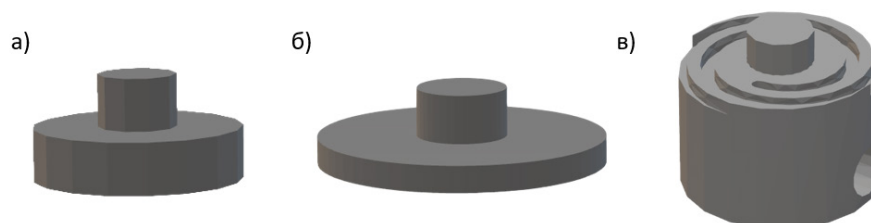


Рис. 1. Геометрия инструментов

Fig. 1. Tool geometry

Геометрия соединяемых пластин в последующих расчетах также была упрощена, две пластины были объединены в одну, а для рационализации времени и точности их размеры были уменьшены с 100×100 мм до 50×50 мм. Толщина каждого листа составляла 2 мм, толщина объединенной пластины — 4 мм. Размер опорной пластины — $200 \times 15 \times 15$ мм.

Следующий шаг заключался в выборе материалов и их свойств в программе для моделирования DEFORM-3D. Материалы подбирались из стандартной базы данных программы. Для B95AT и AMg5 были выбраны зарубежные аналоги Al7075-T6 и DIN-AlMg-Mn соответственно. Чтобы расчеты были более точными, при выборе материала, в том числе реологических свойств, следует учитывать, что при процессе ТСТП сплавы будут подвергаться большим пластическим деформациям при высоких скоростях деформации при повышенных температурах. В данной работе диапазон перечисленных параметров составил: $\varepsilon = 0-5$, $\dot{\varepsilon} = 0-100000 \text{ с}^{-1}$ в температурном интервале $20-650 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Инструмент моделировался как абсолютно жесткое тело, что вполне оправдано, ведь его прочность и твердость намного больше, чем у алюминиевых сплавов. Сетка была разбита на 30000 элементов, что вполне достаточно для детального анализа распределения температуры в соединяемых деталях.

Соединяемые детали определялись как пластичное тело. Однако следует отметить, что такое допущение в модели материала исключает возможность получения остаточных напряжений в заготовке после движения инструмента; как известно, для получения конечного остаточного напряженного состояния в обрабатываемом материале необходимо использовать упруго-пластическую модель материала. В моделировании ТСТП такая возможность не использовалась, поскольку численное моделирование становится нестабильным, с несколькими проблемами сходимости и бессмысленным временем работы процессора. Высокая нелинейность обусловлена частым перестроением сетки, т. е. переносом данных со старой деформированной сетки на новую недеформированную сетку. Заготовка была разбита на 39000 тетрагональных элементов с минимальной длиной ребра элемента 0,7 мм, также было создано «окно плотности сетки» в месте контакта инструмента и пластин для более точных расчетов. Важно было определить основные параметры движения инструмента, а именно: скорости погружения, скорости вращения и времени выдержки. Данные параметров экспериментов представлены в табл. 2.

Граничные условия задавали следующим образом:

- 1) боковые и нижняя грани пластин были жестко закреплены для предотвращения смещения при взаимодействии с инструментом;
- 2) задан контакт между заготовкой и инструментом с коэффициентом теплообмена, равным $5 \text{ Н}/(\text{мм} \cdot \text{с} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C})$;
- 3) задан контакт между заготовкой и опорной пластиной с коэффициентом теплообмена, равным $1 \text{ Н}/(\text{мм} \cdot \text{с} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C})$;



Рис. 2. Графики зависимости температуры от времени АМг5 экспериментально полученной кривой (1) и кривой, полученной при моделировании (2)

Fig. 2. Graphs of temperature versus time Al5Mg of the experimentally obtained curve (1) and the curve obtained by modeling (2)

4) вся поверхность обрабатываемого металла контактировала с окружающей средой, коэффициент конвективного теплообмена задан $20 \text{ Н/ (мм} \cdot \text{с} \cdot \text{С}^\circ)$.

Один из важных шагов при моделировании процесса ТСТП – выбор параметра (показателя) трения. В данном исследовании была выбрана модель трения по Зибелю [14]: $f_k = mk$, где f_k – напряжение трения, МПа; k – предел текучести материала, МПа; m – фактор трения, принят равным 0,7.

Результаты и обсуждение

Первоначально был проведен расчет процесса ТСТП с пластинами АМг5 со скоростью вращения 4000 об/мин с реальными размерами $100 \times 100 \times 2 \text{ мм}$ и $100 \times 100 \times 2 \text{ мм}$, т. е. пластины моделировались как два отдельных тела. Были получены хорошие результаты, однако сам процесс расчета длился более 24 часов, а также останавливался, из-за чего приходилось перезапускать задачу. Поэтому было решено упростить геометрию пластин, сетку и решатель. Сравнение термоциклов снятых экспериментально и рассчитанных в той же точке, что и при эксперименте, представлено на рис. 2. Падение температуры на 3-й секунде связано с малой мощностью программы для расчета данного процесса. Это еще одна из причин изменения параметров процесса.

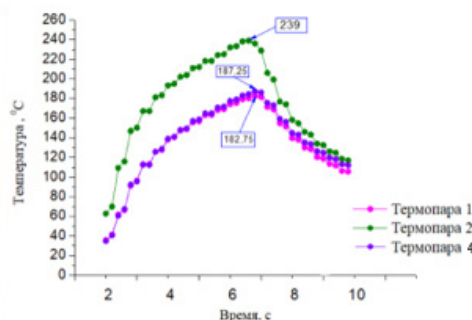
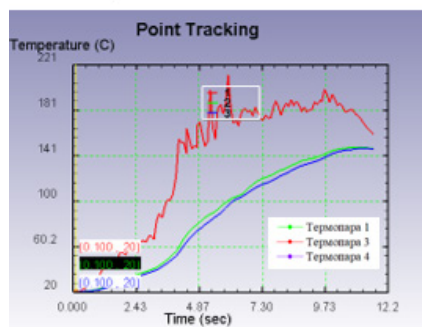
Однако поведение температуры и ее значения до погружения во вторую пластину являются практически идентичными. Поэтому было решено продолжать моделирование с теми же данными контактных взаимодействий, сетки, граничных условий и свойств материалов.

Ниже представлены результаты моделирования процесса ТСТП алюминиевого сплава АМг5 при скоростях вращения 2000, 4000 и 8000 об/мин с упрощенной геометрией, сеткой и решателем (рис. 3, графики слева) и экспериментальные значения температур, снятых с термопар (рис. 3, графики справа).

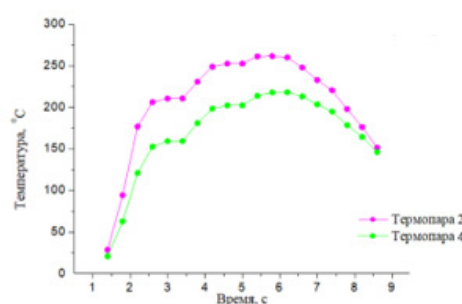
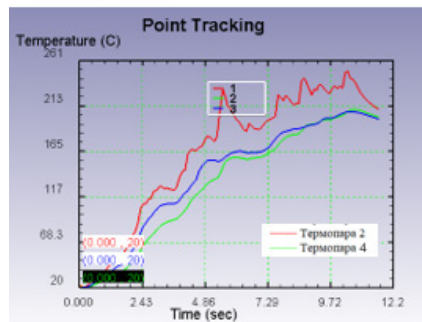
Анализируя данные графики термоциклов, можно сделать вывод, что температуры модели достигают тех же значений, что и при эксперименте с небольшим отклонением. Характер температурных кривых схож, однако на графике слева мы можем видеть резкий скачок температуры, который связан с началом погружения заплечика в материал. Также полученные кривые при моделировании имеют скачкообразный характер при высоких температурах, это связано с недостаточно точной сеткой, а также высокая нелинейность обусловлена частым перестроением сетки, т. е. переносом данных со старой деформированной сетки на новую недеформированную сетку.

Ниже представлены результаты моделирования процесса ТСТП алюминиевого сплава В95АТ при скоростях вращения 2000 и 4000 об/мин с упрощенной геометрией, сеткой и решателем

2000 об/мин



4000 об/мин



8000 об/мин

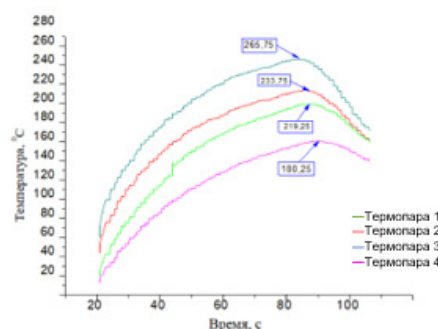
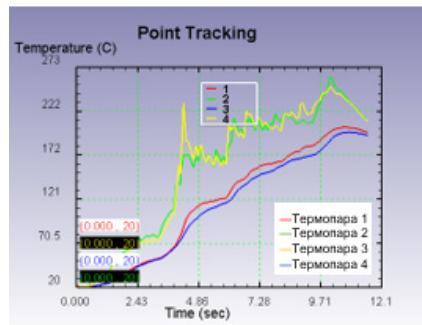


Рис. 3. Зависимость температуры от времени сплава АМг5 при ТСТП, слева — модель, справа — экспериментальные данные

Fig. 3. Dependence of temperature on time of the Al5Mg alloy at FSSW, on the left is the model; on the right is the experimental data

(рис. 4, графики слева) и экспериментальные значения температур, снятых с термопар (рис. 4, графики справа).

Если сравнивать экспериментальные температурные кривые процесса ТСТП АМг5 и В95АТ1, можно увидеть, что у сплава В95АТ1 температуры принимают значения ниже, что мы также можем наблюдать на графике, полученном после моделирования. Основное влияние на снижение температуры оказывает значение теплопроводности, которое у В95АТ1 значительно выше по сравнению с АМг5 [15].

Проанализировав графики сплавов В95АТ и АМг5, можно сделать вывод, что основное влияние на значение температуры оказывает скорость вращения инструмента и теплопроводность сплава. Наибольший рост температуры происходит при погружении заплечика в материал, после этого температура меняется незначительно.

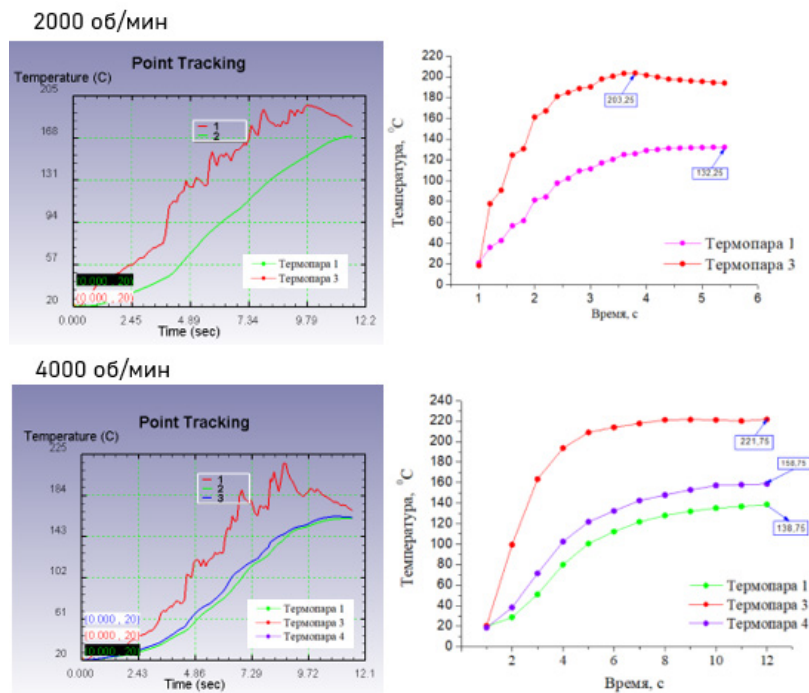


Рис. 4. Зависимость температуры от времени сплава В95АТ при ТСТП, слева — модель, справа — экспериментальные данные

Fig. 4. Dependence of temperature on time of the V95AT alloy at FSSW, on the left is the model; on the right is the experimental data

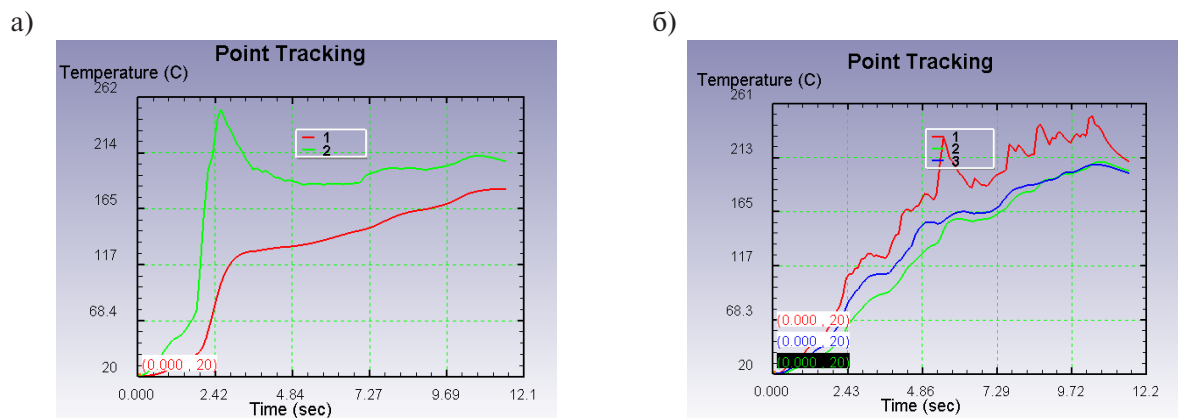


Рис. 5. Зависимость температуры от времени сплава АМг5 при скорости вращения инструмента 4000 об/мин с увеличенным (а) и стандартным (б) заплечиком. Данные после моделирования

Fig. 5. Temperature versus time dependence of the Al5Mg alloy at a tool rotation speed of 4000 rpm with enlarged (a) and standard (b) shoulder. Data after simulation

Также интересно было установить зависимость температурного поля от геометрии инструмента. Для этого был выбран заплечик с большим диаметром, равным 16 мм. Результаты термоциклов представлены на рис. 5.

