Том 32, №3, 2026



ISSN 2782-6724

Глобальная энергия

Санкт-Петербург

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

ГЛОБАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Сергеев В.В., главный редактор, д-р техн. наук, профессор, чл-корр РАН, первый проректор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Кондратьев С.Ю., зам. главного редактора, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Аксёнов Л.Б., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Башкарёв А.Я., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Боровков А.И., к.т.н., проректор по цифровой трансформации, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Гордеев С.К., д-р техн. наук, ст. научн. сотр. Центральный научно-исследовательский институт материалов, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Забоин 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;
Цеменко 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 ВИНИТИ 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: 30.09.2026

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2026

32 (3) 2026



ISSN 2782-6724

Global Energy

St. Petersburg

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

GLOBAL ENERGY

EDITORIAL COUNCIL

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Raychik Ya. — Doctor of Technical Sciences, prof. Czestochova Polytecnic 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: 30.09.2026

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2026

Содержание

Энергетика. Электротехника

Коровкин Н.В., Грицутенко С.С., Федотов Д.А. Измерение вольтамперной характеристики гистерезисного типа нелинейного устройства..... 7

Цзюаньцзюань Су, Шию Син, Вэй Ци, Шиань Ван. Развертывание производства экологически чистого авиационного топлива из микробных масел: проблемы и возможности..... 19

Красников-Вербников В.И., Грешняков Г.В., Чесноков Е.А., Дружинин Е.В. Моделирование процесса сглаживания электрического поля в изоляции концевой муфты 110 кВ..... 31

Маннанов Э.Р., Костельов А.М., Корнеев К.В., Степанов А.А., Белько В.О. Анализ конструктивно-технологических решений для внешнего пазового коронозащитного покрытия статорных обмоток высоковольтных турбогенераторов..... 43

Металлургия. Материаловедение

Борисов А.Н., Ковалев М.А., Гюлиханданов Е.Л., Попович А.А., Суфияров В.Ш. Влияние постобработки на микроструктуру, механические и трибологические свойства металлокерамических материалов TiC / Inconel 718, изготовленных технологией струйного нанесения связующего с последующей инфильтрацией..... 59

Колотий А.И., Нечаев Д.В., Ермаков С.Б. Зависимость механических характеристик изделий из PEEK и PEEK CF при испытаниях на трехточечный изгиб от параметров 3D-печати... 71

Цеменко В.Н., Замоздра М.Ю., Ганин С.В. Моделирование и практическая реализация процессов получения заготовок из стружки магниевых сплавов..... 82

Абдрахманова А.Э., Сотов А.В., Зайцев А.И., Иванчура М.В., Попович А.А. Сравнительная оценка механических характеристик полимерных композитов с непрерывным углеродным и базальтовым армированием, изготовленных методом FDM-CFC..... 100

Contents

Energetics. Electrical engineering

Korovkin N.V., Gritsutenko G.S, Fedotov D.A. Measurement of the current-voltage characteristic of a hysteresis type nonlinear device..... 7

Цзюаньцзюань Су, Шию Син, Вэй Ци, Шиань Ван. Развертывание производства экологически чистого авиационного топлива из микробных масел: проблемы и возможности..... 19

Krasnikov-Verbnikov V.I., Greshnyakov G.V., Chesnokov E.A., Druzhinin E.V. Modeling of the electric field smoothing process in the insulation of a 110 kV cable terminal..... 31

Mannanov E.R., Kostelov A.M., Korneev K.V., Stepanov A.A., Belko V.O. A review of design and technological solutions for external slot corona protection coatings on stator windings of high-voltage turbogenerators..... 43

Metallurgy. Material Science

Borisov A.N., Kovalev M.A., Gyulikhandanov E.L., Popovich A.A., Sufiiarov V.S. Effect of post-processing on the microstructure, mechanical and tribological properties of TiC / Inconel 718 cermets fabricated by binder jetting additive manufacturing and subsequent infiltration..... 59

Kolotiy A.I., Nechaev D.V., Ermakov S.B. Influence of 3D printing parameters on the mechanical properties of PEEK and PEEK CF specimens under three-point bending tests..... 71

Tsemenko V.N., Zamozdra Z.Yu., Ganin S.V. Modeling and practical implementation of processes for obtaining blanks from magnesium alloy chips..... 82

Abdrakhmanova A.E., Sotov A.V., Zaytsev A.I., Ivanchura M.V., Popovich A.A. Comparative evaluation of the mechanical properties of continuous fiber reinforced polymer composite with carbon and basalt reinforcement made by FDM-CFC..... 100

Глобальная энергия. Том 32, № 3, 2026. С. 7–18.
Global Energy, 2026, 32 (3); 7–18.

Энергетика. Электротехника
Energetics. Electrical engineering

Научная статья
УДК 621.318
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32301

Н.В. Коровкин[1] ✉ , *С.С. Грицутенко*[2], *Д.А. Федотов*[3]

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

[2] ООО «НПО ТЕХНО-АС», Смоленск, Россия;

[3] Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия

✉ nikolay.korovkin@gmail.com

ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИСТЕРЕЗИСНОГО ТИПА НЕЛИНЕЙНОГО УСТРОЙСТВА

Аннотация. В статье рассматривается метод измерения гистерезисной характеристики нелинейных устройств. В основе предлагаемого метода лежит определение коэффициентов разложения в ряд функций, описывающих нижнюю и верхнюю части петли гистерезиса. Поведен обзор способов измерений петли гистерезиса. Выполнено экспериментальное исследование предлагаемого метода в среде моделирования MATLAB, по результатам которого произведена оценка его точности. Предложенный в работе алгоритм позволяет существенно сократить время выполнения измерений гистерезиса электротехнических устройств и даже выполнять их в режиме реального времени. Это достигается благодаря получению результата измерений за полтора периода промышленной частоты. За счет выполнения измерений в реальном времени появляется возможность контроля формы кривых гистерезиса объекта при нагревании, например, собственными токами. Для проведения измерений и сопутствующих расчетов требуется относительно маломощный и, соответственно, недорогой микропроцессор.

Ключевые слова: гистерезис, петля гистерезиса, нелинейный элемент, измерение, интерполяция, коэффициенты интерполяционного полинома.

Для цитирования:

Коровкин Н.В., Грицутенко С.С., Федотов Д.А. Измерение вольтамперной характеристики гистерезисного типа нелинейного устройства // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 3. С. 7–18. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32301

© Коровкин Н.В., Грицутенко С.С., Федотов Д.А., 2026. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32301

N.V. Korovkin[1] ✉ , *G.S. Gritsutenko*[2], *D.A. Fedotov*[3]

[1] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;
[2] NPO TECHNO-AS LLC, Smolensk, Russia;
[3] Omsk State Transport University, Omsk, Russia

✉ nikolay.korovkin@gmail.com

MEASUREMENT OF THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC OF A HYSTERESIS TYPE NONLINEAR DEVICE

Abstract. The article considers a method for measuring the hysteresis characteristic of nonlinear devices. The proposed method is based on determining the expansion coefficients in a series of functions describing the lower and upper parts of the hysteresis loop. A review of the methods for measuring the hysteresis loop is given. An experimental study of the proposed method in the MATLAB modeling environment was performed, based on the results of which its accuracy was assessed. The algorithm proposed in the work allows to significantly reduce the time for measuring the hysteresis of electrical devices and even perform them in real time. This is achieved by obtaining the measurement result for one and a half of the periods of the industrial frequency. Due to the implementation of measurements in real time, it becomes possible to control the shape of the hysteresis curves of an object when heated, for example, by its own currents. A relatively low-power and, accordingly, inexpensive microprocessor is required to carry out measurements and associated calculations.

Keywords: hysteresis, hysteresis loop, nonlinear element, measurement, interpolation, interpolation polynomial coefficients.

Citation:

Korovkin N.V., Gritsutenko G.S., Fedotov D.A., Measurement of the current-voltage characteristic of a hysteresis type nonlinear device, Global Energy, 32 (03) (2026) 7–18, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32301

Введение. Измерение формы петли гистерезиса является одной из ключевых задач при исследовании нелинейных устройств. Из последних публикаций, посвященных этой теме, отметим [1–6]. Существует несколько методов экспериментального получения петли гистерезиса. Один из них – это метод циклического сканирования. Он основан на подаче на прибор серии сигналов различной амплитуды и частоты, а затем на регистрации соответствующего отклика прибора [7–9]. После этого можно построить график зависимости выходного сигнала от входного, что позволяет определить форму петли гистерезиса.

Отличный от рассмотренного выше метод дифференциальной проводимости [10–12] базируется на измерении изменения проводимости при малых изменениях входного сигнала. Для этого могут использоваться специальные датчики или дополнительные электрические цепи, определяющие производную от выходного сигнала по отношению к входному. Изменение проводимости отражает характер изменения выходного сигнала и помогает определить наличие или отсутствие гистерезиса.

Вышеперечисленные методики базируются на измерении тока и напряжения, из которых далее аналитически можно вычислить магнитную индукцию B и напряженность магнитного поля H. Именно на измерении тока и напряжения базируется ГОСТ 12119–80 «Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств».

© Korovkin N.V., Gritsutenko G.S., Fedotov D.A., 2026. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Отметим также работы [13–15], где рассмотрено создание математической модели нелинейного устройства с гистерезисом, которая описывает его поведение в зависимости от входного сигнала. Анализ этой модели позволяет определить наличие и форму петель гистерезиса.

Основными недостатками упомянутых выше методов являются их невысокая точность и длительная продолжительность измерений. Погрешность методов обусловлена тем, что измерения проводят на постоянных токах и напряжениях, но, как известно, спектр шума группируется именно у нулевой частоты. Продолжительное время измерений может привести к изменению характеристик (например, температуры) исследуемого объекта и, соответственно, к изменению формы гистерезисных кривых. В данной работе предлагается модификация стандартного подхода, позволяющая выполнять измерение формы петли гистерезиса в реальном времени, что имеет важное практическое значение, так как магнитные свойства материалов зависят от температуры и частоты.

Рассматриваемый здесь метод базируется на предложенном в [16] алгоритме измерения в реальном времени вольтамперной характеристики (ВАХ) нелинейных электротехнических устройств. Исходный метод позволяет эффективно находить аппроксимацию полиномом заданного порядка ВАХ нелинейного элемента безгистерезисного типа. Предлагаемый метод обобщает [16] на случай ВАХ с гистерезисом, используя метод [16] для верхней и нижней частей петли гистерезиса.

Целью работы является описание высокоточного метода определения формы петли гистерезиса, который заключается в нахождении коэффициентов полиномов, аппроксимирующих верхнюю и нижнюю кривые гистерезисной характеристики нелинейного устройства при подаче на него напряжения синусоидальной формы, выполняющего измерение за полтора периода изменения напряжения.

Методы

Подадим на устройство, обладающее гистерезисом, напряжение синусоидальной формы и измерим ток устройства, имеющий форму периодической несинусоидальной функции (рис. 1).

По этим кривым легко вычислим магнитную индукцию B (синусоидальная кривая) и напряженность магнитного поля H.