Максимальная температура в испытании с увеличенным заплечиком стала выше по сравнению со стандартным заплечиком, что логично, так как основной вклад в нагрев материала при

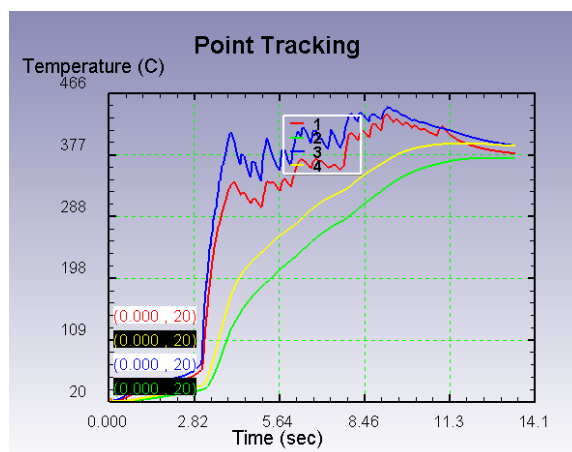


Рис. 6. Зависимость температуры от времени сплава АМг5 при скорости вращения инструмента 4000 об/мин с увеличенным заплечиком с резьбой. Данные после моделирования

Fig. 6. Temperature versus time dependence of Al5Mg alloy at a tool rotation speed of 4000 rpm with an enlarged threaded shoulder. Data after simulation

ТСТП оказывает заплечик. Также поменялся характер кривой — скачок во время погружения заплечика значительно увеличился. Быстрый нагрев металла может отрицательно повлиять на структуру металла и качество соединения. Также большой градиент температур может вызвать нежелательные деформации и напряжения.

При использовании заплечика с резьбой температура увеличилась еще сильнее (рис. 6). Диаметр заплечика совпадал с диаметром увеличенного заплечика (16 мм). Характер кривых схож у инструментов с увеличенным заплечиком, однако температура у заплечика с резьбой увеличилась сильнее.

Заключение

В ходе данной работы была создана универсальная трехмерная модель процесса ТСТП алюминиевых сплавов В95АТ1 и АМг5 с размерами $100 \times 100 \times 2$ мм с использованием инструментов с разной геометрией. Преимуществом модели является возможность прогнозирования термопрочных и нетермоупрочняемых сплавов алюминия. Данная модель является верифицированной по температуре и оптимизирована с точки зрения временных затрат и точности расчета.

Результаты исследования влияния параметров точечной сварки трением с перемешиванием позволяют заключить следующее:

1. Основное влияние на повышение температуры при ТСТП оказывает скорость вращения инструмента, а также теплопроводность самого материала. При увеличении скорости вращения температура повышается. При увеличении теплопроводности материала температура уменьшается, также уменьшается и градиент температур.
2. Показано влияние геометрии на температурные поля. Усложнение геометрии заплечика, в частности нанесение резьбы, дополнительно увеличивает тепловыделение и скачкообразное поведение температуры, что в дальнейшем может отрицательно сказаться на качестве соединения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Thomas W.M., Nicholas E.D. Friction stir welding for the transportation industries, Materials & Design, 18 (4–6) (1997) 269–273. DOI: 10.1016/S0261-3069(97)00062-9

- [2] **Thoppul S.D., Gibson R.F.** Mechanical characterization of spot friction stir welding joints in aluminum alloys by combined experimental/ numerical approaches: Part I: Micromechanical studies, *Materials Characterization*, 60 (11) (2009) 1342–1351. DOI: 10.1016/j.matchar.2009.06.011
- [3] **Котлышев Р.Р.** Механизм образования соединения и особенности технологии сварки алюминиевых сплавов трением с перемешиванием. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2010. 22 с.
- [4] **Chowdhury S.M., Chen D.L., Bhole S.D., Cao X.** Tensile properties of a friction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and weld pitch, *Materials Science and Engineering: A*, 527 (21–22) (2010) 6064–6075. DOI: 10.1016/j.msea.2010.06.012
- [5] **Мальцев М.В.** Металлография промышленных цветных металлов и сплавов: 2-е изд. М.: Изд-во «Металлургия», 1970. 364 с.
- [6] **Schmidt H.B., Hattel J.H.** Thermal modelling of friction stir welding. *Scripta Materialia*, 58(5) (2008) 332–337. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2007.10.008
- [7] **He A., Xie G., Zhang H., Wang X.** A comparative study on Johnson–Cook, modified Johnson–Cook and Arrhenius-type constitutive models to predict the high temperature flow stress in 20CrMo alloy steel, *Materials & Design* (1980–2015), 52 (2013) 677–685. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.06.010
- [8] **Бредников М.А.** Определение реологических свойств алюминиевых сплавов АМг5 и Д16 при высоких скоростях нагружения для математического моделирования сварки трением с перемешиванием: магистерская диссертация: 22.04.01. СПб., 2017. 104 с. Библиогр.: С. 102–104. DOI: 10.18720/SPBPU/2/v17-3364
- [9] **Барсуков В.Г. и др.** Сравнительный анализ моделей взаимосвязи коэффициентов трения Зибеля и Кулона // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: Сб. статей международной научно-технической конференции. Брест: БрГТУ, 2023. С. 65–69.
- [10] **Микуленко А.Д.** Моделирование процесса точечной сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: выпускная квалификационная работа бакалавра: 22.03.01. СПб., 2024. 58 с. Библиогр.: С. 56–58. DOI: 10.18720/SPBPU/3/2024/vr/vr24-5244
- [11] **Chowdhury S.M., Chen D.L., Bhole S.D., Cao X.** Tensile properties of a friction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and weld pitch, *Materials Science and Engineering: A*, 527(21–22) (2010) 6064–6075. DOI: 10.1016/j.msea.2010.06.012
- [11] **Knipling K.E., Fonda R.W.** Texture development in the stir zone of near- α titanium friction stir welds, *Scripta Materialia*, 60 (12) (2009) 1097–1110. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2009.02.050
- [12] **Meran C.** The joint properties of brass plates by friction stir welding, *Materials & Design*, 27 (9) (2006) 719–726. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.05.006
- [13] **Zhu X.K., Chao J.Y.** Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 146 (2) (2004) 263–272. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.10.025
- [14] **Chung Y.D., Fujii H., Ueji R., Tsuji N.** Friction stir welding of high carbon steel with excellent toughness and ductility, *Scripta Materialia*, 63 (2) (2010) 223–226. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2010.03.060
- [15] **Kiss Z., Czirány T.** Microscopic analysis of the morphology of seams in friction stir welded polypropylene, *eXPRESS Polymer Letters*, 6 (1) (2012) 54–62. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2012.6

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МИКУЛЕНКО Анастасия Дмитриевна — лаборант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: mikulenko02@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6178-1179>

ПАНЧЕНКО Евгений Владиславович — инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: panchenko.ev@edu.spbstu.ru

ОЖЕГОВ Михаил Андреевич — старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: ozhmik@yandex.ru

НАУМОВ Антон Алексеевич — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: anton.naumov@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4934-0415>

REFERENCES

- [1] **W.M. Thomas, E.D. Nicholas**, Friction stir welding for the transportation industries, *Materials & Design*, 18 (4–6) (1997) 269–273. DOI: 10.1016/S0261-3069(97)00062-9
- [2] **S.D. Thoppul, R.F. Gibson**, Mechanical characterization of spot friction stir welding joints in aluminum alloys by combined experimental/ numerical approaches: Part I: Micromechanical studies, *Materials Characterization*, 60 (11) (2009) 1342–1351. DOI: 10.1016/j.matchar.2009.06.011
- [3] **R.R. Kotlyshev**, Mekhanizm obrazovaniia soedineniia i osobennosti tekhnologii svarki aliuminievykh splavov treniem s peremeshivaniem. Dis. kand. tekhn. nauk [Mechanism of joint formation and features of friction stir welding technology of aluminum alloys. Cand. Tech. sci. diss.], DGTU, Rostov-na-Donu, 2010.
- [4] **S.M. Chowdhury, D.L. Chen, S.D. Bhole, X. Cao**, Tensile properties of a friction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and weld pitch, *Materials Science and Engineering: A*, 527 (21–22) (2010) 6064–6075. DOI: 10.1016/j.msea.2010.06.012
- [5] **M.V. Mal'tsev**, Metallografiia promyshlennykh tsvetnykh metallov i splavov [Metallography of industrial non-ferrous metals and alloys], 2nd ed., Izd-vo "Metallurgiya", Moscow, 1970.
- [6] **H.B. Schmidt, J.H. Hattel**, Thermal modelling of friction stir welding. *Scripta Materialia*, 58 (5) (2008) 332–337. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2007.10.008
- [7] **A. He, G. Xie, H. Zhang, X. Wang**, A comparative study on Johnson–Cook, modified Johnson–Cook and Arrhenius-type constitutive models to predict the high temperature flow stress in 20CrMo alloy steel, *Materials & Design* (1980–2015), 52 (2013) 677–685. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.06.010
- [8] **M.A. Brednikov**, Opredelenie reologicheskikh svoystv aliuminievykh splavov AMg5 i D16 pri vysokikh skorostiakh nagruzheniia dlia matematicheskogo modelirovaniia svarki treniem s peremeshivaniem. Mag. dis. [Determination of rheological properties of aluminum alloys AMg5 and D16 at high loading rates for mathematical modeling of friction stir welding. Master's diss.], St. Petersburg, 2017. DOI: 10.18720/SPBPU/2/v17-3364
- [9] **V.G. Barsukov et al.**, Sravnitel'nyi analiz modelei vzaimosviasi koeffitsientov treniia Zibel'ia i Kulona [Comparative analysis of the models of the relationship between the Siebel and Coulomb friction coefficients], *Novye tekhnologii i materialy, avtomatizatsiia proizvodstva: Sb. statei mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [New technologies and materials, automation of production: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference], BrGTU, Brest (2023) 65–69.
- [10] **A.D. Mikulenko**, Modelirovanie protsessa tochechnoi svarki treniem s peremeshivaniem aliuminievykh splavov. Vypusknaiia kvalifikatsionnaia rabota bakalavra [Modeling of the process of friction stir spot welding of aluminum alloys. Bachelor's final qualifying work]. St. Petersburg, 2024. DOI: 10.18720/SPBPU/3/2024/vr/vr24-5244

- [11] **S.M. Chowdhury, D.L. Chen, S.D. Bhole, X. Cao**, Tensile properties of a friction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and weld pitch, *Materials Science and Engineering: A*, 527 (21–22) (2010) 6064–6075. DOI: 10.1016/j.msea.2010.06.012
- [11] **K.E. Knipling, R.W. Fonda**, Texture development in the stir zone of near- α titanium friction stir welds, *Scripta Materialia*, 60 (12) (2009) 1097–1110. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2009.02.050
- [12] **C. Meran**, The joint properties of brass plates by friction stir welding, *Materials & Design*, 27 (9) (2006) 719–726. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.05.006
- [13] **X.K. Zhu, J.Y. Chao**, Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 146 (2) (2004) 263–272. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.10.025
- [14] **Y.D. Chung, H. Fujii, R. Ueji, N. Tsuji**, Friction stir welding of high carbon steel with excellent toughness and ductility, *Scripta Materialia*, 63 (2) (2010) 223–226. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2010.03.060
- [15] **Z. Kiss, T. Czígány**, Microscopic analysis of the morphology of seams in friction stir welded polypropylene, *eXPRESS Polymer Letters*, 6 (1) (2012) 54–62. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2012.6

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Anastasia D. MIKULENKO – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: mikulenko02@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6178-1179>

Evgenii V. PANCHENKO – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: panchenko.ev@edu.spbstu.ru

Mikhail A. OZHEGOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: ozhmik@yandex.ru

Anton A. NAUMOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: anton.naumov@spbstu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4934-0415>

Поступила: 13.09.2024; Одобрена: 13.10.2024; Принята: 15.10.2024.
Submitted: 13.09.2024; Approved: 13.10.2024; Accepted: 15.10.2024.

Научная статья

УДК 621.763

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30305>



А.Э. Абдрахманова ✉, А.В. Сотов,
А.И. Зайцев, А.А. Попович

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

✉ abdrahmanova.an@yandex.ru

АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ПОЛИМЕРНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕИСТЫХ СТРУКТУР С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ FDM-ТЕХНОЛОГИИ

Аннотация. В работе исследовано влияние режимов печати FDM-технологии и термообработки отжигом на коэффициенты восстановления к первоначальной форме и фиксации временной формы на образцах из эластичных полимеров с эффектом памяти формы. Эксперименты показали, что для всех исследуемых полимеров наибольшее значение коэффициента восстановления формы достигается с помощью выбора режима печати с верхней границей в интервале температуры экструзии, рекомендованном производителем, и последующего проведения отжига для снятия остаточных напряжений. Результаты проведенных исследований показали наилучшие значения коэффициента восстановления и фиксации формы, равные 98,6% и 94,5% соответственно.

Ключевые слова: аддитивное производство, FDM-технология, термополиуретан, эффект памяти формы, ячеистая структура, восстановление формы, фиксация формы.

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

Для цитирования:

Абдрахманова А.Э., Сотов А.В., Зайцев А.И., Попович А.А. Аддитивное производство полимерных функциональных ячеистых структур с эффектом памяти формы с использованием FDM-технологии // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 3. С. 64–72. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30305>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30305>

A.E. Abdrakhmanova ✉, A.V. Sotov,
A.I. Zaytsev, A.A. Popovich

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

✉ abdrakhmanova.an@yandex.ru

ADDITIVE MANUFACTURING OF POLYMER FUNCTIONAL CELLULAR STRUCTURES WITH SHAPE MEMORY EFFECT USING FDM TECHNOLOGY

Abstract. The paper investigates the effect of printing modes using FDM technology and annealing heat treatment on the ratio of recovery to the original shape and temporary shape fixation on samples made of elastic polymers with shape memory effect. The experiments showed that for all the studied polymers, the optimal recovery ratio is achieved by selecting the printing mode with an upper limit in the extrusion temperature range recommended by the manufacturer and annealing to remove residual stresses. The results of the conducted investigation showed the optimal values of the recovery and shape fixation ratios equal to 98.6% and 94.5%, respectively.

Keywords: additive manufacturing, FDM printing, thermoplastic polyurethane, shape memory effect, cellular structure, shape recovery, shape fixation.

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:

A.E. Abdrakhmanova, A.V. Sotov, A.I. Zaytsev, A.A. Popovich, Additive manufacturing of polymer functional cellular structures with shape memory effect using FDM technology, *Global Energy*, 30 (03) (2024) 64–72, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30305>

Введение. Аддитивное производство изделий из полимерных и металлических материалов в настоящее время уже является реальностью для многих отраслей передового производства. Однако существует сегмент, который считается будущим аддитивного производства, — это передовые или современные материалы. К передовым материалам на полимерной основе относятся полимеры семейства ПАЕК, а также 4D-материалы с ячеистыми структурами и эффектом памяти формы (ЭПФ) [1].

Так, множество термопластичных полимеров можно отнести к классу 4D-материалов за счет быстро настраиваемого ЭПФ, который позволяет изменить конфигурацию изделия под воздействием внешних раздражителей [2]. Ячеистые структуры и класс метаматериалов имеют преимущества для многих применений, открывая новые возможности на стадии проектирования изделий [3–4]. Научно-исследовательские работы мирового уровня признают наиболее перспективными ячеистыми материалами трижды периодические минимальные поверхности (ТПМП). Их относят к классу механических метаматериалов, они обеспечивают улучшение механических свойств из-за уникальной макроструктурной топологии, в то время как традиционные материалы достигают своих свойств благодаря составу материала и способу их обработки. К уникальным исследованным механическим свойствам относят повышенную устойчивость к деформации при растяжении [5], сжатию [6], отрицательный коэффициент Пуассона [7].

На сегодняшний день разработка и совершенствование передовых полимерных материалов возможны за счет совмещения ячеистых структур с заданными свойствами и ЭПФ. Благодаря свободе проектирования в аддитивном производстве появляется все больше информации о 3D-печати сетчатых и ячеистых полимерных конструкций [8], некоторые из них могут быть напечатаны с использованием метода послойного наплавления материала, или FDM-технологии [9–10]. Такая возможность обеспечивает широкий спектр применений, например, для персонализированных медицинских устройств [11]. Применение сетчатых и ячеистых структур при проектировании персональных протезов нижних конечностей позволяет обеспечивать лучшую адаптивность и индивидуализацию для пациента [12], а создание градиента жесткости за счет изменения параметров ячейки дает возможность получить изделие, способное соответствовать гетерогенному строению остаточной конечности [13]. Одними из перспективных материалов с ЭПФ в этой области являются эластичные термополиуретаны (ТПУ) и термопластичный полиэфирный эластомер (ТПЭЭ). Разработка технологии создания сетчатых конструкций с использованием полимеров с ЭПФ и конструкций на их основе является сложной, комплексной, многовариантной задачей, требующей учета большого числа разнообразных факторов. Целью данной работы является исследование влияния режимов печати и постобработки на коэффициенты восстановления и фиксации формы элементарных ромбовидных ячеек двух полимеров ТПУ и ТПЭЭ.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных материалов были выбраны коммерчески доступные в виде филамента для FDM-печати два полимера ТПУ: от компании BASF, Германия, (ТПУ-95A_B) и от компании Filamentarno, Россия (ТПУ-95A_F), а также полимер ТПЭЭ от компании Resc. Дифференциально сканирующая калориметрия (ДСК) (DSC 404F3, Netzsch, Германия) была использована для определения температур фазового перехода между кристаллической и аморфной фазами [14] используемых полимеров для установления температуры активации (T_a) ЭПФ. Исследование проводилось в атмосфере аргона с нагревом от 25 до 300°C для каждого образца массой 15 мг в алюминиевом тигле.

Обратимый фазовый переход при нагреве и охлаждении между кристаллической и аморфной фазами соответствует температуре активации ЭПФ и обеспечивает восстановление и фиксацию формы. По результатам ДСК-анализа для каждого материала была определена температура активации (T_a) ЭПФ (табл. 1).

Таблица 1

Значения температур активации T_a согласно ДСК-анализу

Table 1

Activation temperature values T_a according to DSC analysis

	ТПУ-95A_B	ТПУ-95A_F	ТПЭЭ
Температура активации ЭПФ (T_a), °C	110	111	127

Для исследования характеристик ЭПФ в качестве образцов были разработаны ромбовидные элементарные ячейки с толщиной стенки 1 мм и высотой 28 мм (рис. 1а). Образцы были напечатаны на 3D-принтере компании Picaso (рис. 1б) при установленных параметрах печати: температура платформы 60°C, скорость печати 50 мм/с, высота слоя 0,2 мм.

Исследование ЭПФ заключалось в расчете коэффициентов восстановления и фиксации образцов в состоянии после печати и отжига на специально спроектированной оснастке с нанесенной разметкой.

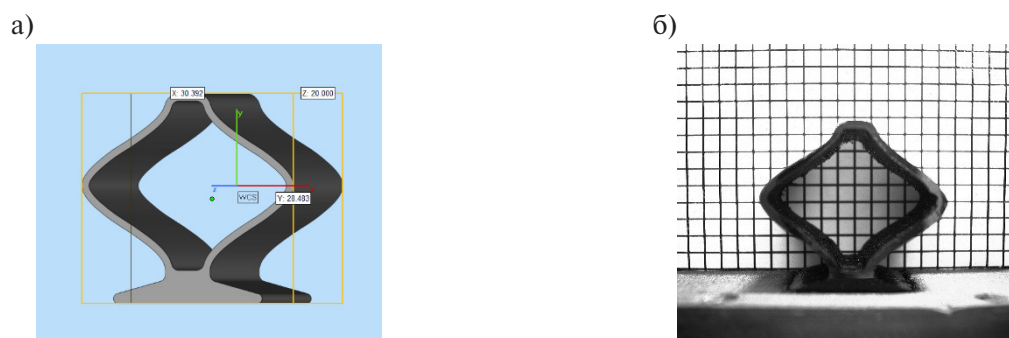


Рис. 1. Элементарная ромбовидная ячейка для исследования ЭПФ: а) CAD-модель; б) напечатанный образец
Fig. 1. Elementary rhomboidal cell for SME study: a) CAD-model; b) printed sample

Отжиг проводился с нагревом и охлаждением в сушильном шкафу и выдержкой один час при температуре $T_a + 10^\circ\text{C}$ для снятия остаточных напряжений в образцах в состоянии после печати. Определение коэффициентов восстановления и фиксации формы полимерных образцов проводилось по фотографиям с использованием ПО ImageJ, где рассчитывалась высота образцов в первоначальной форме и после процесса восстановления. Придание временной формы образцов производилось сжатием путем приложения одинаковой нагрузки к каждому образцу после термического нагрева образцов в лабораторном сушильном шкафу при температуре $T_a + 10^\circ\text{C}$. Затем образцы были охлаждены до комнатной температуры, а после этого были нагреты для процесса восстановления при такой же температуре. Процесс восстановления к первоначальной форме при термическом нагреве был ограничен 10 минутами для каждого образца каждого полимера. При оценке упругой деформации был рассчитан коэффициент фиксации временной формы как соотношение высоты образца сразу после снятия нагрузки и после выдержки образца 10 минут. Расчеты для каждого из образцов происходили согласно формулам (1) и (2). Для каждого материала было выбрано три режима печати при разных температурах экструзии в интервале температур, рекомендованном производителями филаментов. Каждый температурный режим был исследован при наличии термообработки и без нее. (табл. 2).

$$K_v = \frac{H_2 * 100\%}{H_1}, \quad (1)$$

где K_v — коэффициент восстановления, H_1 — высота образца в первоначальной форме, H_2 — высота образца после восстановления из временной формы в первоначальную.

$$K_f = 100 - \left(\left(\frac{H_2 * 100\%}{H_1} - 100 \right) \right), \quad (2)$$

где K_f — коэффициент фиксации, H_1 — высота образца в первоначальной форме, H_2 — высота образца после восстановления из временной формы в первоначальную.

Результаты и обсуждение

В рамках анализа литературы было выделено два типа полимерных материалов, перспективных в области протезирования для создания ячейистой структуры. По технологии FDM из каждого полимера были напечатаны элементарные ромбовидные ячейки высотой 28 мм и толщиной стенки 1 мм для исследования ЭПФ в зависимости от режима печати и проведения термообработки отжигом. Результаты измерений коэффициентов восстановления из временной формы

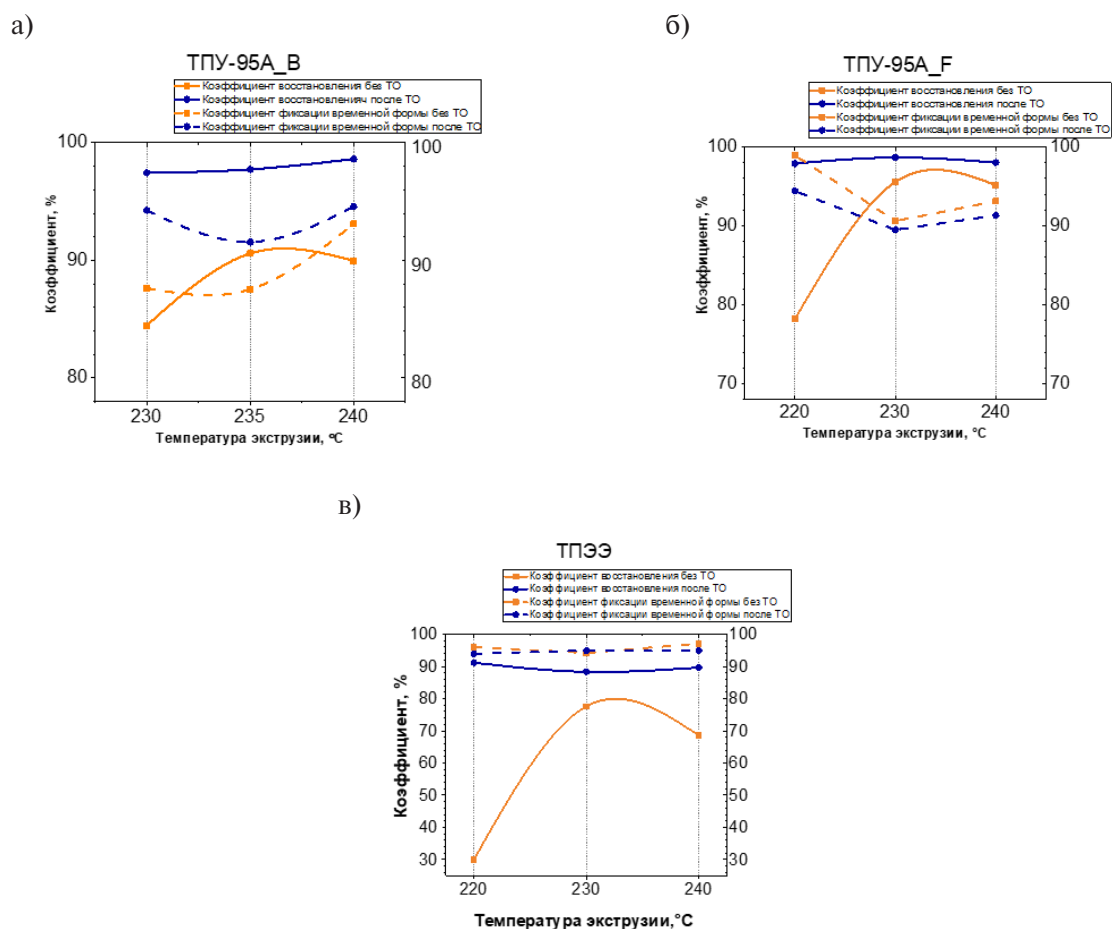


Рис. 2. Графики зависимостей K_v и K_f от режимов печати и проведения термообработки отжигом:

а) ТПУ-95А_В; б) ТПУ-95А_Ф; в) ТПЭЭ

Fig. 2. Graphs of K_v and K_f dependences on printing modes and annealing heat treatment:

а) TPU-95A_B; б) TPU-95A_F; в) TPE

Таблица 2

Режимы печати при разной температуре экструзии для ромбовидных ячеек образцов

Table 2

Printing modes at different extrusion temperatures for rhomboidal sample cells

	ТПУ-95А_В	ТПУ-95А_Ф	ТПЭЭ
Режим 1	230	220	220
Режим 2	235	230	230
Режим 3	240	240	240
Режим 4	230 + ТО	220 + ТО	220 + ТО
Режим 5	235 + ТО	230 + ТО	230 + ТО
Режим 6	240 + ТО	240 + ТО	240 + ТО

в первоначальную и коэффициенты фиксации временной формы представлены графически для каждого полимера (рис. 2).