Как видно из графика, восходящие участки кривой магнитной индукции (выделенные синими цветом) соответствуют восходящим участкам кривой напряженности магнитного поля,

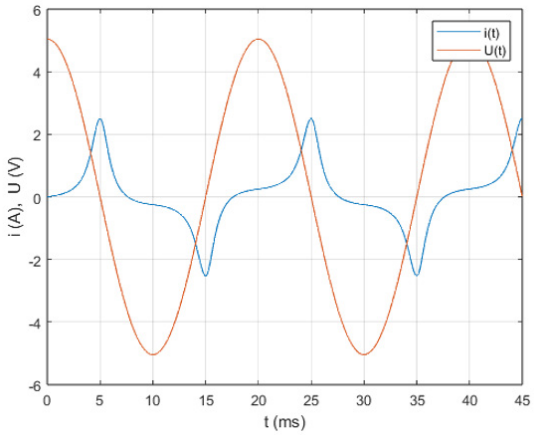


Рис. 1. Ток и напряжение на катушке индуктивности, обладающей гистерезисом

Fig. 1. Current and voltage on an inductor with hysteresis

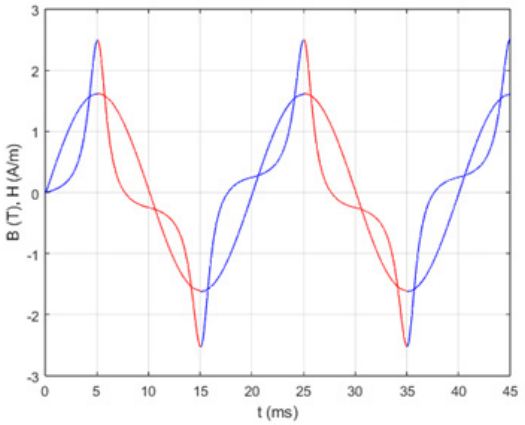


Рис. 2. Магнитная индукция B и напряженность магнитного поля H на катушке индуктивности, обладающей гистерезисом

Fig. 2. Magnetic induction B and magnetic field strength H on an inductor with hysteresis

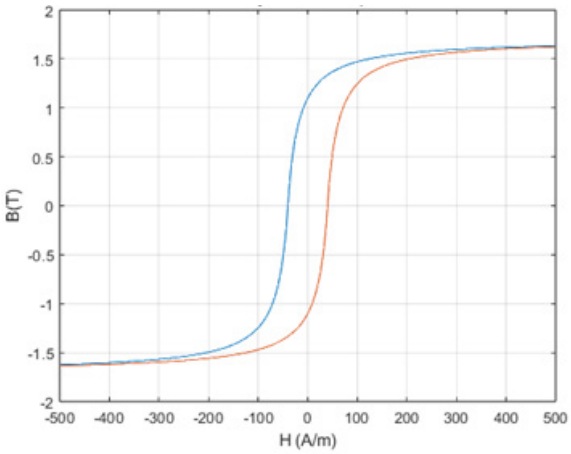


Рис. 3. Петля гистерезиса

Fig. 3. Hysteresis loop

тоже выделенным синим цветом. Нисходящие участки кривой магнитной индукции (выделенные красным цветом) соответствуют красным нисходящим участкам кривой напряженности магнитного поля. Петля гистерезиса (рис. 3) описывается двумя кривыми. Для восходящих участков магнитной индукции $B_{up}(H_{up})$ показана синим цветом. Для нисходящих $B_{down}(H_{down})$ – красным. Учитывая, что B_{up} и B_{down} – обычные синусоиды (рис. 2), а H_{up} и H_{down} имеют более сложную форму, то будет удобнее рассмотреть кривые $H_{up}(B_{up})$ и $H_{down}(B_{down})$, а потом при помощи тривиальных преобразований вернуться к зависимостям $B_{up}(H_{up})$ и $B_{down}(H_{down})$.

Каждая из функций $H_{up}(B_{up})$ и $H_{down}(B_{down})$ может быть аппроксимирована конечным отрезком ряда Тейлора. Поскольку последовательности действий для $H_{up}(B_{up})$ и $H_{down}(B_{down})$ идентичны, далее для простоты пишем $H(B)$. Используем аппроксимацию:

$$H\left(B\right) \approx \sum_{k=0}^{K} A_k B^k,$$

где A_k – коэффициенты ряда Тейлора. Как уже отмечалось выше, $B(t) = B_1 \sin(2\pi t)$, тогда $H(B) = \sum_{k=0}^{K} C_k \sin\left(2\pi k t\right)$, где C_k – коэффициенты ряда Фурье. Соответственно, зная гармоники

тока C_k, возможно восстановить для верхней и нижней частей петли гистерезиса коэффициенты разложения в ряд Тейлора A_k. В [16] показано, что коэффициенты A_k и C_k связаны линейным соотношением

$$A_0 = C_0 + \sum_{i=1}^{K-1} C_{2i} (-1)^i;$$

$$A_n = \frac{2^{n-1}}{B_1^n} \left(C_n + \sum_{i=1}^{K-1} \frac{C_{n+2i} (-1)^i (n+2i)(i+n-1)!}{i!n!} \right).$$

Для получения этих связей необходимо выполнение измерений только на 1,5 периода изменения напряжения. Точность этих связей проанализирована в [16], где показано, что она умеренно зависит от шума, сопутствующего любым измерениям, и может повышаться стандартными измерительными методиками.

Гармоники C_n легко находятся при помощи алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Однако здесь возникает следующая проблема. Алгоритм БПФ может работать только на целом периоде гармонического сигнала. Но, как видно из рис. 2, кривые напряженности магнитного поля H определены только на половине периода. Вторую половину необходимо найти. Эту часть сигнала предлагается достроить при помощи интерполяции, т.е. из сигналов, показанных на рис. 4.

Получим сигналы, показанные на рис. 5.

Опишем алгоритм интерполяции. Любая функция $H(t)$ может быть разложена в бесконечный ряд по базисным функциям $\phi_k(t)$:

$$H(t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \phi_k(t). \quad (1)$$

Для упрощения в дальнейших расчетах будем использовать ограниченный до K членов ряд

$$H(t) \approx \sum_{k=1}^{K} C_k \phi_k(t). \quad (2)$$

а) б)

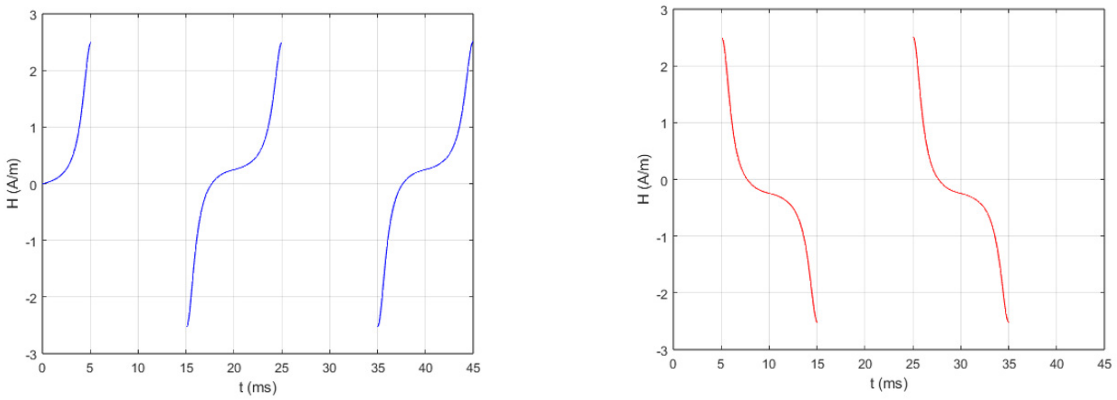


Рис. 4. Восходящая (а) и нисходящая (б) ветви напряженности магнитного поля H

Fig. 4. Ascending (a) and descending (b) branch of the magnetic field strength H

а) б)

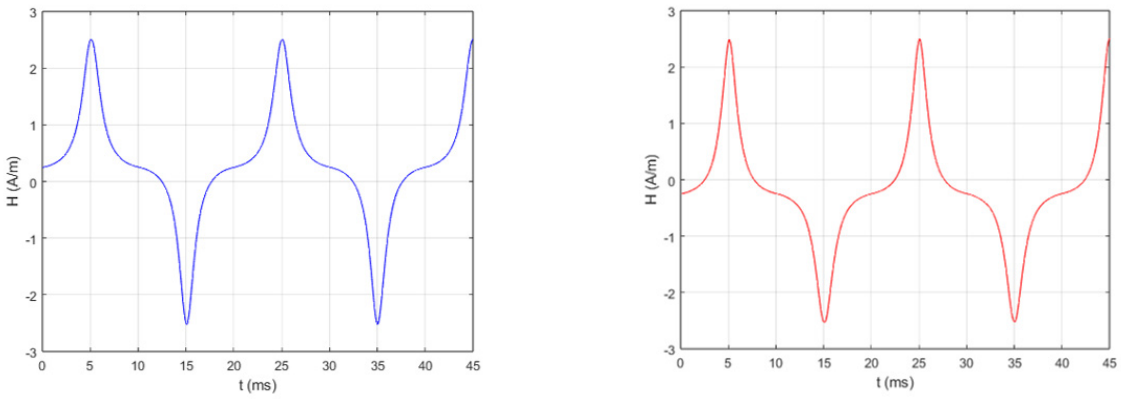


Рис. 5. Функции $H_{up}(t)$ (а) и $H_{down}(t)$ (б) для синусоидальной $B(t)$
Fig. 5. $H_{up}(t)$ (a) and $H_{down}(t)$ (b) function for the sinusoidal $B(t)$

Интерполирование выполняется по отсчетам, взятым только в зонах, где H нарастает, или по отсчетам, взятым только там, где H убывает. Если известны значения $H(t_n)$, а также моменты времени t_n, то можно составить систему уравнений

$$H\left(t_n\right)=\sum_{k=1}^{K}C_k\phi_k\left(t_n\right).$$

В матричной форме эту систему можно представить следующим образом.

$$\begin{bmatrix} \phi_1(t_1) & \phi_2(t_1) & \dots & \phi_k(t_1) & \dots & \phi_K(t_1) \\ \phi_1(t_2) & \phi_2(t_2) & \dots & \phi_k(t_2) & \dots & \phi_K(t_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \phi_1(t_n) & \phi_2(t_n) & \dots & \phi_k(t_n) & \dots & \phi_K(t_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \phi_1(t_K) & \phi_2(t_K) & \dots & \phi_k(t_K) & \dots & \phi_K(t_K) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_k \\ \dots \\ C_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(t_1) \\ H(t_2) \\ \dots \\ H(t_n) \\ \dots \\ H(t_K) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Решая систему уравнений (3), находим коэффициенты C_k. Далее, используя формулу (2), достраиваем кривые $H_{up}(t)$ и $H_{down}(t)$, как это показано на рис. 6 и 7. Зная зависимость $B_{up}(t)$ и $B_{down}(t)$, строим восходящую кривую гистерезиса $B_{up}(H_{up})$ и нисходящую $B_{down}(H_{down})$. Задача решена.