Установлено, что проведение термообработки отжигом значительно увеличивает коэффициент восстановления для каждого исследуемого полимерного материала с ЭПФ и приближается к 100%-ному восстановлению первоначальной формы. Так, для полимеров ТПУ-95A_B, ТПУ-95A_F и ТПЭЭ наилучшие значения коэффициентов восстановления формы с проведением термообработки составили 98,6%, 98,2% и 91,2% при режимах печати 6, 5 и 4 соответственно. Без термообработки значения коэффициентов восстановления формы для полимеров ТПУ-95A_B, ТПУ-95A_F и ТПЭЭ составили 89,9%, 95,5% и 77,5% соответственно. Стоит отметить, что коэффициент фиксации без проведения термообработки для всех режимов печати у полимеров ТПУ-95A_F и ТПЭЭ оказался выше, чем для образцов в состоянии после печати. Такое поведение свидетельствует о наличии остаточных напряжений в структуре после печати. Повышение температуры экструзии для ТПУ двух производителей оказывает влияние на коэффициент восстановления, с повышением температуры коэффициент приближался к значению 100% восстановления формы.

Заключение

В результате исследований влияния режимов печати FDM-технологии и термообработки отжигом на коэффициенты восстановления к первоначальной форме и фиксации временной формы на образцах из эластичных полимеров с ЭПФ установлено, что для всех исследуемых полимеров максимальный коэффициент восстановления достигается путем выбора режима печати с верхней границей в интервале температуры экструзии, рекомендованном производителем, и последующим проведением отжига для снятия остаточных напряжений. Наилучших значений коэффициентов восстановления и фиксации формы для дальнейших исследований и проектирования ячеистой структуры достиг материал ТПУ-95A_B с $K_b = 98,6\%$ и $K_f = 94,5\%$. Эти результаты могут быть использованы в дальнейших исследованиях при разработке ячеистых структур с ЭПФ из эластичных полимеров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Advanced Materials. How cutting edge materials are shaping the future of additive manufacturing. 3D Printing Business Media Ltd., 2020. Режим доступа: <https://www.voxelmatters.com/wp-content/uploads/2020/04/3dpbm-publishes-Advanced-Materials-am-focus-2020-ebook.pdf> (дата обращения: 25.12.2023).
- [2] Ratna D., Karger-Kocsis J. Recent advances in shape memory polymers and composites: a review // Journal of Materials Science. 2008. Vol. 43. P. 254–269. DOI: 10.1007/s10853-007-2176-7
- [3] Grima J., Caruana-Gauci R. Materials that push back // Nature materials. 2012. Vol. 11. Iss. 7. P. 565–566. DOI: 10.1038/nmat3364
- [4] Bai L., Gong C., Chen X., Sun Y., Xin L., Pu H., Luo J. Mechanical properties and energy absorption capabilities of functionally graded lattice structures: Experiments and simulations // International Journal of Mechanical Sciences. 2020. Vol. 182. Art. no. 105735. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105735
- [5] Rafsanjani A., Akbarzadeh A., Pasini D. Snapping mechanical metamaterials under tension // Advanced Materials. 2015. Vol. 27. Iss. 39. P. 5931–5935. DOI: 10.1002/adma.201502809
- [6] Janbaz S., McGuinness M., Zadpoor A.A. Multimaterial control of instability in soft mechanical metamaterials // Physical Review Applied. 2018. Vol. 9. Iss. 6. Art. no. 064013. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.9.064013
- [7] Wang Q., Li Z., Zhang Y., Cui S., Yang Z., Lu Z. Ultra-low density architected metamaterial with superior mechanical properties and energy absorption capability // Composites Part B: Engineering. 2020. Vol. 202. Art. no. 108379. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108379

- [8] Sadeghi F., Baniassadi M., Shahidi A., Baghani M. TPMS metamaterial structures based on shape memory polymers: Mechanical, thermal and thermomechanical assessment // Journal of Materials Research and Technology. 2023. Vol. 23. P. 3726–3743. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.02.014
- [9] Beloshenko V., Beygelzimer Y., Chishko V., Savchenko B., Sova N., Verbylo D., Vozniak I. Mechanical properties of flexible TPU-based 3D printed lattice structures: role of lattice cut direction and architecture // Polymers. 2021. Vol. 13. Iss. 17. Art. no. 2986. DOI: 10.3390/polym13172986
- [10] Mishra A.K., Chavan H., Kumar A. Effect of material variation on the uniaxial compression behavior of FDM manufactured polymeric TPMS lattice materials // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 46. P. 7752–7759. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.276
- [11] Pal A.K., Mohanty A.K., Misra M. Additive manufacturing technology of polymeric materials for customized products: recent developments and future prospective // RSC Advances. 2021. Vol. 11. Iss. 58. P. 36398–36438. DOI: 10.1039/D1RA04060J
- [12] Абдрахманова А.Э., Сотов А.В., Зайцев А.И., Попович А.А. Обзор применения аддитивных технологий в медицине: перспективы функционально-градиентных полимеров в протезировании нижних конечностей // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 4. С. 83–96. DOI: 10.18721/JEST.29405
- [13] Devin K.M., Tang J., Hamilton A.R., Moser D., Jiang L. Assessment of 3D printed mechanical metamaterials for prosthetic liners // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine. 2024. Vol. 238. Iss. 3. P. 348–357. DOI: 10.1177/09544119231225529
- [14] Dayyoub T., Maksimkin A.V., Filippova O.V., Tcherdyntsev V.V., Telyshev D.V. Shape memory polymers as smart materials: a review // Polymers. 2022. Vol. 14. Iss. 17. Art. no. 3511. DOI: 10.3390/polym14173511

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АБДРАХМАНОВА Анна Эдуардовна — инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

E-mail: abdrahmanova.an@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4494-7300>

СОТОВ Антон Владимирович — ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: sotovanton@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7303-5912>

ЗАЙЦЕВ Александр Ильич — инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

E-mail: zaytsev.alexander2011@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3138-8365>

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] Advanced Materials. How cutting edge materials are shaping the future of additive manufacturing. 3D Printing Business Media Ltd., 2020, <https://www.voxelmatters.com/wp-content/uploads/2020/04/3dp-bm-publishes-Advanced-Materials-am-focus-2020-ebook.pdf.pdf>. Accessed December 25, 2023.

- [2] **D. Ratna, J. Karger-Kocsis**, Recent advances in shape memory polymers and composites: a review, *Journal of Materials Science*, 43 (2008) 254–269. DOI: 10.1007/s10853-007-2176-7
- [3] **J. Grima, R. Caruana-Gauci**, Materials that push back, *Nature materials*, 11 (7) (2012) 565–566. DOI: 10.1038/nmat3364
- [4] **L. Bai, C. Gong, X. Chen, Y. Sun, L. Xin, H. Pu, J. Luo**, Mechanical properties and energy absorption capabilities of functionally graded lattice structures: Experiments and simulations, *International Journal of Mechanical Sciences*, 182 (2020) 105735. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105735
- [5] **A. Rafsanjani, A. Akbarzadeh, D. Pasini**, Snapping mechanical metamaterials under tension, *Advanced Materials*, 27 (39) (2015) 5931–5935. DOI: 10.1002/adma.201502809
- [6] **S. Janbaz, M. McGuinness, A.A. Zadpoor**, Multimaterial control of instability in soft mechanical metamaterials, *Physical Review Applied*, 9 (6) (2018) 064013. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.9.064013
- [7] **Q. Wang, Z. Li, Y. Zhang, S. Cui, Z. Yang, Z. Lu**, Ultra-low density architected metamaterial with superior mechanical properties and energy absorption capability, *Composites Part B: Engineering*, 202 (2020) 108379. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108379
- [8] **F. Sadeghi, M. Baniassadi, A. Shahidi, M. Baghani**, TPMS metamaterial structures based on shape memory polymers: Mechanical, thermal and thermomechanical assessment, *Journal of Materials Research and Technology*, 23 (2023) 3726–3743. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.02.014
- [9] **V. Beloshenko, Y. Beygelzimer, V. Chishko, B. Savchenko, N. Sova, D. Verbylo, I. Vozniak**, Mechanical properties of flexible TPU-based 3D printed lattice structures: role of lattice cut direction and architecture, *Polymers*, 13 (17) (2021) 2986. DOI: 10.3390/polym13172986
- [10] **A.K. Mishra, H. Chavan, A. Kumar**, Effect of material variation on the uniaxial compression behavior of FDM manufactured polymeric TPMS lattice materials, *Materials Today: Proceedings*, 46 (2021) 7752–7759. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.276
- [11] **A.K. Pal, A.K. Mohanty, M. Misra**, Additive manufacturing technology of polymeric materials for customized products: recent developments and future prospective, *RSC Advances*, 11 (58) (2021) 36398–36438. DOI: 10.1039/D1RA04060J
- [12] **A.E. Abdrakhmanova, A.V. Sotov, A.I. Zaytsev, A.A. Popovich**, Review of additive manufacturing in medical applications: prospects for functionally graded polymers for lower limb prosthetics, *Global Energy*, 29 (04) (2023) 83–96. DOI: 10.18721/JEST.29405
- [13] **K.M. Devin, J. Tang, A.R. Hamilton, D. Moser, L. Jiang**, Assessment of 3D printed mechanical metamaterials for prosthetic liners, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 238 (3) (2024) 348–357. DOI: 10.1177/09544119231225529
- [14] **T. Dayyoub, A.V. Maksimkin, O.V. Filippova, V.V. Tcherdyntsev, D.V. Telyshev**, Shape memory polymers as smart materials: a review, *Polymers*, 14 (17) (2022) 3511. DOI: 10.3390/polym14173511

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Anna E. ABDRAKHMANOVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: abdrahmanova.an@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4494-7300>

Anton V. SOTOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: sotovanton@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7303-5912>

Alexander I. ZAYTSEV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: zaytsev.alexander2011@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3138-8365>

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

E-mail: popovicha@mail.ru

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

Поступила: 15.08.2024; Одобрена: 11.09.2024; Принята: 12.09.2024.


Submitted: 15.08.2024; Approved: 11.09.2024; Accepted: 12.09.2024.

Научная статья

УДК 621.785-97

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30306>



Г.Н. Теплухин, В.Г. Теплухин ,
Р.В. Кузнецов, М.М. Радкевич

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

 cornfield@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДА НА ПОЛОЖЕНИЕ МАРТЕНСИТНОЙ ТОЧКИ В СТАЛЯХ, ЛЕГИРОВАННЫХ НИКЕЛЕМ

Аннотация. Остаточный аустенит является очень важной структурной составляющей, особенно в высоколегированных и высокоуглеродистых сталях. При определенном легировании и термической обработке его количество может составлять до 95–98%. Поэтому существенное значение имеет определение температуры начала мартенситного превращения (мартенситной точки) в зависимости от химического состава. В настоящее время однозначного выражения этой зависимости не существует. Исследователи используют многочисленные расчетные модели и экспериментальные данные. В настоящей работе рассмотрена зависимость мартенситной точки от содержания углеродов в сталях, легированных некарбидообразующим элементом – никелем. В работе использован структурный метод определения мартенситной точки с применением высокотемпературной металлографической установки. Показано, что наибольшее влияние на мартенситную точку никель оказывает в низкоуглеродистых сталях. С повышением содержания углерода влияние никеля ослабевает, а для стали 143Н4 мартенситная точка находится даже выше, чем в углеродистой стали с аналогичным содержанием углерода. Установлено, что при высоком содержании углерода даже при быстром охлаждении происходит графитизация, что и следует считать причиной повышения мартенситной точки. Материалы статьи были представлены на Международной научно-практической конференции «Перспективные машиностроительные технологии (Advanced Engineering Technologies) АЕТ 2024», проходившей в Санкт-Петербурге 13–16 мая 2024 года.

Ключевые слова: остаточный аустенит, мартенситная точка, содержание углерода, легированная сталь, высокотемпературная металлография, графитизация.

Для цитирования:

Теплухин Г.Н., Теплухин В.Г., Кузнецов Р.В., Радкевич М.М. Влияние углерода на положение мартенситной точки в сталях, легированных никелем // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 3. С. 73–82. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30306>



G.N. Teplukhin, V.G. Teplukhin ✉, R.V. Kuznetsov, M.M. Radkevich

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

✉ cornfield@yandex.ru

THE EFFECT OF CARBON CONTENT ON THE MARTENSITE START TEMPERATURE IN NICKEL-ALLOYED STEELS

Abstract. Retained austenite is a very important structural component, especially in high-alloy and high-carbon steels. With certain alloying and heat treatment, its amount can be up to 95–98%. Therefore, it is essential to determine the start temperature of the martensitic transformation (martensite point) depending on the chemical composition. At present, there is no definite expression for this dependence. Researchers use numerous calculation models and experimental data. In this paper, the dependence of the martensite point on the carbon content in steels alloyed with a non-carbide-forming element – nickel – is considered. The work uses a structural method for determining the martensite point using a high-temperature metallographic unit. Actually, nickel has the greatest effect on the martensite point in low-carbon steels. With an increase in the carbon content, the effect of nickel weakens, and for steel 143N4, the martensite point is even higher than in carbon steel with a similar carbon content. It was found that at high carbon content, even while rapid cooling, graphitization occurs. It should be considered the reason for the increase in the martensite point. The materials of the article were presented at the International Scientific and Practical Conference “Advanced Engineering Technologies (AET 2024)” held in St. Petersburg on May 13–16, 2024.

Keywords: retained austenite, martensite point, carbon content, alloy steel, high-temperature metallography, graphitization.

Citation:

G.N. Teplukhin, V.G. Teplukhin, R.V. Kuznetsov, M.M. Radkevich, The effect of carbon content on the martensite start temperature in nickel-alloyed steels, *Global Energy*, 30 (03) (2024) 73–82, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30306>

Введение. Остаточный аустенит является одной из важнейших неравновесных структурных составляющих, образующихся в углеродистых и легированных сталях различного состава и оказывающих значительное влияние на свойства и структурную стабильность. Впервые существование остаточного аустенита было обнаружено в углеродистых сталях. В соответствии с классическими представлениями, отраженными в учебнике А.П. Гуляева, который основывался на работах В.Д. Садовского [1], остаточный аустенит сохраняется в структуре стали при закалке тем больше, чем выше содержание углерода при достижении примерно 0,6% вследствие того, что температура окончания мартенситного превращения становится ниже температуры охлаждающей среды. Аналогичные экспериментальные результаты и графики влияния содержания углерода на температуру начала и окончания мартенситного превращения приводятся и в работах современных исследователей [2]. Аналитически была выведена зависимость количества остаточного аустенита от содержания углерода в углеродистых сталях, известная как формула Койстена–Марбюргера, широко используемая с 1959 г. до сих пор [3, 4].

Известно, что образование остаточного аустенита происходит в сталях и с более низким содержанием углерода при наличии легирующих элементов. Задача построения модели влияния

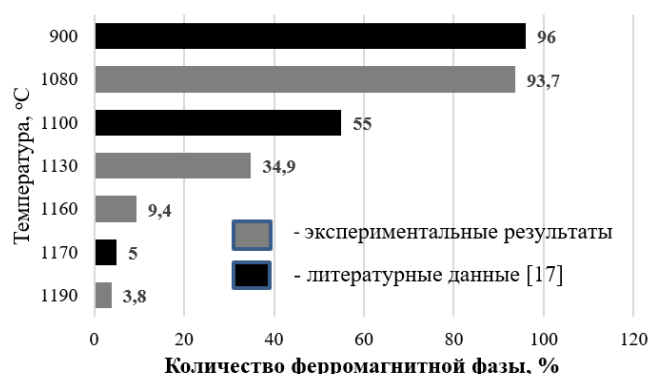


Рис. 1. Влияние температуры закалки на количество мартенсита в стали 95X18

Fig. 1. Effect of quenching temperature on the amount of martensite in 95C18 steel

химического состава стали на температуры начала мартенситного превращения (мартенситной точки) является актуальной начиная с 1940-х годов [5, 6]. Приводится несколько десятков вариантов аналитической зависимости [7]. Однако на основании литературных данных не удастся установить, однозначно ли действуют легирующие элементы на мартенситную точку при различном содержании углерода.

Значительное влияние на количество остаточного аустенита оказывает целый ряд факторов кроме химического состава — скорость охлаждения, размер зерна и состав аустенита при нагреве под закалку [8–10]. Большое внимание уделяется внешним воздействиям, например, влиянию магнитных полей [1, 11, 12]. Но мартенситная точка является наиболее универсальным параметром, определяющим количество остаточного аустенита.

Таким образом, остаточный аустенит может образовываться в сталях совершенно разного назначения и оказывать совершенно разное влияние на механические, технологические и другие свойства. Если для высокоуглеродистых инструментальных сталей логичным является стремление к уменьшению его доли в закаленной стали, то, например, с точки зрения износостойкости присутствие остаточного аустенита в структуре играет положительную роль [13]. Причем особенно важным его влияние на свойства становится в высоколегированных сталях [1, 14, 15].

Авторы настоящей работы, так же как и многие исследователи в России и за рубежом [16–18], проводили экспериментальные исследования в отношении возможности снижения мартенситной точки за счет легирования и термической обработки с целью получения максимального количества остаточного аустенита. В работе [18] была получена сходимость экспериментальных данных, полученных по различным методикам (рис. 1).

При анализе результатов работы [3] отчетливо видно, что экспериментальная зависимость мартенситной точки от содержания хрома качественно отличается для сталей с высоким содержанием углерода при содержании хрома более 9% (рис. 2). Снижение мартенситной точки замедляется или даже прекращается.

В настоящей работе поставлена задача проверки монотонности влияния содержания углерода на положение мартенситной точки в легированной стали. Для того чтобы исключить вероятность подавляющего влияния высокой степени легирования и процессов карбидообразования, сконцентрировав внимание на влиянии углерода, была выбрана группа сталей, легированных некарбидообразующим элементом никелем в относительно небольших количествах.

Материал и методы исследований

Для изучения поставленного вопроса производилось определение мартенситной точки в семи сплавах, легированных никелем (3,85–4,06%), различающихся содержанием углерода (табл. 1).

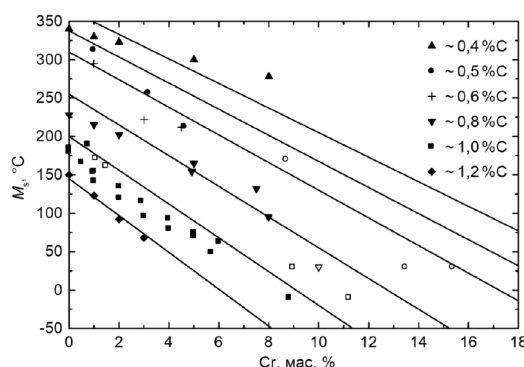


Рис. 2. Мартенситная точка в зависимости от содержания углерода и хрома в аустените [3].
Точки — экспериментальные результаты разных авторов, линии — результаты расчета по формуле
Fig. 2. Martensite point depending on the content of carbon and chromium in austenite [3].
Symbols are experimental results of different authors; lines are the results of calculation according to the equation

Таблица 1

Химический состав исследованных сплавов и температуры мартенситных точек

Table 1

Chemical composition and martensite point temperature of the alloys under study

N п/п	Содержание элементов, %						Температура M _n , °C	Условная марка стали
	C	S	P	Si	Mn	Ni		
1	0,14	0,007	0,016	0,25	0,40	4,0	370	14Н4
2	0,34	0,010	0,016	0,31	0,35	4,0	300	34Н4
3	0,60	0,014	0,008	0,36	0,11	4,09	190	60Н4
4	0,81	0,019	0,012	0,31	0,13	3,90	160	81Н4
5	1,07	0,008	0,020	0,34	0,26	3,85	140	107Н4
6	1,15	0,013	0,010	0,37	0,26	4,06	140	115Н4
7	1,43	0,010	0,016	0,40	0,12	4,05	160	143Н4

Существует ряд методов определения мартенситной точки, в том числе магнитный, dilatометрический, терморентгенографический и термический анализ [19–21]. Сохраняет свои позиции и структурный (металлографический) метод непосредственного наблюдения за поверхностью образца, охлаждаемого в вакууме [22, 23]. В отечественной практике продолжают активно использоваться модернизированные установки типа ИМАШ М.Г. Лозинского [24].

В настоящей работе исследование проводилось на высокотемпературной вакуумной установке типа ИМАШ-5М при остаточном давлении в камере $4 \cdot 10^{-3}$ Па. Испытывались плоские образцы размером $1,5 \times 8 \times 50$ мм. Нагрев осуществлялся пропусканием через образец тока промышленной частоты. Температура измерялась платинородий-платиновой термопарой, приваренной точечной сваркой к боковой поверхности середины образца. Температура аустенитизации образцов для всех сплавов составляла 950°C , при которой осуществлялась 10-минутная выдержка. Затем температура снижалась до 850°C , давалась выдержка продолжительностью 5 минут, по истечении которой фотографировалась микроструктура.

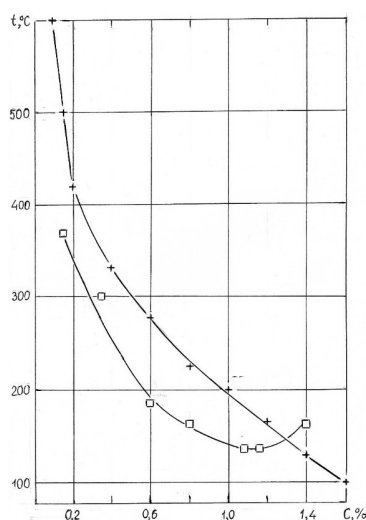


Рис. 3. Температура мартенситной точки в зависимости от содержания углерода. Верхняя кривая — углеродистые стали по литературным данным. Нижняя кривая — легированные никелем стали (результаты экспериментов)

Fig. 3. Martensite point depending on carbon content. The upper curve is carbon steels according to literature data. The lower curve is nickel-alloyed steels (experimental results)

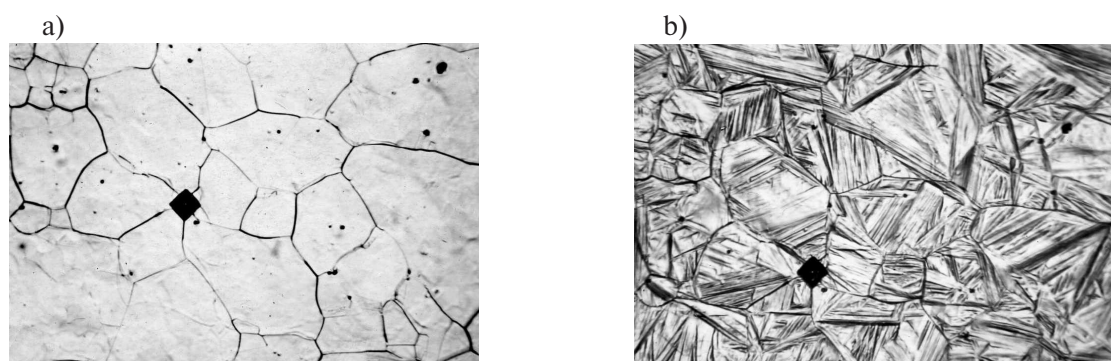


Рис. 4. Начало образования мартенсита (первые иглы) — (а) и конечная структура стали 60N4 — (б)

Fig. 4. The start of martensite transformation (first needles) — (a) and the final structure of 60N4 steel — (b)

Охлаждение образцов производилось от температуры 850°C при выключенном токе путем теплоотвода через медные охлаждаемые электроды. Начало мартенситного превращения определялось при помощи микроскопа МВТ при увеличении 160^x по появлению первых игл мартенсита.

Результаты исследования

Результаты экспериментов представлены в виде графика зависимости температуры мартенситной точки от содержания углерода (рис. 1) в углеродистых сталях (верхняя кривая) и в сталях, легированных 4% никеля (нижняя кривая). Верхняя построена по обобщенным данным различных исследователей; нижняя — по результатам настоящего исследования (табл. 1).

При рассмотрении хода нижней кривой видно, что наибольшее влияние на мартенситную точку никель оказывает в низкоуглеродистых сталях. С повышением содержания углерода влияние никеля ослабевает, а для стали 1,43% углерода мартенситная точка находится даже выше, чем в углеродистой стали с аналогичным содержанием углерода.

Начало мартенситного превращения и конечная структура стали с содержанием углерода 0,60% представлены на рис. 4.

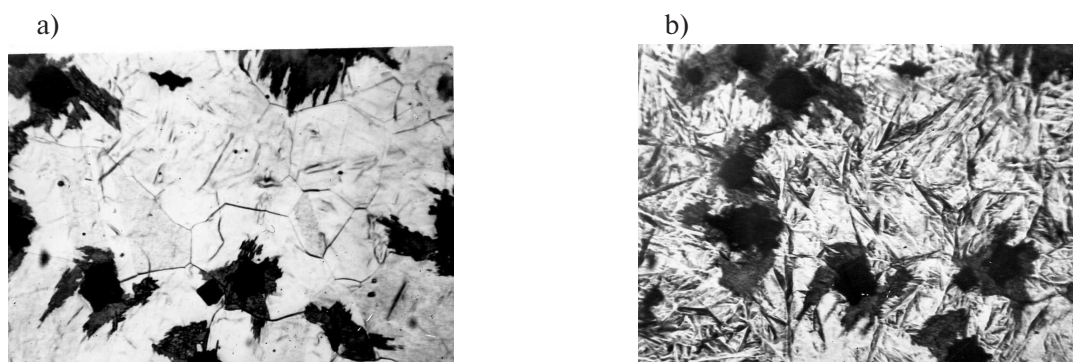


Рис. 5. Начало образования мартенсита (первые иглы) – (а) и конечная структура стали 143Н4 – (б)

Fig. 5. The start of martensite transformation (first needles) – (a) and final structure of 143N4 steel – (b)

Для стали с 1,43% углерода (рис. 5) выявлено, что даже при быстром охлаждении происходит графитизация.

Графитизация приводит к обеднению аустенита углеродом и, как следствие, к повышению мартенситной точки.