Результаты

Экспериментальное исследование предлагаемого метода выполнено путем построения петли гистерезиса для двух (ε_1 и ε_2) различных погрешностей первичных измерений, т.е. измерений тока и напряжения на входе нелинейной катушки с гистерезисом. В первом случае в измерения вводилась относительная погрешность $\varepsilon_1 = 5\%$, а во втором – $\varepsilon_2 = 10\%$. Далее по зашумленным измерениям вычислялись индукция и напряженность магнитного поля, по которым строилась, согласно описанной выше методике, петля гистерезиса. Измерения выполнялись на 11 периодах промышленной частоты, в качестве базиса использовались экспоненты с комплексным показателем. В результате ряда экспериментов среднеквадратическое отклонение кривой $B(H)$

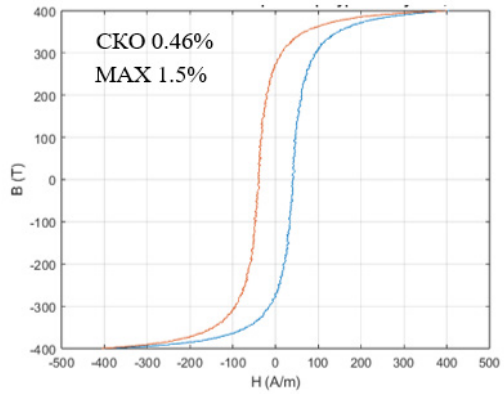


Рис. 6. Петля гистерезиса, полученная при подмешивании шума, соответствующего погрешности 5%
Fig. 6. Hysteresis loop obtained by mixing noise corresponding to an error of 5%

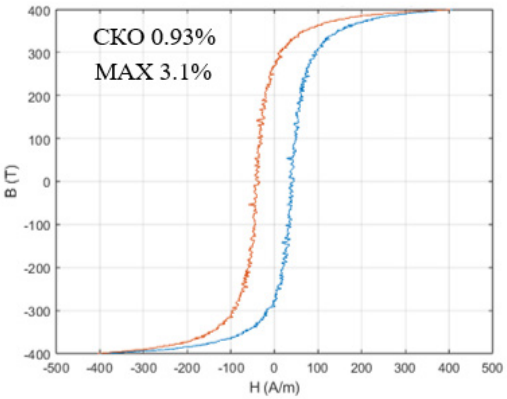


Рис. 7. Петля гистерезиса, полученная при подмешивании шума, соответствующего погрешности 10%
Fig. 7. Hysteresis loop obtained by mixing noise corresponding to an error of 10%

от полученной без зашумления данных составило для первого случая 0,47%, а максимальное отклонение – 1,5%, а для второго случая соответственно 0,93% и 3,1%.

Дискуссия

Очевидно, что данный метод нуждается в дальнейшем совершенствовании. Предполагаются две причины возникновения погрешностей. Во-первых, это следствие решения системы уравнений. Во-вторых, отсутствие усреднения получаемых результатов.

Решение систем уравнений, используемое в данном подходе, требует высокой точности вычислений. Основной механизм возникновения погрешностей базируется на округлении результатов математических операций. Пусть точность вычислений ограничена тремя знаками после запятой и для некоторой промежуточной величины получен результат 0,00151. Он будет округлен до 0,002. Этот результат принимает участие в дальнейших вычислениях, что имеет место при решении систем уравнений. Если в результате погрешностей та же промежуточная переменная примет значение 0,00149, оно будет округлено до 0,001, что соответствует погрешности в 100%. Использование этого значения в дальнейших вычислениях приведет к существенной погрешности решения системы уравнений. Пример иллюстрирует причины того, что матрицы описанных выше систем уравнений могут оказаться близкими к вырожденным, и система

уравнений может иметь неустойчивое решение или не иметь решения. Поэтому желательно отказаться от решения систем уравнений при интерполяции и использовать другие подходы, например, полиномы Лагранжа.

Реальным измерениям всегда сопутствует шум, что равносильно привнесению в матрицы возмущений случайного характера. Однако дискретизация напряжений и токов промышленной частоты обычно предоставляет для анализа гораздо больше отсчетов, чем необходимо для составления систем уравнений. Поэтому разумно использовать метод наименьших квадратов. Использование метода целесообразно для задач, где анализ процессов в магнитной системе имеет существенное значение [17].

Предлагаемый метод развивает классический подход к измерению петли гистерезиса при помощи осциллографа [18–20]. В обоих случаях выделяются верхняя и нижняя ветви при синусоидальном сигнале. Однако, когда используется осциллограф, кривая будет получена как набор ее значений, а в предлагаемом в статье методе она получается аналитически, что значительно упрощает любые действия, связанные с ее дальнейшим использованием. Например, индукция насыщения и коэрцитивная сила находятся при помощи стандартной процедуры решения уравнения (2) путем подстановки соответствующих значений и введения коэффициента пропорциональности для осей графика гистерезиса, как это показано в [14]. При этом осциллографический метод имеет более высокую вычислительную сложность, так как его точность определяется частотой дискретизации осциллографа или, что то же самое, количеством точек кривой петли гистерезиса. Предлагаемый метод свободен от данного недостатка, так как количество используемых отсчетов (и, соответственно, объем вычислений) ограничивается только теоремой Котельникова (или, что то же самое, количеством анализируемых гармоник). Таким образом, предлагаемый метод позволяет выполнять стандартные измерения, но во много раз «дешевле» в техническом смысле.

Дальнейшие исследования в данном направлении будут нацелены на совершенствование предложенного метода и подхода к измерению ВАХ гистерезисного типа с использованием современных технологических решений и алгоритмов. Это позволит углубить понимание механизмов работы нелинейных устройств и разработать новые методы их оптимизации и контроля.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Liu R., Lu Y.** Inverse Rheological Hysteresis Model and its Efficient Parameter Identification Method, IEEE Transactions on Magnetics, 60 (3) (2024) 7300204. DOI: 10.1109/TMAG.2023.3312536

[2] **Daniels B., Overboom T., Curti M., Lomonova E.** Everett Map Construction for Modeling Static Hysteresis: Delaunay-Based Interpolant Versus B-Spline Surface, IEEE Transactions on Magnetics, 59 (5) (2023) 7300304. DOI: 10.1109/TMAG.2023.3241427

[3] **Hirsch J.E.** Hysteresis loops in measurements of the magnetic moment of hydrides under high pressure: Implications for superconductivity, Physica C: Superconductivity and its Applications, 617 (2024) 1354449. DOI: 10.1016/j.physc.2024.1354449

[4] **Tkáč M., Jakubas A., Jastrzębski R., Bureš R., Maciaszek R., Füzer J., Najgebauer M., Fáberová M., Kollár P.** Magnetic Properties and Hysteresis Loops Modeling of Iron Powder Cores Influenced by High Compacting Pressure, Physica B: Condensed Matter, 710 (2025) 417262. DOI: 10.1016/j.physb.2025.417262

[5] **Spasojević D., Janićević S., Mijatović S., Tadić B.** Hysteresis-Loop Criticality in Disordered Ferromagnets – A Comprehensive Review of Computational Techniques, CMES – Computer Modeling in Engineering & Sciences, 142 (2) (2025) 1021–1107. DOI: 10.32604/cmes.2024.057884

[6] **Liu X., Jiang Z., Zhang S., Gao Q., Yao Z., Wang Y.** A low-equivalent magnetic noise and high-sensitivity magneto-electric coupling sensor based on series structure, IEEE Transactions on Magnetics, 61 (3) (2024) 4000106. DOI: 10.1109/TMAG.2024.3520254

[7] **Афанасьев А.А.** Расчет магнитных потерь электромеханических устройств // Электричество. 2016. № 6. С. 25–33.

[8] **Садриев Р.М.** Прогнозирование долговечности деталей машин на основе анализа изменения площадей петель гистерезиса. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2007.

[9] **Ткачев А.Н.** Комбинированные методы моделирования квазистационарного электромагнитного поля в нелинейных анизотропных ферромагнитных средах. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Новочеркасск, 1998.

[10] **Шашурин В.Д., Ветрова Н.А., Куимов Е.В., Мешков С.А., Макеев М.О.** Самосогласованный квантоворазмерный канал арсенидгаллиевых резонансно-туннельных диодов // Семнадцатая Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков». 2023. С. 219–223.

[11] **Дьяконов В.В.** Современная техника и приборы для измерения резистивности и снятия ВАХ // Компоненты и технологии. 2010. № 10. С. 137–144.

[12] **Рудин А.В., Рубцов И.А., Пастухов А.М., Цветков А.П., Буланкина Д.П.** Определение магнитных параметров ферромагнитных материалов методом переменного магнитного потока // Проблемы автоматизации и управления в технических системах. 2023. С. 158–166.

[13] **Гречихин В.В.** Применение математического моделирования в задачах определения петель гистерезиса электротехнических материалов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2010. № 3. С. 13–18.

[14] **Макаричев К.В., Кириллов Р.С., Карякин Ф.Л.** Расчетный способ определения петли гистерезиса // Энергетика, электропривод, энергосбережение и экономика предприятий: вчера, сегодня, завтра. 2009. С. 76–77.

[15] **Белоконь А.В., Скалиух А.С.** Математическое моделирование необратимых процессов поляризации. М.: ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2010.

[16] **Грицутенко С.С., Коровкин Н.В., Федотов Д.А.** Определение коэффициентов разложения нелинейной характеристики в степенной ряд // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2024. № 2. С. 127–136. DOI: 10.31857/S0002331024020081

[17] **Коровкин Н.В., Сахно Л.И., Сахно О.И., Кобзарь Е.Н.** Влияние погрешности измерений параметров модели трансформатора на точность расчета его режимов // Материаловедение. Энергетика. 2022. Т. 28, № 2. С. 7–17. DOI: 10.18721/JEST.28201

[18] **Гормаков А.Н.** Снятие петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и построение основной кривой намагничивания. Методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Материалы электронной техники» для студентов, обучающихся по направлениям: «Электроника и наноэлектроника» – 11.03.04 и «Биомедицинская инженерия» – 2.12.03.04. Томск: ТПУ, 2021.

[19] **Zhao X., Jiang Y., Wang Y., Chen J.** The pulse magnetic field method for measuring magnetization curves of silicon steel under highly saturated state, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 620 (2025) 172873. DOI: 10.1016/j.jmmm.2025.172873

[20] **Smolaninovs V., Terauds M.** Microcontroller-Based Electronic Laboratory Measurement Device for Distance Education, Electronics, 14 (3) (2025) 438. DOI: 10.3390/electronics14030438

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОРОВКИН Николай Владимирович – *заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.*
E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1173-8727

ГРИЦУТЕНКО Станислав Семенович – *ведущий научный сотрудник, ООО «НПО ТЕХНОАС», д-р техн. наук.*
E-mail: st256@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7921-2457

ФЕДОТОВ Дмитрий Анатольевич – *старший преподаватель, Омский государственный университет путей сообщения, без степени.*
E-mail: omgups@omgups.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-4329-3394

REFERENCES

[1] **R. Liu, Y. Lu,** Inverse Rheological Hysteresis Model and its Efficient Parameter Identification Method, IEEE Transactions on Magnetics, 60 (3) (2024) 7300204. DOI: 10.1109/TMAG.2023.3312536

[2] **B. Daniels, T. Overboom, M. Curti, E. Lomonova,** Everett Map Construction for Modeling Static Hysteresis: Delaunay-Based Interpolant Versus B-Spline Surface, IEEE Transactions on Magnetics, 59 (5) (2023) 7300304. DOI: 10.1109/TMAG.2023.3241427

[3] **J.E. Hirsch,** Hysteresis loops in measurements of the magnetic moment of hydrides under high pressure: Implications for superconductivity, Physica C: Superconductivity and its Applications, 617 (2024) 1354449. DOI: 10.1016/j.physc.2024.1354449

[4] **M. Tkáč, A. Jakubas, R. Jastrzębski, R. Bureš, R. Maciaszek, J. Füzer, M. Najgebauer, M. Fáberová, P. Kollár,** Magnetic Properties and Hysteresis Loops Modeling of Iron Powder Cores Influenced by High Compacting Pressure, Physica B: Condensed Matter, 710 (2025) 417262. DOI: 10.1016/j.physb.2025.417262

[5] **D. Spasojević, S. Janićević, S. Mijatović, B. Tadić,** Hysteresis-Loop Criticality in Disordered Ferromagnets – A Comprehensive Review of Computational Techniques, CMES – Computer Modeling in Engineering & Sciences, 142 (2) (2025) 1021–1107. DOI: 10.32604/cmes.2024.057884

[6] **X. Liu, Z. Jiang, S. Zhang, Q. Gao, Z. Yao, Y. Wang,** A low-equivalent magnetic noise and high-sensitivity magneto-electric coupling sensor based on series structure, IEEE Transactions on Magnetics, 61 (3) (2024) 4000106. DOI: 10.1109/TMAG.2024.3520254

[7] **A.A. Afanas'yev,** Magnetic Loss Calculation in Mathematically Modeling Electromechanical Devices, Electricity, 6 (2016) 25–33.

[8] **R.M. Sadriev,** Prognozirovanie dolgovechnosti detalei mashin na osnove analiza izmeneniia ploshchadei petel' gisterezisa. Dis. kand. tekhn. nauk [Predicting the durability of machine parts based on the analysis of changes in the areas of hysteresis loops. Cand. tech. sci. diss.]. Kazan', 2007.

[9] **A.N. Tkachev,** Kombinirovannye metody modelirovaniia kvazistatsionarnogo elektromagnitnogo polia v nelineinykh anizotropnykh ferromagnitnykh sredakh. Dis. dokt. tekhn. nauk [Combined methods for modeling a quasi-stationary electromagnetic field in nonlinear anisotropic ferromagnetic media. Dr. tech. sci. diss.]. Novocherkassk, 1998.

[10] **V.D. Shashurin, N.A. Vetrova, E.V. Kuimov, S.A. Meshkov, M.O. Makeev,** Self-consistent quantum-dimensional channel of gallium arsenide resonant tunneling diodes, Proceedings of the 17th International Scientific and Technical Conference "Optical Methods for Flow Research", (2023) 219–223.

[11] **V.V. D'iakonov,** Sovremennaia tekhnika i pribory dlia izmereniia rezistivnosti i sniatiia VAKH [Modern equipment and devices for measuring resistivity and recording current-voltage characteristics], Components and Technologies, 10 (2010) 137–144.

[12] **A.V. Rudin, I.A. Rubtsov, A.M. Pastukhov, A.P. Tsvetkov, D.P. Bulankina,** Determination of magnetic parameters of ferromagnetic materials by alternating magnetic flux method, Problemy avtomatizatsii i upravleniia v tekhnicheskikh sistemakh [Problems of automation and control in technical systems], (2023) 158–166.

[13] **V.V. Grechikhin,** Primenenie matematicheskogo modelirovaniia v zadachakh opredeleniia petel' gisterezisa elektrotekhnicheskikh materialov [Application of mathematical modeling in problems of determining hysteresis loops of electrical materials], Russian Electromechanics, 3 (2010) 13–18.

[14] **K.V. Makarichev, R.S. Kirillov, F.L. Kariakin,** Raschetnyi sposob opredeleniia petli gisterezisa [Calculation method for determining the hysteresis loop], Energetika, elektroprivod, energosberezhenie i ekonomika predpriiatii: vchera, segodnia, zavtra [Power engineering, electric drives, energy conservation and enterprise economics: yesterday, today, tomorrow], (2009) 76–77.

[15] **A.V. Belokon', A.S. Skaliukh,** Matematicheskoe modelirovanie neobratimykh protsessov poliarizatsii [Mathematical modeling of irreversible polarization processes], Moscow: OOO Izdatel'skaia firma "Fiziko-matematicheskaia literatura", 2010.

[16] **N.V. Korovkin, S.S. Gritsutenko, D.A. Fedotov,** Determination of coefficients of decomposition of a nonlinear characteristic into a power series, Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energetics, 2 (2024) 127–136. DOI: 10.31857/S0002331024020081

[17] **N.V. Korovkin, L.I. Sakhno, O.I. Sakhno, E.N. Kobzar,** Influence of the measurement error of the transformer model parameters on the accuracy of the calculation of its modes, Materials Science. Power Engineering, 28 (02) (2022) 7–17. DOI: 10.18721/JEST.28201

[18] **A.N. Gormakov,** Sniatie petli gisterezisa ferromagnitnogo materiala s pomoshch'iu ostsillografa i postroenie osnovnoi krivoi namagnichivaniia. Metodicheskie ukazaniia po vypolneniiu laboratornoi raboty po distsipline «Materialy elektronnoi tekhniki» dlia studentov, obuchaiushchikhsia po napravleniiam: «Elektronika i nanoelektronika» – 11.03.04 i «Biomeditsinskaia inzheneriia» – 2.12.03.04 [Measuring the hysteresis loop of a ferromagnetic material using an oscilloscope and plotting the fundamental magnetization curve. Laboratory instructions for students majoring in "Electronic Materials" and "Biomedical Engineering"]. Tomsk: TPU, 2021.

[19] **X. Zhao, Y. Jiang, Y. Wang, J. Chen,** The pulse magnetic field method for measuring magnetization curves of silicon steel under highly saturated state, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 620 (2025) 172873. DOI: 10.1016/j.jmmm.2025.172873

[20] **V. Smolaninovs, M. Terauds,** Microcontroller-Based Electronic Laboratory Measurement Device for Distance Education, Electronics, 14 (3) (2025) 438. DOI: 10.3390/electronics14030438

INFORMATION ABOUT AUTHORS

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

Stanislaw S. GRITSUTENKO – *NPO TECHNO-AS LLC.*
E-mail: st256@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7921-2457

Dmitriy A. FEDOTOV – *Omsk State Transport University.*
E-mail: omgups@omgups.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-4329-3394

Поступила: 22.04.2026; Одобрена: 07.05.2026; Принята: 08.07.2026.
Submitted: 22.04.2026; Approved: 07.05.2026; Accepted: 08.07.2026.

Глобальная энергия. Том 32, № 3, 2026. С. 19–30.
Global Energy, 2026, 32 (3); 19–30.

Материал был ранее опубликован. Ссылка для цитирования: Ц. Су, Ш. Син, В. Ци, Ш. Ван Развертывание производства экологически чистого авиационного топлива из микробных масел: проблемы и возможности // 10 прорывных идей в энергетике на следующие десять лет, 2025. С. 27–37. Оригинальный полный текст доклада доступен по ссылке: https://globalenergyprize.org/ru/wp-content/uploads/2025/10/ge_doklad_2025_ru.pdf

Цзюаньцзюань Су[1], Шию Син[2], Вэй Ци[3], Шиань Ван[1]

[1] Институт биоэнергетики и биотехнологических процессов в Циндао Китайской академии наук , Циндао, Китай;

[2] Гуанчжоуский институт преобразования энергии Китайской академии наук, Гуанчжоу, Китай;

[3] Китайский университет науки и технологий, Хэфэй, Китай

РАЗВЕРТЫВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО АВИАЦИОННОГО ТОПЛИВА ИЗ МИКРОБНЫХ МАСЕЛ: ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНОСТИ

Введение. Авиационная отрасль, на долю которой приходится более 2% глобальных антропогенных выбросов CO_2, по-прежнему в значительной степени зависит от авиационного топлива (AF), получаемого из нефти, на которое приходится более 99% текущего потребления. Согласно данным, опубликованным Международной ассоциацией воздушного транспорта (IATA), доля экологически чистого авиационного топлива (SAF) в мировом производстве авиационного топлива в 2024 году составит всего 0,3%. Производство традиционного AF не только усугубляет выбросы парниковых газов, но и приводит в долгосрочной перспективе к проблемам, связанным с ограниченностью ископаемых ресурсов и геополитическими рисками снабжения. В отличие от этого, SAF, полученное из возобновляемого сырья, позволяет осуществить важный переход к декарбонизации авиации при одновременном соблюдении строгих требований к топливным характеристикам. SAF на протяжении всего жизненного цикла его использования может сократить выбросы парниковых газов (ПГ) до 80% по сравнению с традиционными видами топлива, что соответствует глобальным климатическим целям, таким как цель IATA по достижению нулевого уровня выбросов к 2050 году.

В настоящее время доминирует производство SAF на основе использования гидропереработанных эфиров и жирных кислот (HEFA), зависящее от пищевых масел, что вызывает опасения по поводу конфликта, связанного с применением данного сырья как для получения продовольствия, так и для топлива, а также с выбросами, возникающими при косвенном изменении землепользования (ILUC). Кроме того, серьезным препятствием для широкого внедрения SAF остается стоимость его производства. Сообщается, что стоимость SAF превышает на 120–700 % (в зависимости от сырья и технологии переработки) стоимость ископаемого авиационного топлива. Это экономическое неравенство подчеркивает острую необходимость разработки конкурентоспособных по стоимости непищевых видов сырья и масштабируемых систем его переработки.

Микробные масла, синтезируемые масличными микроорганизмами, предлагают трансформационный путь, основанный на преобразовании с помощью HEFA малоценных углеродных потоков в липидные прекурсоры для SAF, что соответствует стандарту ASTM D7566 для синтетических углеводородов. Эти масла позволяют избежать конфликтов, связанных с использованием сельскохозяйственных земель, и обеспечивают углерод-отрицательные пути

© Цзюаньцзюань Су, Шию Син, Вэй Ци, Шиань Ван, 2026. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

при интеграции данной технологии с утилизацией отходов или использованием CO_2. Однако для достижения рентабельности необходимо преодолеть технические и экономические проблемы, в том числе низкий выход липидов, высокие затраты на ферментацию и неэффективную каталитическую переработку. В данной статье обсуждаются текущие достижения и будущие направления в разработке SAF на основе микробного масла, с акцентом на усилиях по преодолению разрыва между лабораторными инновациями и промышленным внедрением.