Заключение

Анализ влияния никеля на кривую зависимости температуры мартенситной точки от содержания в стали углерода показал, что при различном содержании углерода влияние никеля различно. Оно наиболее значительно при низком содержании углерода и ослабевает с его повышением. Последнее объясняется графитизацией, происходящей перед мартенситным превращением. Таким образом, при определении мартенситной точки нельзя пренебрегать фазовыми превращениями с участием углерода даже в сталях, легированных некарбидообразующими элементами. Для разных диапазонов содержания углерода зависимость различается.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Счастливцев В.М., Калетина Ю.В., Фокина Е.А., Калетин А.Ю. О роли остаточного аустенита в структуре легированных сталей и влиянии на него внешних воздействий // Физика металлов и материаловедение. 2014. Т. 115, № 9. С. 962–976. DOI: 10.7868/S0015323014090101
- [2] Kobasko N., Aronov M., Powell J., Vanas J. Intensive Quenching of Steel Parts: Equipment and Method // Proceedings of the 7th IASME / WSEAS International Conference on Heat Transfer. Thermal Engineering and Environment (HTE '09). WSEAS Press, 2009. P. 153–158. DOI: 10.13140/RG.2.2.17040.56328
- [3] Созыкина А.С., Савушкина Е.С., Окишев К.Ю. Мартенситная точка высокохромистого аустенита // Уральская школа молодых металлургов. Екатеринбург: Издательский Дом «Ажур», 2023. С. 295–298.
- [4] Васильев А.А., Голубков Н.А., Соколов Д.Ф., Соколов С.Ф. Исследование и моделирование кинетики мартенситного превращения в высокопрочных конструкционных сталях // Уральская школа молодых металлургов. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2020. С. 274–277.
- [5] Ingber J., Kunert M. Prediction of the Martensite Start Temperature in High-Carbon Steels // Steel Research International. 2022. Vol. 93. Iss. 5. Art. no. 2100576. DOI: 10.1002/srin.202100576
- [6] Майсурадзе М.В., Рыжков М.А., Сурнаева О.А. Исследование кинетики мартенситного превращения в легированных сталях // Уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2016. Ч. 1. С. 107–111.

[7] Overview of equations for estimating Ms. Режим доступа: https://www.eah-jena.de/fileadmin/user_upload/eah-jena.de/fachbereich/scitec/SciTec-Personen/Kunert_Maik/Predicting_the_Ms_-_Overview_of_Equations.pdf (дата обращения: 25.07.2024).

[8] **Кащенко М.П., Чашина В.Г.** Зависимость температуры начала $\gamma \rightarrow \alpha$ мартенситного превращения от размера зерна // Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13, № 1. С. 37–45.

[9] **Мирзаев Д.А., Созыкин С.А., Маковецкий А.Н., Красноталов А.О., Юсупова Л.И.** Дилатометрическое исследование образования мартенсита и эффектов стабилизации аустенита в высокохромистой трубной стали // Физика металлов и металловедение. 2019. Т. 120, № 8. С. 840–844. DOI: 10.1134/S0015323019060081

[10] **Khalaj O., Saebnoori E., Mašek B., Štadler C., Hassas P., Svoboda J.** The Influence of Cooling Rate between Ms and Mf on the Mechanical Properties of Low Alloy 42SiCr Steel Treated by the Q-P Process // Metals. 2022. Vol. 12. Iss. 12. Art. no. 2081. DOI: 10.3390/met12122081

[11] **Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В., Морозова Ю.Н.** Изменение температуры критических точек сталей при воздействии внешним магнитным полем во время мартенситного превращения // Современные научные исследования и разработки. 2018. Т. 1, № 11 (28). С. 570–573.

[12] **Золотаревский И.В., Щетинина М.О., Золотаревский А.И.** Мартенситное превращение в сильных магнитных полях в сплавах Fe–Ni, легированных хромом, марганцем и углеродом // Физика металлов и металловедение. 2021. Т. 122, № 2. С. 138–144. DOI: 10.31857/S001532302102011X

[13] **Цветкова Г.В., Скотникова М.А., Белов Ю.М., Крылов Н.А., Иванов Е.К.** Структурное и фазовое состояние наплавочных материалов, предназначенных для рабочих лопаток смесителей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2010. Т. 4, № 110. С. 129–137.

[14] **Пышминцев И.Ю., Битюков С.М., Гусев А.А.** Влияние остаточного аустенита на механические свойства стали с 15 % Cr // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2023. Т. 66, № 5. С. 571–579. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-5-571-579

[15] **Dong Y., Qi M., Du Y., Wu H., Gao X., Du L.** Significance of Retained Austenite Stability on Yield Point Elongation Phenomenon in a Hot-Rolled and Intercritically Annealed Medium-Mn Steel // Steel Research International. 2022. Vol. 93. Iss. 11. Art. no. 2200400. DOI: 10.1002/srin.202200400

[16] **Yang J.R., Yu T.H., Wang C.H.** Martensitic transformations in AISI 440C stainless steel // Materials Science and Engineering: A. 2006. Vol. 438–440. P. 276–280. DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.098

[17] **Никифорова С.М., Хадыев М.С., Жилин А.С., Филиппов М.А., Рыжков М.А., Озерец Н.Н.** Новые режимы обработки высокохромистых сталей с высокой износостойкостью для насосов буровых установок // Фундаментальные исследования. 2016. № 10. С. 73–77.

[18] **Teplukhin V.G., Popov A.I., Kudryavtsev V.N., Fomin D.S., Radkevich M.M.** Features of Investigation of Steels with a Metastable Austenitic Structure // Advances in Mechanical Engineering (MMESE 2022) Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2023. P. 164–171. DOI: 10.1007/978-3-031-30027-1_18

[19] **Казанцева Н.В., Степанова Н.Н., Виноградова Н.И., Демаков С.Л., Юровских А.С., Давыдов Д.И., Шишкин Д.А., Ригмант М.Б., Романов Е.П.** Исследование мартенситного превращения в сплаве Co-9 ат. % Al // Физика металлов и металловедение. 2016. Т. 117, № 1. С. 46. DOI: 10.7868/S0015323016010071

[20] **Калетина Ю.В., Герасимов Е.Г., Терентьев П.Б., Калетин А.Ю.** Мартенситное превращение, магнитотранспортные свойства и магнитокалорический эффект в сплавах Ni47-xMn42+xIn11 ($0 \leq x \leq 2$) // Физика твердого тела. 2021. Т. 63, № 4. С. 521–526. DOI: 10.21883/FTT.2021.04.50719.184

[21] **Теплухина И.В., Батасов А.В., Ованесьян К.К., Вологжанина С.А., Гречихина И.А., Анисимова В.В.** Особенности распада аустенита и закономерности формирования структуры в низколегированной стали марки 09Г2СА-А при непрерывном охлаждении // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 1. С. 170–180. DOI: 10.18721/JEST.29110

[22] **García de Andrés C., Bartolomé M.J., Capdevila C., San Martín D., Caballero F.G., López V.** Metallographic techniques for the determination of the austenite grain size in medium-carbon microalloyed steels // Materials Characterization. 2001. Vol. 46. Iss. 5. P. 389–398. DOI: 10.1016/S1044-5803(01)00142-5

[23] Collins J., Taylor M., Scarlett A.L., Palmiere E.J., Pickering E.J. Prior austenite grain measurement: A direct comparison of EBSD reconstruction, thermal etching and chemical etching // Materials Characterization. 2024. Vol. 208. Art. no. 113656. DOI: 10.1016/j.matchar.2024.113656

[24] Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В., Нефедов Д.В. Методика исследования фазовых превращений под действием постоянного магнитного поля на установке для высокотемпературной металлографии // Современные проблемы и направления развития материаловедения и термической обработки металлов и сплавов (СМП-03). Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 125–129.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТЕПЛУХИН Гелий Николаевич — умер 21.07.2021, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.
E-mail: cornfield@yandex.ru

ТЕПЛУХИН Василий Гельевич — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.
E-mail: cornfield@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0535-7899>

КУЗНЕЦОВ Руслан Валерьевич — старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.
E-mail: spaun1605@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5670-8784>

РАДКЕВИЧ Михаил Михайлович — профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.
E-mail: radmich@mail.ru

REFERENCES

[1] V.M. Schastlivtsev, Y.V. Kaletina, E.A. Fokina, A.Y. Kaletin, On the role of retained austenite in the structure of alloyed steels and the effect of external factors, Physics of Metals and Metallography, 115 (9) (2014) 904–917. DOI: 10.1134/S0031918X14090105

[2] N. Kobasko, M. Aronov, J. Powell, J. Vanas, Intensive Quenching of Steel Parts: Equipment and Method, Proceedings of the 7th IASME / WSEAS International Conference on Heat Transfer. Thermal Engineering and Environment (HTE '09), WSEAS Press, (2009) 153–158. DOI: 10.13140/RG.2.2.17040.56328

[3] A.S. Sozykina, E.S. Savushkina, K.Yu. Okishev, Martensitic Point of High Chromium Austenite, Ural School for Young Metal Scientists, Publishing House “Azhur”, Ekaterinburg, (2023) 295–298.

[4] A.A. Vasilev, N.A. Golubkov, D.F. Sokolov, S.F. Sokolov, Investigation and Modeling Kinetics of Martensitic Transformation in High-Strength Structural Steels, Ural School for Young Metal Scientists, Ural University Press, Ekaterinburg, (2020) 274–277.

[5] J. Ingber, M. Kunert, Prediction of the Martensite Start Temperature in High-Carbon Steels, Steel Research International, 93 (5) (2022) 2100576. DOI: 10.1002/srin.202100576

[6] M.V. Maysuradze, M.A. Ryzhkov, O.A. Surnaeva, Investigation of Martensite Transformation Kinetics in Alloyed Steels, Ural School for Young Metal Scientists, Ural University Press, Ekaterinburg, 1 (2016) 107–111.

[7] Overview of equations for estimating Ms, https://www.eah-jena.de/fileadmin/user_upload/eah-jena.de/fachbereich/scitec/SciTec-Personen/Kunert_Maik/Predicting_the_Ms_-_Overview_of_Equations.pdf. Accessed July 25, 2024)

- [8] **M.P. Kashchenko, V.G. Chashchina**, Grain Size Dependence of the $\gamma \rightarrow \alpha$ Martensite Transformation Starting Temperature, *Physical Mesomechanics*, 13 (1) (2010) 37–45.
- [9] **D.A. Mirzaev, S.A. Sozykin, A.O. Krasnotalov, A.N. Makovetskii, L.I. Yusupova**, Dilatometric Study of the Formation of Martensite and of the Effects of Stabilization of Austenite in High-Chromium Pipe Steel, *Physics of Metals and Metallography*, 120 (8) (2019) 770–774. DOI: 10.1134/S0031918X19060085
- [10] **O. Khalaj, E. Saebnoori, B. Mašek, C. Štadler, P. Hassas, J. Svoboda**, The Influence of Cooling Rate between Ms and Mf on the Mechanical Properties of Low Alloy 42SiCr Steel Treated by the Q-P Process, *Metals*, 12 (12) (2022) 2081. DOI: 10.3390/met12122081
- [11] **V.N. Pustovoi, Y.V. Dolgachev, Y.N. Morozova**, Temperature change of critical points of steel when exposed to an external magnetic field during martensitic transformation, *Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki [Actual Science Research and Development]*, 1 (11 (28)) (2018) 570–573.
- [12] **I.V. Zolotarevsky, M.O. Schetinina, O.I. Zolotarevsky**, Martensitic Transformation in Fe–Ni Alloys with Addition of Chromium, Manganese, and Carbon in High Magnetic Fields, *Physics of Metals and Metallography*, 122 (2) (2021) 127–133. DOI: 10.1134/S0031918X21020113
- [13] **G.V. Tsvetkova, M.A. Skotnikova, Y.M. Belov, N.A. Krylov, E.K. Ivanov**, Structural and phase condition facing materials intended for workers blades amalgamators, *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology*, 4 (110) (2010) 129–137.
- [14] **I.Yu. Pyshmintsev, S.M. Bitukov, A.A. Gusev**, Effect of Retained Austenite on Mechanical Properties of Steel with 15 % Cr, *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 66 (5) (2023) 571–579. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-5-571-579
- [15] **Y. Dong, M. Qi, Y. Du, H. Wu, X. Gao, L. Du**, Significance of Retained Austenite Stability on Yield Point Elongation Phenomenon in a Hot-Rolled and Intercritically Annealed Medium-Mn Steel, *Steel Research International*, 93 (11) (2022) 2200400. DOI: 10.1002/srin.202200400
- [16] **J.R. Yang, T.H. Yu, C.H. Wang**, Martensitic transformations in AISI 440C stainless steel, *Materials Science and Engineering: A*, 438–440 (2006) 276–280. DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.098
- [17] **S.M. Nikiforova, M.S. Khadyev, A.S. Zhilin, M.A. Filippov, M.A. Ryzhkov, N.N. Ozerets**, New modes of heat treatment of high-chromium steels with high wear resistance for pumps, *Fundamental research*, 10 (2016) 73–77.
- [18] **V.G. Teplukhin, A.I. Popov, V.N. Kudryavtsev, D.S. Fomin, M.M. Radkevich**, Features of Investigation of Steels with a Metastable Austenitic Structure, *Advances in Mechanical Engineering (MMESE 2022) Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham, (2023) 164–171. DOI: 10.1007/978-3-031-30027-1_18
- [19] **N.V. Kazantseva, N.N. Stepanova, N.I. Vinogradova, S.L. Demakov, A.S. Yurovskikh, D.I. Davydov, D.A. Shishkin, M.B. Rigmant, E.P. Romanov**, Study of the martensitic transformation in the Co–9 at % Al alloy, *Physics of Metals and Metallography*, 117 (1) (2016) 42–48. DOI: 10.1134/S0031918X16010075
- [20] **Y.V. Kaletina, E.G. Gerasimov, P.B. Terent'ev et al.**, Martensitic Transformation, Magnetotransport Properties, and Magnetocaloric Effect in Ni47-xMn42+xIn11 Alloys ($0 \leq x \leq 2$), *Physics of the Solid State*, 63 (4) (2021) 550–555. DOI: 10.1134/S1063783421040090
- [21] **I.V. Teplukhina, A.V. Batasov, K.K. Ovanesyan et al.**, Features of austenite decay and patterns of structure formation in low-alloy steel grade 09G2SA-A under continuous cooling, *Global Energy*, 29 (1) (2023) 170–180. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29110>
- [22] **C. García de Andrés, M.J. Bartolomé, C. Capdevila, D. San Martín, F.G. Caballero, V. López**, Metallographic techniques for the determination of the austenite grain size in medium-carbon microalloyed steels, *Materials Characterization*, 46 (5) (2001) 389–398. DOI: 10.1016/S1044-5803(01)00142-5
- [23] **J. Collins, M. Taylor, A.L. Scarlett, E.J. Palmiere, E.J. Pickering**, Prior austenite grain measurement: A direct comparison of EBSD reconstruction, thermal etching and chemical etching, *Materials Characterization*, 208 (2024) 113656. DOI: 10.1016/j.matchar.2024.113656
- [24] **V.N. Pustovoi, Yu.V. Dolgachev, D.V. Nefedov**, Method of Investigation of Phase Transformations under the Action of a Constant Magnetic Field on a High-Temperature Metallography Unit, *Modern problems*

and directions of development of metal science and heat treatment of metals and alloys, Southwestern State University, Kursk, (2022) 125–129.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Gelii N. TEPLUKHIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: cornfield@yandex.ru

Vasilii G. TEPLUKHIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: cornfield@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0535-7899>

Ruslan V. KUZNETSOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: spaun1605@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5670-8784>

Mikhail M. RADKEVICH – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: radmich@mail.ru

Поступила: 19.08.2024; Одобрена: 12.09.2024; Принята: 17.09.2024.
Submitted: 19.08.2024; Approved: 12.09.2024; Accepted: 17.09.2024.

Научная статья

УДК 621.762

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30307>



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 СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ И МИКРОСТРУКТУРЫ В ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ

Аннотация. В данной работе исследовано влияние различных параметров процесса селективного лазерного плавления (СЛП) на формирование дефектов и микроструктуры в жаропрочных никелевых сплавах. Экспериментальные образцы были изготовлены с использованием установки «ВПЛС Меркурий», оснащенной системой индуктивного высокотемпературного подогрева. Путем варьирования энергетических параметров СЛП были получены данные о зависимости линейной плотности энергии от количества и типов возникающих дефектов, таких как макротрещины и микродефекты. Результаты исследования показали, что увеличение линейной плотности энергии способствует значительному снижению дефектов в структуре образцов. На основании проведенного анализа также выявлены особенности формирования микроструктуры и причины возникновения дефектов при различных режимах СЛП. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации параметров процесса и улучшения качества изделий из жаропрочных никелевых сплавов, изготовленных методом аддитивного производства.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, дефекты, направленная структура, жаропрочный никелевый сплав, γ' -фаза.

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

Для цитирования:

Воеводенко Д.В., Стариков К.А., Попович А.А. Исследование влияния параметров селективного лазерного плавления на формирование дефектов и микроструктуры в жаропрочных никелевых сплавах // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 3. С. 83–91. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30307>



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

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

✉ voevodenko.daniil@mail.ru

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF SELECTIVE LASER MELTING PARAMETERS ON THE FORMATION OF DEFECTS AND MICROSTRUCTURE IN NICKEL-BASED SUPERALLOYS

Abstract. The paper investigates the effect of various parameters on the selective laser melting (SLM) process on the formation of defects and microstructure in nickel-based superalloys. Experimental specimens were fabricated using a High-Temperature Layer-by-Layer Laser Synthesis Plant “Mercury” equipped with an inductive high-temperature heating system. By varying the energy parameters of the SLM, data on the dependence of the linear energy density on the number and types of emerging defects, such as macro-cracks and micro-defects, were obtained. The results showed that an increase in linear energy density contributes to a significant reduction of defects in the structure of the samples. Based on the analysis, the features of microstructure formation and the causes of defects at different SLM modes were revealed. The obtained results can be used to optimize the process parameters and improve the quality of products made of nickel-based superalloys manufactured by the additive manufacturing method.

Keywords: selective laser melting, defects, directional structure, nickel-based superalloy, γ' -phase.

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:

D.V. Voevodenko, K.A. Starikov, A.A. Popovich, Research of the influence of selective laser melting parameters on the formation of defects and microstructure in nickel-based superalloys, *Global Energy*, 30 (03) (2024) 83–91, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30307>

Введение. В настоящее время аддитивные технологии приобретают все большее значение как инновационный способ создания сложных и функциональных компонентов. Одним из важнейших направлений развития аддитивных технологий, которому уделяется особое значение, является расширение спектра используемых материалов. По причине того, что аддитивное производство (АП) считается относительно молодым направлением, имеющим существенные технологические различия с классическими технологиями, критически значимо понимание важности разработки новых материалов, подходящих для АП и их возможностей. В связи с этим значительный интерес представляет исследование применения различных методов аддитивных технологий для изготовления деталей из жаропрочных никелевых суперсплавов (ЖНС) со структурами, имеющими строгую направленность [1].

Разработки в области металлургии ЖНС за последнее десятилетие показали значительное улучшение их эксплуатационных характеристик при введении в их химический состав различных элементов, в том числе редкоземельных металлов. Если с момента открытия направленных структур их традиционно получали методами литья, позволяющими формировать ее в осевом градиенте температуры нагревателя [2], то с появлением и развитием АП, все более широкое использование

ЖНС в нем позволяет контролировать направление градиента свойств в структуре. В настоящее время для производства деталей со сложной топологией из ЖНС используются такие методы АП, как селективное лазерное плавление (СЛП), электронно-лучевое плавление (ЭЛП) и лазерная наплавка [3, 4].

Стоит отметить, что ЖНС представляют собой класс материалов, который был специально разработан для обеспечения надежности и эффективности работы деталей и изделий в условиях экстремальных температур и механических нагрузок. Этот класс материалов играет ключевую роль в производстве компонентов газотурбинных двигателей, турбореактивных двигателей, аэрокосмических конструкций и других систем, где жаропрочные свойства материала существенно влияют на общую производительность энергетической установки [5].

В последние годы возрос интерес к исследованиям, посвященным возможности изготовления деталей с направленной структурой из ЖНС методом ЭЛП. Так, в работе [6] был продемонстрирован метод формирования монокристаллической структуры методом селективного электронно-лучевого плавления в никелевых сплавах CMSX-4 и Inconel 718. Эта разработка позволяет говорить о возможности изготовления лопаток турбинных двигателей с направленной и монокристаллической структурой с помощью АП. Актуальность производства лопаток турбинных двигателей с использованием аддитивных методов обусловлена уникальными возможностями АП локального контроля структуры и свойств изготавливаемой детали [6, 7]. Кроме того, эти методы позволяют снизить ограничения на топологию проектируемых и изготавливаемых деталей. Также использование аддитивных методов в производстве лопаток турбинных двигателей с направленной структурой демонстрирует высокую экономическую эффективность при мелкосерийном производстве и сопоставимую экономическую эффективность при крупносерийном производстве по сравнению с традиционной технологией направленного литья [8].

Однако несмотря на растущий интерес к АП, следует отметить, что не все материалы могут быть использованы для изготовления деталей. Использование материалов, разработанных для классических технологий нецелесообразно из-за больших технологических различий, а при попытке использования новых материалов часто возникают трудности, связанные с образованием различных дефектов. В частности, сложности в АП возникают при использовании ЖНС с повышенным содержанием γ' -фазы [9, 10]. В структурах образцов распространено появление трещин из-за образования значительных температурных градиентов при высокоэнергетической лазерной или электронно-лучевой обработке, а также из-за низких значений удлинения материала при разрыве [9–13]. Низкая склонность к сварке, а также сложный химический состав некоторых сплавов могут приводить к образованию дефектов, таких как различные трещины и повышенная пористость. В результате формируется специфическая структура с неравновесными характеристиками. Исследование способов предотвращения возникновения подобных дефектов является критически важным направлением развития АП, которое позволит расширить номенклатуру материалов и обеспечить требуемые свойства в изделиях. Так, например, в ряде работ изучались вопросы образования и уменьшения дефектов [9, 10, 12, 14–17]. В данных исследованиях было установлено, что одной из основных причин образования дефектов в виде трещин является сегрегация компонентов сплава и их осаждение по границам зерен, а также образование усадочных пустот [11, 16]. Для воздействия на получаемую структуру чаще всего пользуются самым эффективным для этого методом – регулированием и изменением различных энергетических параметров процессов послойного синтеза. Эти параметры влияют на распределение напряжений, возникающих при плавлении материала. Возможность перемещения электронного пучка со скоростью до 8000 м/с позволяет осуществлять высокотемпературный нагрев поверхностного слоя до 1000°C при селективном ЭЛП [9, 10, 12, 14, 16, 18], что уменьшает количество микродефектов и трещин. Однако в технологии СЛП достижение аналогичной скорости луча невозможно из-за технологических ограничений системы подвижных зеркал, отклоняющих лазерный луч. Например,

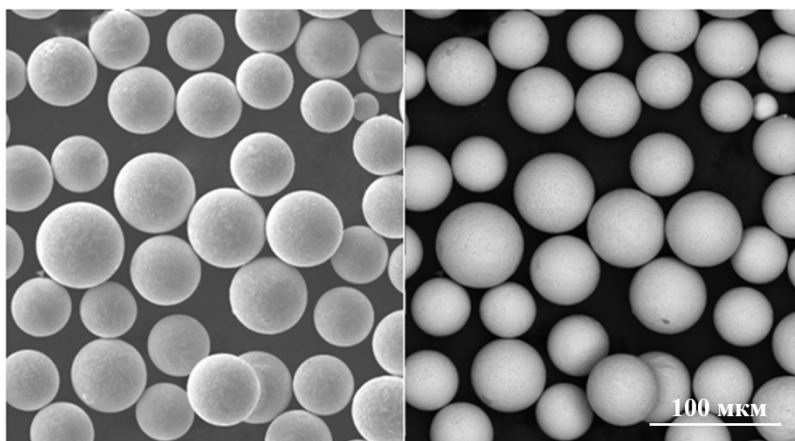


Рис. 1. Частицы порошка несваряемого суперсплава на основе никеля
Fig. 1. Powder particles of non-weldable nickel-based superalloy

в работе [16] проведено исследование возможности снижения количества трещин в сплаве при СЛП путем подбора оптимальных технологических параметров.

Подводя итоги, можно сделать вывод, что получение с помощью СЛП бездефектных деталей из ЖНС, имеющих структурную направленность, является актуальной задачей в области развития АП.

Оборудование

Исследуемые образцы были изготовлены методом СЛП на разработанной в Санкт-Петербургском Политехническом университете совместно с ЗАО «Биоград» (3DLam) установке высокотемпературного послойного лазерного синтеза «ВПЛС Меркурий». Данная установка имеет мультилазерную систему с 1 лазером 500 Вт и 2 по 1000 Вт, габариты рабочей зоны 210 мм по высоте и 120 мм в диаметре, а также подогрев до 1000°C.

При изготовлении экспериментальных образцов процесс проводился в инертной среде из аргона, а содержание кислорода поддерживалось ниже 20 ppm. Чтобы снизить вероятность возникновения температурного градиента при плавлении новых слоев, подложка предварительно была нагрета до 1000°C.

Методы исследования

По завершению процесса послойного синтеза образцы отделяли от подложки и проводили их полировку вдоль направления роста, после чего травили в растворе, содержащем соляную и серную кислоты, а также сульфат меди. Выявление и количественная оценка дефектов, а также изучение структуры проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) «Carl Zeiss Supra 55VP».

Материалы

По результатам проведенного предварительного исследования морфологии порошка с помощью СЭМ можно сделать вывод о том, что, так как частицы порошка сферичны и частиц неокруглой формы не обнаружено, порошок обладает улучшенной текучестью, что благоприятно повлияет на процесс СЛП.

Для исследования влияния параметров СЛП на структуру были изготовлены компактные образцы в виде прямоугольного параллелепипеда со сторонами 8x8 мм и высотой 40 мм. Поскольку ЖНС трудно спекаются из-за образования на поверхности частиц стабильного слоя оксида

Al_2O_3 , работа с данным сплавом при предварительном нагреве имеет решающее значение [11]. Для достижения содержания кислорода в камере менее 20 ppm было установлено непрерывное заполнение рабочей зоны высокочистым газом аргоном.

Энергетические параметры процесса СЛП играют ключевую роль в определении характеристик ванны расплава, включая ее размеры и глубину. Эти параметры также напрямую влияют на температурный градиент в зоне плавления и скорость кристаллизации материала, что, в свою очередь, определяет тип кристаллизационного фронта, формирующегося в процессе остывания и затвердевания материала. Линейная плотность энергии (E_L , Дж/мм) главным образом определяет глубину ванны расплава. Чем выше значения линейной плотности энергии, тем больше глубина проплавления материала при воздействии на него лазерного луча, от которой, в свою очередь, зависят значения температурного градиента и скорости кристаллизации.

Для понимания взаимосвязи между энергетическими параметрами процесса и количеством дефектов были изготовлены образцы по 3 группам параметров с различной линейной плотностью энергии.