Потенциальные возможности и проблемы производства SAF из микробных масел

Переход от традиционного биотоплива к SAF требует сырья, позволяющего решать экологические и экономические проблемы, связанные с традиционными источниками липидов. Хотя в настоящее время в производстве SAF преобладает использование HEFA, зависимость данного топлива от пищевых масел способствует выбросам ILUC и усиливает конкуренцию за сырье с продовольственными системами. Микробные масла, синтезируемые масличными микроорганизмами, такими как *Yarrowia lipolytica* и *Rhodotorula toruloides*, представляют собой революционную альтернативу, поскольку используют непищевые источники углерода (Рис. 1), такие, как сырой глицерин, ацетат, метанол и лигноцеллюлозные гидролизаты, для производства липидов, соответствующих стандартам ASTMD7566. Как сообщается, одноклеточное масло (SCO), производимое микроорганизмами *R. toruloides*, имеет профиль жирных кислот, позволяющий преобразовывать данное масло в биодизельное топливо с цетановым числом (CN) > 51, что соответствует минимальным стандартам CN 47 (ASTMD 6751), 49 (DIN 51606) и 51 (EN 14214). В отличие от масел растительного происхождения, производство микробных липидов происходит в закрытых биореакторных системах, что позволяет эффективно

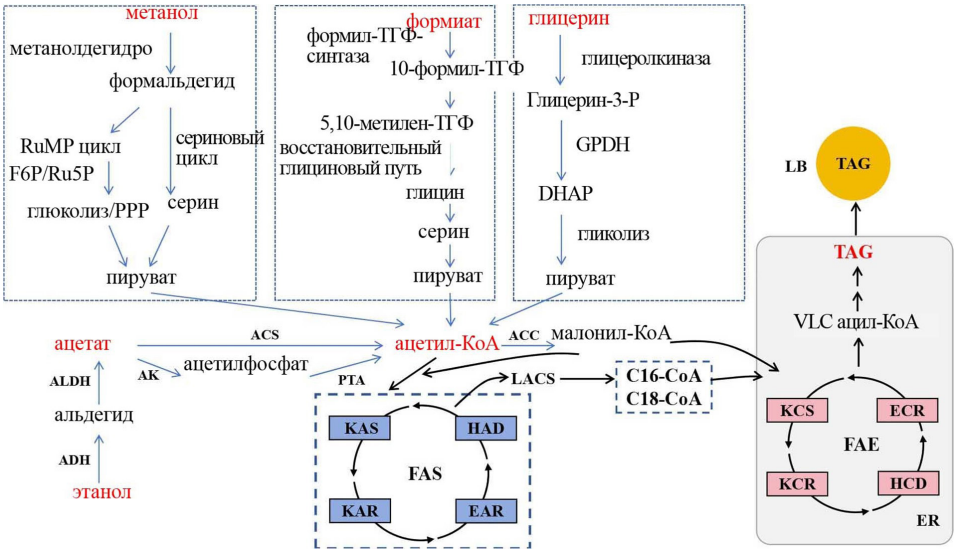


Рис. 1. Типичные метаболические пути синтеза микробных липидов из перспективных платформенных соединений. RuMP — рибулозомонофосфат; F6P — фруктозо-6-фосфат; Ru5P — рибулозо-5-фосфат; PPP — пентозофосфатный путь; THF — тетрагидрофолат; глицерол-3-P — глицерол-3-фосфат; GPDH — глицерол-3-фосфатдегидрогеназа; DHAP — дигидроксиацетонфосфат; ACS — ацетил-КоА-синтетаза; ALDH — альдегиддегидрогеназа; ADH — алкогольдегидрогеназа; AK — ацетаткиназа; PTA — фосфотрансацетилаза; ACC — ацетил-КоА-карбоксилаза; KAS — 3-кетоацил-ACP-синтаза; KAR — 3-кетоацил-ACP-редуктаза; EAR — 2-эноилацил-ACP-редуктаза; HAD — 3-гидроксиацил-ACP-дегидратаза; FAS — синтетаза жирных кислот; LACS — длинноцепочечная ацил-КоА-синтетаза; KCS — 3-кетоацил-КоА-синтетаза; KCR — 3-кетоацил-КоА-редуктаза; HCD — 3-гидроксиацил-КоА-дегидратаза; ECR — 2-эноил-КоА-редуктаза; VLC ацил-КоА — очень длинноцепочечный ацил-КоА; TAG — триацилглицерол; LB — липидное тело; ER — эндоплазматический ретикулум

отделить синтез биотоплива от использования сельскохозяйственных земель и способствует углерод-отрицательным процессам при интеграции данной технологии с утилизацией отходов или использованием CO_2.

Важным достоинством микробных масел являются их метаболические преимущества и разнообразие сырья. Масличные штаммы в условиях дефицита питательных веществ обеспечивают накопления липидов свыше 60% (от сухого веса клеток), а их метаболическая универсальность позволяет эффективно использовать различные непищевые субстраты. Использование для данного процесса промышленных побочных продуктов, таких как сырой глицерин и сточные воды с высоким содержанием ацетата, позволяют достичь рентабельности в краткосрочной перспективе, в то время как лигноцеллюлозные сахара и соединения С1 (например, зеленый метанол) обеспечивают долгосрочную экологичность, несмотря на их проблемы с толерантностью к ингибиторам. Еще больше повысить потенциальные возможности данного метода позволяет применение метаболической инженерии: например, модифицированные штаммы *Y. lipolytica*, сверхэкспрессирующие гены биосинтеза липидов, в 1,5-литровом биореакторе, содержащем 150 г/л сырого глицерина, достигают без детоксикации титров липидов 35 г/л и общего выхода триацилглицерола (TAG) 0,23 г/г в течение 84 часов. Важно, что полученные профили жирных кислот, преимущественно С16 и С18, подходят для каталитического улучшения до углеводородных компонентов, соответствующих требованиям SAF к низкотемпературной текучести, термической стабильности и энергетической плотности, что демонстрирует их большой потенциал.

Однако коммерциализации данного решения мешают технические и экономические проблемы. Эффективность синтеза липидов масличными микроорганизмами ограничена способностью утилизировать углеродные источники и жесткой регуляцией метаболизма. Теоретический выход липидов из глюкозы и ксилозы составляет примерно 0,32 г/г сахара и 0,34 г/г сахара соответственно, в то время как фактический выход обычно оказывается около 0,22 г липидов/г глюкозы. Для лигноцеллюлозных субстратов из-за действия таких факторов, как наличие побочных ингибирующих продуктов, содержание липидов в штамме *R. toruloides Y4* снижается по сравнению с синтетической средой примерно на 30 %. Кроме того, обеспечение общей экономической эффективности и сокращения выбросов углерода также сталкивается с серьезными проблемами. На основе технико-экономического анализа процесса производства SCO из гетеротрофных дрожжей с использованием глюкозы, полученной из кукурузы или сахарного тростника, в качестве субстратов для ферментации, минимальная цена продажи SCO рассчитывается в диапазоне от 2,4 до 5,8 $/кг (при этом более реалистичные сценарии соответствуют более высоким ценам в диапазоне от 4, 1–5,79 $/кг), что значительно выше текущих цен на растительные масла (около 1 $/кг). Кроме того, основная часть расходов, связанная с основным капиталом и энергоресурсами приходится на ферментацию, включая сырье, капитальные вложения и потребление электроэнергии. На этапе последующей переработки извлечение липидов из микроорганизмов часто ограничивается сопротивлением клеточной стенки, доступностью липидов и массопереносом. Судя по имеющимся данным, ни один из существующих методов не является полностью эффективным для экстракции микробных масел. Кроме того, для обработки нетрадиционных жирных кислот и соблюдения строгих требований к температуре замерзания при каталитической гидропереработке требуется применение специальных катализаторов, таких как сульфидированный $NiMo/Al_2O_3$. Оценки жизненного цикла также показывают, что выбросы парниковых газов при производстве масел SCO (7,2–11,6 кг CO_2-экв./кг масла) выше, чем при производстве растительных масел (3–5 кг CO_2-экв./кг), что объясняется, главным образом, энергоемкой стерилизацией и предварительной обработкой.

Для решения этих проблем предлагаются технологические инновации. Достижения в области реконструкции метаболических путей повышают выход липидов, а долгосрочная адаптивная эволюция создает устойчивые штаммы, пригодные для переработки сырья. Стратегии интенсификации процессов, такие как непрерывная ферментация в сочетании с экстракцией липидов на месте, могут смягчить ограничения массопереноса и снизить затраты. Одновременно с этим проводятся разработки катализаторов, устойчивых к примесям в микробных маслах, что потенциально может повысить эффективность модернизации. Все эти инновации в совокупности направлены на преодоление разрыва между достижениями лабораторных исследований и промышленной эффективностью.

Крупномасштабное производство микробного масла для его последующей переработки в SAF

Масштабируемое производство микробных масел для SAF требует многоуровневой стратегии использования сырья, согласованной с технологической зрелостью и потенциалом углеродной отрицательности. Промышленные побочные продукты, в частности сырой глицерин и сточные воды с высоким содержанием ацетата, могут быть проанализированы с целью их использования в качестве единственного углеродного субстрата для биосинтеза липидов и производства биодизельного топлива с помощью масличных микроорганизмов. Согласно расчетам, основанным на мелкомасштабных метаболических моделях, теоретический выход липидов из глицерина выше, чем из многих распространенных источников углерода, включая глюкозу, ксилозу, летучие жирные кислоты (VFAs) и глюкозамин (GlcN). Было оценено влияние различных примесей в сыром глицерине на производство липидов. В некоторых случаях определенные примеси даже повышали производство липидов. Прямое преобразование сырого глицерина становится возможным благодаря модифицированным штаммам, толерантным к примесям (например, солям, метанолу) без детоксикации. Кроме того, использование недорогих материалов для достижения высокого титра липидов имеет решающее значение для коммерческого успеха производства липидов. Сырой глицерин обычно поставляется в высоких концентрациях (65–85% по массе), что делает его подходящим источником углерода в культурах с добавлением питательной среды для достижения высоких титров липидов. Другим типом субстрата являются сточные воды с высоким содержанием уксусной кислоты, такие как продукты фазы подкисления некоторых систем анаэробного сбраживания. Некоторые аэробные масличные дрожжи эффективно используют уксусную кислоту, демонстрируя высокую метаболическую универсальность для этого источника углерода. Модифицированный штамм *Y. lipolytica* успешно используется для производства липидов и β-каротина из уксусной кислоты, демонстрируя толерантность к уксусной кислоте до 20 г/л. Кроме того, *Cryptococcus curvatus* может эффективно преобразовывать ацетат в липиды с выходом более 0,17 г/г за счет минимизации цитотоксичности уксусной кислоты путем контроля pH.

Долгосрочная экологичность достигается при использовании соединений C1 и лигноцеллюлозной биомассе с использованием углерод-отрицательных путей SAF. Метанол при его использовании в качестве субстрата для синтеза микробных масел имеет по сравнению, например, с уксусной кислотой, такие недостатки, как длинный метаболический путь, большой поток пути диссимиляции и низкую скорость преобразования углерода (Рис. 1). Хотя пути улавливания и утилизации углерода (CCU) в настоящее время очень дороги по сравнению с их ископаемыми аналогами, тем не менее был оценен абсолютный уровень устойчивости зеленого метанола из уловленного CO_2. Метанол может усваиваться метилотрофными дрожжами, такими как *Pichia pastoris*, через путь ксилулозы монофосфата (XuMP), что открывает возможность преобразования «метанола в липиды», хотя и ограниченную неэффективной регенерацией АТФ. Метаболическая инженерия *P. pastoris* улучшает поставку прескуров, регенерацию

кофакторов и усваивание метанола, что позволяет увеличить выход свободных жирных кислот из метанола до 23,4 г/л при одновременном снижении накопления токсичного формальдегида.

Метан, особенно производимый из биогаза или в процессах преобразования электроэнергии в газ, представляет собой еще одну недорогую альтернативу С1. Микробные липиды, производимые метанотрофами во время аэробного культивирования, могут служить сырьем для процессов гидроочистки с целью производства возобновляемого дизельного топлива. Несмотря на потенциал метана как недорогого субстрата для сокращения выбросов углерода, эта технология по-прежнему сталкивается с рядом препятствий, таких как низкая растворимость метана, приводящая к низкой эффективности массопереноса, низкие темпы роста микроорганизмов, ограниченное накопление нативных липидов и присущая ему воспламеняемость, создающая значительные риски для безопасности процесса. Бактерия *Methylomicrobium buratense*, питающаяся метаном, характеризуется интенсивным ростом и высоким содержанием липидов. Исследования этой бактерии в основном сосредоточены на увеличении производства жирных кислот и липидов с помощью генетических инструментов. Существующие исследования позволили увеличить содержание липидов на 90% за счет ограничения пути биосинтеза гликогена, хотя накопление липидов при этом по-прежнему не превышает 10% от сухого веса. Несмотря на то, что масштабирование этого процесса все еще требует оптимизации энергопотребления и обеспечения стабильности процесса, «превращение метана в нефть» также является многообещающим путем для производства экологически устойчивого топлива.

Лигноцеллюлозная биомасса, такая как солома и стебли кукурузы, является богатым источником непищевого углерода, но требует предварительной обработки, которая представляющей собой сложную задачу. Лигноцеллюлозные биоперерабатывающие заводы, использующие такие методы предварительной обработки, как паровой взрыв, применение разбавленной кислоты, ферментативный гидролиз и биологическая детоксикация, могут преобразовывать сельскохозяйственные отходы в ферментируемые сахара, хотя энергоемкая предварительная обработка остается препятствием для коммерческого масштабирования данного процесса. В настоящее время преобразование кукурузной соломы (CS) в микробные липиды было полностью проверено в пилотном масштабе. Липиды были получены из CS посредством ферментации *R. toruloides* CGMCC 2.1389 в биореакторе объемом 1000 л. После таких процессов, как щелочная предварительная обработка, ферментативный гидролиз, подготовка гидролизатов, культивирование клеток и извлечение липидов, усвояемость CS может достигать 90%, а выход липидов из гидролизата CS составляет 0,17 г/г от общего количества восстанавливающего сахара. Индустриализация производства микробного масла на основе лигноцеллюлозы по-прежнему требует прорывов в снижении затрат на предварительную обработку и устранении узких мест в интеграции систем для поддержки цепочек поставок SAF.

В конечном итоге, при выборе сырья необходимо найти баланс между углеродной эффективностью и возможностью интеграции процесса (Рис. 2). Хотя сырой глицерин обеспечивает рентабельность в краткосрочной перспективе, зеленый метанол и лигноцеллюлоза позволяют добиться более глубокой декарбонизации. Решающее значение для снижения затрат на производство SAF и обеспечения соответствия спецификациям ASTM D7566 будет иметь прямое микробиологическое преобразование потоков сырья в сочетании с точной инженерией липидов.

Каталитическое преобразование микробных масел в SAF

Переработка микробных липидов для получения SAF осуществляется, в основном, по схеме HEFA (Рис. 3) и включает в себя следующие последовательные этапы: гидродезоксигенирование

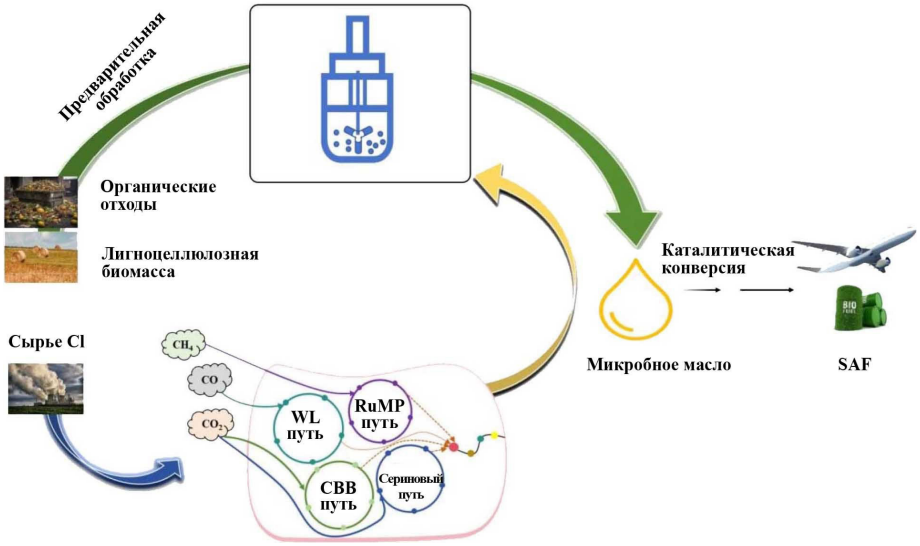


Рис. 2. Схема получения SAF из микробных масел на основе возобновляемых ресурсов.
CBB, цикл Кальвина-Бенсона-Бассама; RuMP, рибулозомонофосфат; WL, путь Вуда-Льюнгдаля

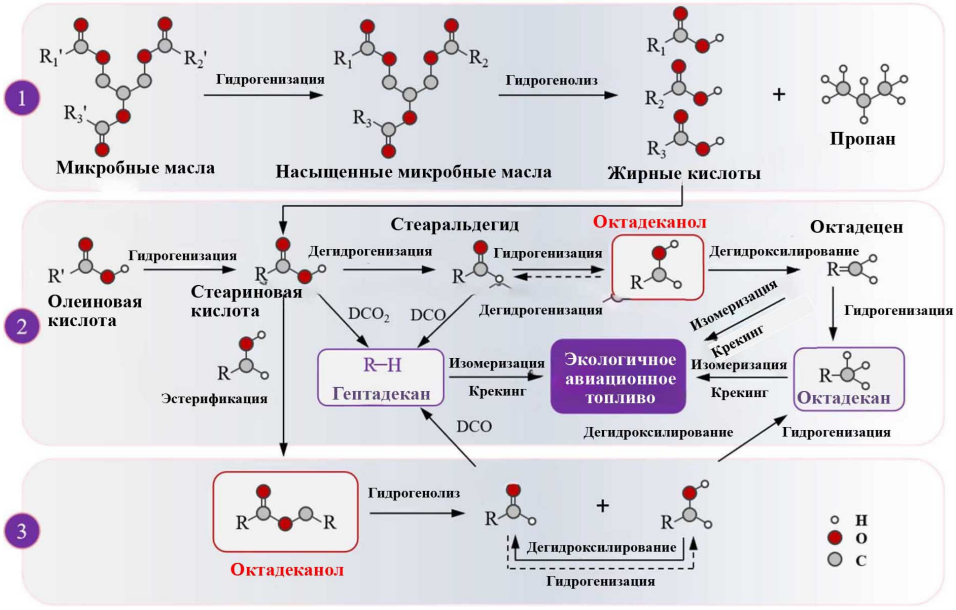


Рис. 3. Типичные пути конверсии гидропереработки микробного масла для производства SAF.
DCO — декарбонилирование; DCO_2 — декарбоксилирование

(HDO) с образованием линейных н-алканов (C15-C18), изомеризация и селективный крекинг с получением изоалканов с желаемой длиной цепи (C8-C16), пригодных для получения SAF. Конечные продукты должны соответствовать требованиям авиационных стандартов по температуре замерзания и свойствам горения.

Преобразование HDO в основном зависит от металлических катализаторов, в том числе на основе драгоценных и недрагоценных металлов. Катализаторы на основе драгоценных металлов, таких как платина (Pt) и палладий (Pd), демонстрируют превосходную производительность в каскадных реакциях гидродезоксигенации-изомеризации, особенно при их нанесении на

кислотные цеолиты (например, SAPO-11, ZSM-5) или мезопористый оксид алюминия. Выход SAF в мягких условиях (250-350 °C, 20-50 бар H_2) при оптимальном разветвлении (соотношение изо/н-алканов ~3:1) может превышать 70%. Биметаллические системы (например, Pt-Pd, Pt-Re) дополнительно повышают стабильность, подавляя спекание металлов и образование кокса. Несмотря на высокую стоимость драгоценных металлов, они могут проявлять хорошие каталитические свойства при небольших нагрузках (обычно ≤5% по массе).

Перспективными кандидатами для этого каталитического процесса стали катализаторы на основе недрагоценных металлов, таких как Ni, Co и Mo. Ni является наиболее широко применяемым металлом для HDO липидов. Образование биметаллического NiAg на носителе SAPO-11 позволило за счет точно настроенных каскадов HDO-изомеризации при 380–420°C и давлении H_2 30–58 бар достичь выхода SAF до 84%. Недостатки таких катализаторов проявляются в нескольких аспектах. Во-первых, это относительно более низкая реакционная способность HDO, чем при использовании драгоценных металлов, что требует жестких условий реакции, таких как температура реакции выше 380 °C. Приемлемым решением может быть внедрение в систему вакансий кислорода или кислотных центров. Другим недостатком является то, что катализаторы на основе никеля склонны к выщелачиванию и агрегации. Для преодоления этих слабых сторон исследователи предложили стратегию обертывания металлических центров графеноподобными углеродными слоями или использование частично окисленной подложки Mo2CTx MXene.

Решающую роль в модернизации, особенно для последующих реакций изомеризации и крекинга играет подложка из цеолита. Стратегия выбора цеолитов включает два критических параметра: архитектуру пор и кислотность. Цеолиты со средними порами (10-членные кольца с каналами 4,4–6,7 Å) демонстрируют оптимальную производительность разветвленных алканов (C15-C18) за счет баланса молекулярной диффузии и селективной изомеризации. Разработанные иерархические цеолиты с мезопорами способны смягчить ограничения диффузии как для реагентов, так и для продуктов. Еще одним важным аспектом цеолита является то, что плотность кислоты и ее крепость должны быть точно настроены, чтобы способствовать гидроизомеризации, а не чрезмерному крекингу. Кроме того, при наличии достаточно сильных центров Бронстеда один из важнейших компонентов SAF — ароматические соединения — может быть синтезирован путем гидропереработки липидов.

Что касается процесса гидроочистки, то для производства SAF обычно используются два типа процессов: одноступенчатый и двухступенчатый. В одноступенчатом процессе гидропереработка липидов (например, HDO, изомеризация и крекинг) интегрирована в один каталитический реактор, использующий многофункциональные катализаторы. Это позволяет напрямую преобразовывать липиды в изоалканы (C8-C16). Хотя этот подход снижает сложность оборудования и потребление энергии, он сталкивается с проблемами в обеспечении баланса для конкурирующих кинетик реакций, что обычно приводит к более высокому образованию побочных продуктов в газовой фазе и, следовательно, к снижению выхода SAF. Напротив, двухступенчатый процесс разделяет HDO и изомеризацию/крекинг на последовательные этапы. На первом этапе HDO с металлическими катализаторами позволяет получать линейные н-алканы (C15-C18). На втором этапе происходит изомеризация на катализаторах Pt/SAPO-11 или Pd/ZSM-5, приводящая к разветвлению и регулировки длины цепей в соответствии с авиационными спецификациями. Эта модульная стратегия повышает селективность (выход SAF ≥80%) и облегчает контроль качества продукции, но увеличивает эксплуатационные расходы.

В настоящее время каталитическое преобразование микробного масла в SAF по-прежнему сталкивается с двумя основными проблемами. Первая из них — деактивация катализатора из-за выщелачивания и агрегации активного металла, а также коксование цеолита. Наличие

в низкокачественном сырье таких примесей, как азот, фосфор, свободные жирные кислоты и вода, приводит к более серьезной деактивации, что особенно сказывается для катализаторов на основе никеля. Вторая проблема — конкурирующие реакционные пути и, как следствие, меньшая эффективность HDO, изомеризации и селективного крекинга. Обычные бифункциональные катализаторы в одностадийном процессе с трудом достигают одновременно >90% деоксигенации и >60% выхода изоалканов SAF. Требуются специальные усилия для изготовления более дешевого, более активного и стабильного катализатора, позволяющего обеспечивать длительную гидрообработку в относительно более мягких условиях. Это позволило бы снизить общие эксплуатационные расходы и в то же время гарантировать высокий выход SAF.