Таблица 1

Наборы параметров процесса СЛП при изготовлении компактных образцов

Table 1

Sets of SLM process parameters in the fabrication of compact samples

Группа	P , Вт	S , мм/с	E_L , Дж/мм
1	120–200	2000–3000	0,06
2	120–250	500–1000	0,24
3	120–970	120–900	1,00

Результаты и обсуждение

С помощью оптического микроскопа был проведен анализ полученных компактных образцов, который показал, что в первоначально выбранном диапазоне параметров (группа 2) процесса СЛП с линейной плотностью энергии (E_L) 0,24 Дж/мм (табл. 1) образовались макротрещины, преимущественно в центральной и периферийной областях образцов (рис. 2б). При этом образцы группы 1, которые были получены с минимальной линейной плотностью энергии, имели признаки критического разрушения, составляющие более 20% площади поверхности вырезанных образцов (рис. 2а). Напротив, при использовании высокого значения линейной плотности энергии группы 3 (1 Дж/мм) в образце практически не образуется дефектов в виде трещин (рис. 2в). Полученные изображения выявили отчетливые особенности на поверхности макротрещин. К ним относятся зоны горячего внутрикристаллического разрушения, характеризующиеся наличием дендритных узоров. Кроме того, имеются области холодного внутрикристаллического разрушения, характеризующиеся наличием фасетчатых поверхностей разрушения, которые придают общей структуре отчетливый вид «речного узора» (рис. 2г).

Анализ снимков СЭМ показал, что микроструктура образцов характеризуется высокоорганизованной структурой, состоящей из вытянутых столбчатых ячеек, расположенных вдоль направления роста γ -твердого раствора. Эти столбчатые ячейки, называемые γ/γ' ячейками, представляют собой первичные дендритные рукава. Внутри каждой ячейки преобладает матрица γ -фазы, а по всей матрице рассеяны кубовидные частицы, состоящие из γ' -фазы. Эти кубовидные частицы образованы на основе интерметаллического соединения Ni_3Al (рис. 3).

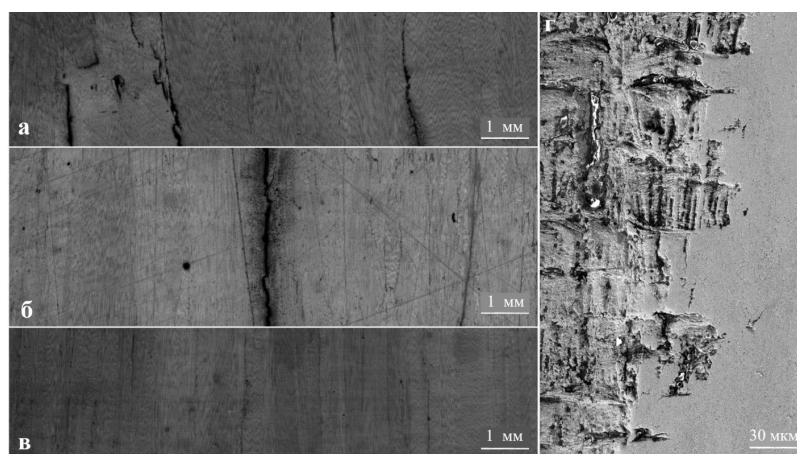


Рис. 2. Трещины вдоль поперечного направления строительства образца, построенного при:
а) группа 1, б) группа 2, в) группа 3; г) поверхность трещин

Fig. 2. Cracks along the transverse construction direction of the specimen constructed at:
a) group 1, b) group 2, c) group 3; d) crack surface

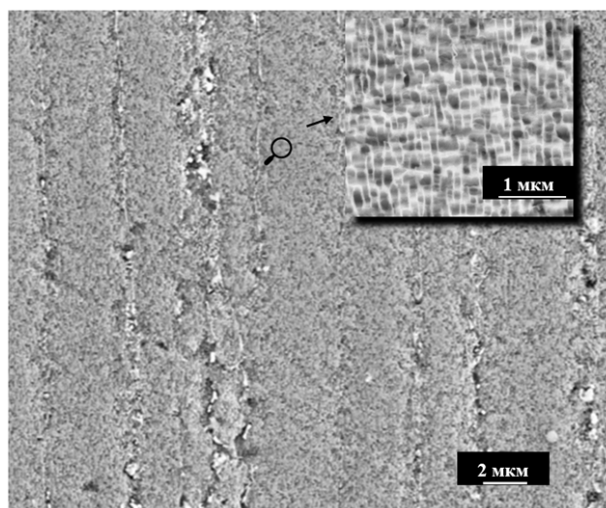


Рис. 3. Микроструктура образцов, полученных на установке «ВПЛС Меркурий»

Fig. 3. Microstructure of samples obtained at the High-Temperature Layer-by-Layer Laser Synthesis Plant "Mercury"

Закключение

Благодаря анализу образцов на основании полученных данных можно сделать вывод, что количество макро- и микродефектов находится в прямой зависимости от линейной плотности энергии (E_L). С увеличением этого параметра количество и вероятность возникновения дефектов значительно уменьшается. Эти данные позволят быстрее находить оптимальные параметры процесса селективного плавления для ЖНС. Помимо прочего, были обнаружены зоны горячего внутрикристаллического разрушения с дендритными узорами и холодного внутрикристаллического разрушения с «речными узорами». Помимо этого, структура является высокоорганизованной, состоящей из вытянутых столбчатых ячеек, и имеет кубовидные частицы. Такая сложная морфология поверхности позволяет получить ценные сведения о механизмах и условиях образования и распространения трещин в образцах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Воеводенко Д.В., Стариков К.А., Попович А.А.** Исследование микроструктуры компактных образцов из экономно-легированного жаропрочного никелевого сплава, полученных методом направленной кристаллизации в процессе селективного лазерного плавления // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 4. С. 72–82. DOI: 10.18721/JEST.29404
- [2] **Borisov E., Starikov K., Popovich A., Popovich V.** Cracks formation in nickel-based single crystal alloy manufactured by selective laser melting. Proceedings of the 29th International Conference on Metallurgy and Materials (METAL 2020), (2020) 875–879. DOI: 10.37904/metal.2020.3625
- [3] **Borisov E.V., Popovich V.A., Popovich A.A., Sufiiarov V.Sh., Jia-Ning Zhu, Starikov K.A.** Selective laser melting of Inconel 718 under high laser power. Materials Today: Proceedings, 30 (3) (2020) 784–788. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.571
- [4] **Zhang G., Zhu R., Xie G., Li S., Sundén B.** Optimization of cooling structures in gas turbines: A review. Chinese Journal of Aeronautics, 35 (6) (2022) 18–46. DOI: 10.1016/j.cja.2021.08.029
- [5] **Yadav M., Misra A., Malhotra A., Kumar N.** Design and analysis of a high-pressure turbine blade in a jet engine using advanced materials. Materials Today: Proceedings, 25 (4) (2020) 639–645. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.530
- [6] **Gotterbarm M.R., Rausch A.M., Körner C.** Fabrication of Single Crystals through a μ -Helix Grain Selection Process during Electron Beam Metal Additive Manufacturing. Metals, 10 (3) (2020) 313. DOI: 10.3390/met10030313
- [7] **Afkhami S., Dabiri M., Alavi S.H., Björk T., Salminen A.** Fatigue characteristics of steels manufactured by selective laser melting. International Journal of Fatigue, 122 (2019) 72–83. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.12.029
- [8] **Chowdhury T.S., Mohsin F.T., Tonni M.M., Mita M.N.H., Ehsan M.M.** A critical review on gas turbine cooling performance and failure analysis of turbine blades. International Journal of Thermofluids, 18 (2023) 100329. DOI: 10.1016/j.ijft.2023.100329
- [9] **Haghdadi N., Whitelock E., Lim B. et al.** Multimodal γ' precipitation in Inconel-738 Ni-based superalloy during electron-beam powder bed fusion additive manufacturing. Journal of Materials Science, 55 (27) (2020) 13342–13350. DOI: 10.1007/s10853-020-04915-w
- [10] **Kirka M.M. et al.** Mechanical Performance of a Non-weldable Ni-Base Superalloy: Inconel 738 Fabricated by Electron Beam Melting. Superalloys 2020, (2020) 1075–1084. DOI: 10.1007/978-3-030-51834-9_105
- [11] **Ramsperger M., Singer R.F., Körner C.** Microstructure of the Nickel-Base Superalloy CMSX-4 Fabricated by Selective Electron Beam Melting. Metallurgical and Materials Transactions A, 47 (3) (2016) 1469–1480. DOI: 10.1007/s11661-015-3300-y
- [12] **Lopez-Galilea I., Rutttert B., He J., Hammerschmidt T., Drautz R., Gault B., Theisen W.** Additive manufacturing of CMSX-4 Ni-base superalloy by selective laser melting: Influence of processing parameters and heat treatment. Additive Manufacturing, 30 (2019) 100874. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100874
- [13] **Liu Z., Qi H., Jiang L.** Control of crystal orientation and continuous growth through inclination of co-axial 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
- [14] **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
- [15] **Chauvet E., Kontis P., Jägle E.A., Gault B., Raabe D., Tassin C., Blandin J.-J., Dendievel R., Vayre B., Abed S., Martin G.** Hot cracking mechanism affecting a non-weldable Ni-based superalloy produced by selective electron Beam Melting. Acta Materialia, 142 (2018) 82–94. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.09.047
- [16] **Qiu C., Chen H., Liu Q., Yue S., Wang H.** 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

[17] Jones A., Leary M., Bateman S., Easton M. Effect of surface geometry on laser powder bed fusion defects. *Journal of Materials Processing Technology*, 296 (2021) 117179. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117179

[18] Carter L.N., Martin C., Withers P.J., Attallah M.M. The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 615 (2014) 338–347. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.06.172

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВОЕВОДЕНКО Даниил Витальевич — инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

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.

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] D.V. Voevodenko, K.A. Starikov, A.A. Popovich, Research of the microstructure of compact samples from economical heat-resistant nickel alloy obtained by directed crystallization in the process of selective laser melting. *Global Energy*, 29 (04) (2023) 72–82. DOI: 10.18721/JEST.29404

[2] E. Borisov, K. Starikov, A. Popovich, V. Popovich, Cracks formation in nickel-based single crystal alloy manufactured by selective laser melting. *Proceedings of the 29th International Conference on Metallurgy and Materials (METAL 2020)*, (2020) 875–879. DOI: 10.37904/metal.2020.3625

[3] E.V. Borisov, V.A. Popovich, A.A. Popovich, V.Sh. Sufiiarov, Jia-Ning Zhu, K.A. Starikov, Selective laser melting of Inconel 718 under high laser power. *Materials Today: Proceedings*, 30 (3) (2020) 784–788. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.571

[4] G. Zhang, R. Zhu, G. Xie, S. Li, B. Sundén, Optimization of cooling structures in gas turbines: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 35(6) (2022) 18–46. DOI: 10.1016/j.cja.2021.08.029

[5] M. Yadav, A. Misra, A. Malhotra, N. Kumar, Design and analysis of a high-pressure turbine blade in a jet engine using advanced materials. *Materials Today: Proceedings*, 25 (4) (2020) 639–645. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.530

[6] M.R. Gotterbarm, A.M. Rausch, C. Körner, Fabrication of Single Crystals through a μ -Helix Grain Selection Process during Electron Beam Metal Additive Manufacturing. *Metals*, 10 (3) (2020) 313. DOI: 10.3390/met10030313

[7] S. Afkhami, M. Dabiri, S.H. Alavi, T. Björk, A. Salminen, Fatigue characteristics of steels manufactured by selective laser melting. *International Journal of Fatigue*, 122 (2019) 72–83. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.12.029

[8] T.S. Chowdhury, F.T. Mohsin, M.M. Tonni, M.N.H. Mita, M.M. Ehsan, A critical review on gas turbine cooling performance and failure analysis of turbine blades. *International Journal of Thermofluids*, 18 (2023) 100329. DOI: 10.1016/j.ijft.2023.100329

- [9] N. Haghdadi, E. Whitelock, B. Lim et al., Multimodal γ' precipitation in Inconel-738 Ni-based superalloy during electron-beam powder bed fusion additive manufacturing. *Journal of Materials Science*, 55 (27) (2020) 13342–13350. DOI: 10.1007/s10853-020-04915-w
- [10] Kirka M.M. et al., Mechanical Performance of a Non-weldable Ni-Base Superalloy: Inconel 738 Fabricated by Electron Beam Melting. *Superalloys 2020*, (2020) 1075–1084. DOI: 10.1007/978-3-030-51834-9_105
- [11] M. Ramsperger, R.F. Singer, C. Körner, Microstructure of the Nickel-Base Superalloy CMSX-4 Fabricated by Selective Electron Beam Melting. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(3) (2016) 1469–1480. DOI: 10.1007/s11661-015-3300-y
- [12] I. Lopez-Galilea, B. Rutttert, J. He, T. Hammerschmidt, R. Drautz, B. Gault, W. Theisen, Additive manufacturing of CMSX-4 Ni-base superalloy by selective laser melting: Influence of processing parameters and heat treatment. *Additive Manufacturing*, 30 (2019) 100874. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100874
- [13] Z. Liu, H. Qi, L. 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
- [14] 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
- [15] E. Chauvet, P. Kontis, E.A. Jägle, B. Gault, D. Raabe, C. Tassin, J.-J. Blandin, R. Dendievel, B. Vayre, S. Abed, G. Martin, Hot cracking mechanism affecting a non-weldable Ni-based superalloy produced by selective electron Beam Melting. *Acta Materialia*, 142 (2018) 82–94. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.09.047
- [16] C. Qiu, H. Chen, Q. Liu, S. Yue, H. 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
- [17] A. Jones, M. Leary, S. Bateman, M. Easton, Effect of surface geometry on laser powder bed fusion defects. *Journal of Materials Processing Technology*, 296 (2021) 117179. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117179
- [18] L.N. Carter, C. Martin, P.J. Withers, M.M. Attallah, The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 615 (2014) 338–347. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.06.172

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: 05.09.2024; Одобрена: 25.09.2024; Принята: 26.09.2024.

Submitted: 05.09.2024; Approved: 25.09.2024; Accepted: 26.09.2024.