Перспективы

Переход к промышленному производству SAF на основе микробного масла требует обеспечения баланса между экономической целесообразностью и экологической устойчивостью, достигаемого посредством поэтапных стратегий использования сырья. В ближайшей перспективе приоритет должен быть отдан преобразованию на месте доступных на местном уровне промышленных побочных продуктов, таких как сырой глицерин, полученный из биодизельных установок, и вода с высоким содержанием уксусной кислоты, с упором на оптимизацию логистики для уменьшения углеродного следа. Однако долгосрочная устойчивость зависит от развития технологий преобразования лигноцеллюлозной биомассы и использования потенциала C1-газа, при этом особенно перспективным сырьем становится зеленый метанол. Решающее значение для эффективного перехода от инноваций в лабораторных условиях к крупномасштабным промышленным применениям имеют такие политические факторы, как мандат ReFuelEU для авиации (70% SAF к 2050 году) и механизмы углеродной премии, в сочетании с передовыми биотехнологиями для оптимизации штаммов и процессов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] IEA. Tracking transport 2020, IEA: Paris, 2020.

[2] **Jing L., El-Houjeiri H.M., Monfort J.C., et al.** Understanding variability in petroleum jet fuel life cycle greenhouse gas emissions to inform aviation decarbonization [J]. Nat Commun, 2022, 13(1):7853.

[3] IATA. Net zero 2050: sustainable aviation fuels, 2024.

[4] **Watson M.J., Machado P.G., da Silva A.V., et al.** Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: A critical review [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 449:141472.

[5] **Fargione J., Hill J., Tilman D., et al.** Land clearing and the biofuel carbon debt [J]. Science, 2008, 319(5867):1235-1238.

[6] International A. ASTM standard D7566, standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons, 2018 West Conshohocken, PA, 2018.

[7] ASTM. Standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons [J]. 2022.

[8] **Chiriacò M.V., Galli N., Santini M., et al.** Deforestation and greenhouse gas emissions could arise when replacing palm oil with other vegetable oils [J]. Science of The Total Environment, 2024, 914:169486.

[9] **Dreoni I., Matthews Z., Schaafsma M.** The impacts of soy production on multi-dimensional well-being and ecosystem services: a systematic review [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 335:130182.

[10] **Robles-Iglesias R., Naveira-Pazos C., Fernández-Blanco C., et al.** Factors affecting the optimisation and scale-up of lipid accumulation in oleaginous yeasts for sustainable biofuels production [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 171:113043.

[11] **Li Y., Zhao Z., Bai F.** High-density cultivation of oleaginous yeast Rhodosporidium toruloides Y4 in fed-batch culture [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2007, 41(3):312-317.

[12] **Tomás-Pejó E., Morales-Palomo S., González-Fernández C.** Microbial lipids from organic wastes: Outlook and challenges [J]. Bioresource Technology, 2021, 323:124612.

[13] **Shields-Menard S.A., Amirsadeghi M., French W.T., et al.** A review on microbial lipids as a potential biofuel [J]. Bioresource Technology, 2018, 259:451-460.

[14] **Palazzolo M.A., Garcia-Perez M.** Microbial lipid biosynthesis from lignocellulosic biomass pyrolysis products [J]. Biotechnology Advances, 2022, 54:107791.

[15] **Jin M., Slininger P.J., Dien B.S., et al.** Microbial lipid-based lignocellulosic biorefinery: feasibility and challenges [J]. Trends in Biotechnology, 2015, 33(1):43-54.

[16] **Taccari M., Canonico L., Comitini F., et al.** Screening of yeasts for growth on crude glycerol and optimization of biomass production [J]. Bioresource Technology, 2012, 110:488-495.

[17] **Robles-Iglesias R., Nicaud J-M., Veiga M.C., et al.** Integrated fermentative process for lipid and β-carotene production from acetogenic syngas fermentation using an engineered oleaginous Yarrowia lipolytica yeast [J]. Bioresource Technology, 2023, 389:129815.

[18] **Lv X., Yu W., Zhang C., et al.** C1-based biomanufacturing: Advances, challenges and perspectives [J]. Bioresource Technology, 2023, 367:128259.

[19] **Zhang B., Khushik F.A., Zhan B., et al.** Transformation of lignocellulose to starch-like carbohydrates by organic acid-catalyzed pretreatment and biological detoxification [J]. Biotechnol Bioeng, 2021, 118(10):4105-4118.

[20] **Qiao K., Imam Abidi S.H., Liu H., et al.** Engineering lipid overproduction in the oleaginous yeast Yarrowia lipolytica [J]. Metabolic Engineering, 2015, 29:56-65.

[21] **Lopes da Silva T., Dutra F., Marques S., et al.** Production of sustainable aviation fuel precursors using the oleaginous yeast Rhodotorula toruloides PYCC 5615 cultivated on eucalyptus bark hydrolysate [J]. Biomass and Bioenergy, 2025, 197:107790.

[22] **Papanikolaou S., Aggelis G.** Lipids of oleaginous yeasts. Part I: Biochemistry of single cell oil production [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2011, 113(8):1031-1051.

[23] **Xie H., Shen H., Gong Z., et al.** Enzymatic hydrolysates of corn stover pretreated by a N-methylpyrrolidone–ionic liquid solution for microbial lipid production [J]. Green Chemistry, 2012, 14(4):1202-1210.

[24] **Bonatsos N., Marazioti C., Moutousidi E., et al.** Techno-economic analysis and life cycle assessment of heterotrophic yeast-derived single cell oil production process [J]. Fuel, 2020, 264:116839.

[25] **Koutinas A.A., Chatzifragkou A., Kopsahelis N., et al.** Design and techno-economic evaluation of microbial oil production as a renewable resource for biodiesel and oleochemical production [J]. Fuel, 2014, 116:566-577.

[26] **Timotheo C.A., Fabricio M.F., Ayub M.A.Z., et al.** Evaluation of cell disruption methods in the oleaginous yeasts Yarrowia lipolytica QU21 and Meyerozyma guilliermondii BI281A for microbial oil extraction [J]. An Acad Bras Cienc, 2023, 95(4):e20191256.

[27] **Ageitos J.M., Vallejo J.A., Veiga-Crespo P., et al.** Oily yeasts as oleaginous cell factories [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2011, 90(4):1219-1227.

[28] **Ochsenreither K., Glück C., Stressler T., et al.** Production strategies and applications of microbial single cell oils [J]. Front Microbiol, 2016, 7:1539.

[29] **Puello-Polo E., Arias D., Márquez E.** Al_2O_3-MgO supported Ni, Mo, and NiMo mixed phosphidic-sulphidic phase for hydrotreating of stearic and oleic acids into green diesel [J]. Front Chem, 2022, 10:880051.

[30] **Praikaew W., Chuseang J., Prameswari J., et al.** Direct production of sustainable aviation fuel by deoxygenation and isomerization of triglycerides over bifunctional Ir–ReOx/SAPO-11 catalyst [J]. ChemPlusChem, 2024, 89(9):e202400075.

[31] **Kumar L.R., Yellapu S.K., Tyagi R.D., et al.** Microbial lipid and biodiesel production from municipal sludge fortified with crude glycerol medium using pH-based fed-batch strategy [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(1):105032.

[32] **Abomohra AE-F., Eladel H., El-Esawi M., et al.** Effect of lipid-free microalgal biomass and waste glycerol on growth and lipid production of Scenedesmus obliquus: Innovative waste recycling for extraordinary lipid production [J]. Bioresource Technology, 2018, 249:992-999.

[33] **Proietti Tocca G., Agostino V., Menin B., et al.** Mixotrophic and heterotrophic growth of microalgae using acetate from different production processes [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2024, 23(1):93-132.

[34] **Zhou W., Wang Y., Zhang J., et al.** A metabolic model of Lipomyces starkeyi for predicting lipogenesis potential from diverse low-cost substrates [J]. Biotechnology for Biofuels, 2021, 14(1):148.

[35] **Tang M., Wang Y., Zhou W., et al.** Efficient conversion of chitin-derived carbon sources into microbial lipid by the oleaginous yeast Cutaneotrichosporon oleaginosum [J]. Bioresource Technology, 2020, 315:123897.

[36] **Kumar L.R., Yellapu S.K., Yan S., et al.** Elucidating the effect of impurities present in different crude glycerol sources on lipid and citric acid production by Yarrowia lipolytica SKY7 [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2021, 96(1):227-240.

[37] **Gao Z., Ma Y., Wang Q., et al.** Effect of crude glycerol impurities on lipid preparation by Rhodosporidium toruloides yeast 32489 [J]. Bioresource Technology, 2016, 218:373-379.

[38] **Kumar L.R., Yellapu S.K., Tyagi R.D., et al.** Cost, energy and GHG emission assessment for microbial biodiesel production through valorization of municipal sludge and crude glycerol [J]. Bioresource Technology, 2020, 297:122404.

[39] **Sarantou S., Stoforos N.G., Kalantzi O., et al.** Biotechnological valorization of biodiesel-derived glycerol: Trials with the non-conventional yeasts Yarrowia lipolytica and Rhodosporidium sp. [J]. Carbon Resources Conversion, 2021, 4:61-75.

[40] **Chebbi H., Leiva-Candia D., Carmona-Cabello M., et al.** Biodiesel production from microbial oil provided by oleaginous yeasts from olive oil mill wastewater growing on industrial glycerol [J]. Industrial Crops and Products, 2019, 139:111535.

[41] **Mata-Alvarez J., Dosta J., Romero-Güiza M.S., et al.** A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013 [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 36:412-427.

[42] **Robles-Iglesias R., Nicaud J.M., Veiga M.C., et al.** Integrated fermentative process for lipid and β-carotene production from acetogenic syngas fermentation using an engineered oleaginous Yarrowia lipolytica yeast [J]. Bioresour Technol, 2023, 389:129815.

[43] **Park Y-K., Nicaud J-M., Ledesma-Amaro R.** The engineering potential of Rhodosporidium toruloides as a workhorse for biotechnological applications [J]. Trends in Biotechnology, 2018, 36(3):304-317.

[44] **Liu Jn., Huang X., Chen R., et al.** Efficient bioconversion of high-content volatile fatty acids into microbial lipids by Cryptococcus curvatus ATCC 20509 [J]. Bioresource Technology, 2017, 239:394-401.

[45] **Berrios J., Theron C.W., Steels S., et al.** Role of dissimilative pathway of Komagataella phaffii (Pichia pastoris): formaldehyde toxicity and energy metabolism [J]. Microorganisms, 2022, 10(7):1466.

[46] **González-Garay A., Frei M.S., Al-Qahtani A., et al.** Plant-to-planet analysis of CO_2-based methanol processes [J]. Energy & Environmental Science, 2019, 12(12):3425-3436.

[47] **Guo F., Qiao Y., Xin F., et al.** Bioconversion of C1 feedstocks for chemical production using Pichia pastoris [J]. Trends Biotechnol, 2023, 41(8):1066-1079.

[48] **Cai P., Wu X., Deng J., et al.** Methanol biotransformation toward high-level production of fatty acid derivatives by engineering the industrial yeast Pichia pastoris [J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2022, 119(29):e2201711119.

[49] **Sunde K., Brekke A., Solberg B.** Environmental impacts and costs of hydrotreated vegetable oils, transesterified lipids and woody BTL—a review [J]. Energies, 2011, 4(6):845-877.

[50] **Strong P.J., Xie S., Clarke W.P.** Methane as a resource: can the methanotrophs add value? [J]. Environ Sci Technol, 2015, 49(7):4001-4018.

[51] **Gilman A., Laurens L.M., Puri A.W., et al.** Bioreactor performance parameters for an industrially-promising methanotroph Methylomicrobium buryatense 5GB1 [J]. Microbial Cell Factories, 2015, 14(1):182.

[52] **Fei Q., Puri A.W., Smith H., et al.** Enhanced biological fixation of methane for microbial lipid production by recombinant Methylomicrobium buryatense [J]. Biotechnology for Biofuels, 2018, 11(1):129.

[53] **Mosier N., Wyman C., Dale B., et al.** Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass [J]. Bioresource Technology, 2005, 96(6):673-686.

[54] **Huang Q., Kamal R., Shen H., et al.** Pilot-scale conversion of corn stover into lipids by the red yeast Rhodosporidium toruloides [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(6):108858.

[55] **Gutierrez A., Turpeinen E-M., Viljava T-R., et al.** Hydrodeoxygenation of model compounds on sulfided CoMo/γ-Al_2O_3 and NiMo/γ-Al_2O_3 catalysts; role of sulfur-containing groups in reaction networks [J]. Catalysis Today, 2017, 285:125-134.

[56] **Xing S., Fu J., Li M., et al.** Emerging catalysis in solvent-free hydrodeoxygenation of waste lipids under mild conditions: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 200:114459.

[57] **Žula M., Grilc M., Likozar B.** Hydrocracking, hydrogenation and hydro-deoxygenation of fatty acids, esters and glycerides: Mechanisms, kinetics and transport phenomena [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 444:136564.

[58] **Yang H., Du X., Lei X., et al.** Unraveling enhanced activity and coke resistance of Pt-based catalyst in bio-aviation fuel refining [J]. Appl Energ, 2021, 301:117469.

[59] **Martinez-Klimov M., Mäki-Arvela P., Çiftçi A., et al.** Bifunctional Pt−Re catalysts in hydrodeoxygenation of isoeugenol as a model compound for renewable jet fuel production [J]. ACS Engineering Au, 2022, 2(5):436-449.

[60] **Kordulis C., Bourikas K., Gousi M., et al.** Development of nickel based catalysts for the transformation of natural triglycerides and related compounds into green diesel: a critical review [J]. Appl Catal B: Environ, 2016, 181:156-196.

[61] **Chen B., Zhou Z., Li Y., et al.** Catalytic pyrolysis of fatty acids and oils into liquid biofuels and chemicals over supported Ni catalysts on biomass-derived carbon [J]. Appl Catal B: Environ, 2023, 338:123067.

[62] **Lin C-H., Wang W-C.** Direct conversion of glyceride-based oil into renewable jet fuels [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 132:110109.

[63] **Xing S.Y., Liu Y., Liu X.C., et al.** Solvent-free hydrodeoxygenation of bio-lipids into renewable alkanes over NiW bimetallic catalyst under mild conditions [J]. Appl Catal B: Environ, 2020, 269.

[64] **Li D-C., Pan Z., Tian Z., et al.** Frustrated Lewis pair catalyst realizes efficient green diesel production [J]. Nature Communications, 2024, 15(1):3172.

[65] **Li M., Fu J., Lv P., et al.** ZSM-5-supported graphene-encapsulated nickel nanoparticles: formation, properties, and exceptional performance in lipid hydrogenation [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(41):15484-15495.

[66] **Liang J., Chen T., Liu J., et al.** Chemoselective hydrodeoxygenation of palmitic acid to diesel-like hydrocarbons over Ni/MoO_2@Mo_2CT_x catalyst with extraordinary synergic effect [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 391:123472.

[67] **Torres-Bujalance V., Prieto C.A., Rodriguez Espinoza K.E., et al.** Production of biofuels from hydrodeoxygenation and hydroisomerization of triglycerides with metal-supported SAPO-11 molecular sieves [J]. Energy & Fuels, 2024, 38(5):4312-4324.

[68] **Ma B., Yi X., Chen L., et al.** Interconnected hierarchical HUSY zeolite-loaded Ni nano-particles probed for hydrodeoxygenation of fatty acids, fatty esters, and palm oil [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2016, 4(29):11330-11341.

[69] **Xing S., Lv P., Wang J., et al.** One-step hydroprocessing of fatty acids into renewable aromatic hydrocarbons over Ni/HZSM-5: insights into the major reaction pathways [J]. Phys Chem Chem Phys, 2017, 19(4):2961-2973.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЦЗЮАНЬЦЗЮАНЬ Су – *доцент Ключевой лаборатория фотоэлектрического преобразования и использования солнечной энергии, Лаборатория новых источников энергии в Циндао (провинция Шаньдун) Института биоэнергетики и биотехнологических процессов в Циндао Китайской академии наук.*

ШИЮ Син – *доцент Гуанчжоуского института преобразования энергии Китайской академии наук.*

ВЭЙ Ци – *профессор факультета энергетических наук и инженерии Китайского университета науки и технологий.*

ШИАНЬ Ван – *профессор Ключевой лаборатории фотоэлектрического преобразования и использования солнечной энергии, Лаборатория новых источников энергии в Циндао (провинция Шаньдун) Института биоэнергетики и биотехнологических процессов в Циндао Китайской академии наук.*

Глобальная энергия. Том 32, № 3, 2026. С. 31–42.
Global Energy, 2026, 32 (3); 31–42.

Научная статья
УДК 621.315.687.24
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32303

В.И. Красников-Вербников ✉ ,
Г.В. Грешняков, Е.А. Чесноков, Е.В. Дружинин

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

✉ krasnikov_vi@spbstu.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГЛАЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ИЗОЛЯЦИИ КОНЦЕВОЙ МУФТЫ 110 КВ

Аннотация. В статье приведен анализ традиционной схемы замещения концевой кабельной муфты класса 110 кВ, по итогам которого была предложена новая (модифицированная) схема замещения для современных конструкций концевых кабельных муфт, основанная на емкостном методе снижения неравномерности распределения электрического поля в усиленной изоляции кабельной муфты с условием обязательного заземления управляющего электрода (рефлектора). В основе предлагаемой модификации схемы замещения кабельной разделки, являющейся составной частью усиленной изоляции муфты, лежит моделирование изоляционных слоев в виде резистивно-емкостных цепочек (RC-элементов). Проведено сравнение результатов расчета электрического поля в усиленной изоляции муфты с использованием предложенной схемы замещения и численного расчета поля в изоляции реальной конструкции муфты в среде Comsol Multiphysics. Предложенная схема замещения может быть применена в инженерных расчетах для определения распределения напряженности электрического поля в изоляции концевых и соединительных кабельных муфт среднего и высокого напряжения, а также при проектировании новых конструкций кабельной арматуры.

Ключевые слова: концевая муфта, схема замещения, композитные материалы, метод конечных элементов, емкостной метод.

Для цитирования:

Красников-Вербников В.И., Грешняков Г.В., Чесноков Е.А., Дружинин Е.В. Моделирование процесса сглаживания электрического поля в изоляции концевой муфты 110 кВ // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 3. С. 31–42. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32303

© Красников-Вербников В.И., Грешняков Г.В., Чесноков Е.А., Дружинин Е.В., 2026. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32303

V.I. Krasnikov-Verbnikov ✉ ,
G.V. Greshnyakov, E.A. Chesnokov, E.V. Druzhinin
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
✉ krasnikov_vi@spbstu.ru

MODELING OF THE ELECTRIC FIELD SMOOTHING PROCESS IN THE INSULATION OF A 110 KV CABLE TERMINAL

Abstract. The article presents an analysis of the traditional equivalent circuit of a 110 kV cable termination, on the basis of which a new (modified) equivalent circuit has been proposed for modern designs of cable terminations. This circuit is based on the capacitive method for reducing the non-uniformity of the electric field distribution in the reinforced insulation of a cable termination, with the mandatory condition of grounding the control electrode (reflector). The proposed modification of the equivalent circuit of the cable termination, which constitutes an integral part of the reinforced insulation of the termination, is based on modelling the insulating layers as resistive-capacitive elements. A comparison has been made between the results of calculating the electric field in the reinforced insulation of the termination using the proposed equivalent circuit and a numerical calculation of the field in the insulation of a real termination design in the Comsol Multiphysics environment. The proposed equivalent circuit can be applied in engineering calculations to determine the distribution of electric field strength in the insulation of terminations and straight-through joints of medium- and high-voltage cables, as well as in the design of new cable accessory structures.

Keywords: cable terminal, equivalent circuit, composite materials, FEM, capacitive method.

Citation:

Krasnikov-Verbnikov V.I., Greshnyakov G.V., Chesnokov E.A., Druzhinin E.V., Modeling of the electric field smoothing process in the insulation of a 110 kV cable terminal, Global Energy, 32 (03) (2026) 31–42, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32303

Введение. Для подключения кабелей высокого напряжения к оборудованию или соединения строительных длин между собой необходимо использование концевых и соединительных муфт соответственно. Для повышения эффективности снижения неравномерности распределения поля в муфтах высокого напряжения используется усиленная изоляция, которая выполняется в виде стресс-конуса, реализующего емкостной метод сглаживания электрического поля [1, 2]. Стресс-конус состоит из двух основных частей: тела и рефлектора (дефлектора в случае соединительных муфт). В рамках емкостного метода существует два способа регулирования поля в изоляции муфты: рефракционный (связан с телом муфты) и геометрический (связан с рефлектором) [1, 2]. Используя эти способы, можно управлять распределением поля в муфте (разницей результирующих токов на жилу и на землю) и тем самым формировать оптимальную конструкцию усиливающей изоляции. Чтобы оценить разрабатываемую конструкцию еще до этапа создания опытного образца, необходимы теоретические (численные) модели и универсальные алгоритмы для оценки эффективности сглаживания электрического поля (снижения его тангенциальной составляющей).

В статье предложен вариант схемы замещения современной концевой кабельной муфты класса 110 кВ, в которой рефлектор выполнен из полупроводящего материала и имеет потенциал, близкий к потенциалу земли. Формирование схемы замещения опирается на построенную

© Krasnikov-Verbnikov V.I., Greshnyakov G.V., Chesnokov E.A., Druzhinin E.V., 2026. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

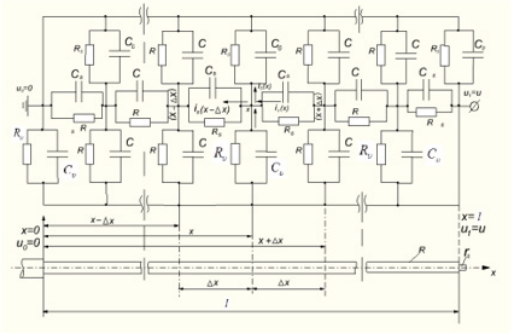


Рис. 1. Схема замещения кабельной разделки [3]
Fig. 1. Cable cutting equivalent circuit [3]

схему замещения кабельной разделки, представленную в статье Л.Г. Шварцмана [3]. В схеме замещения изоляция представлена резистивно-емкостными цепочками (RC-элементами), расположенными как последовательно, так и параллельно (рис. 1).

Методика разработки схемы замещения

В случае современной конструкции кабельной муфты необходимо выделить элементы, формирующие емкости относительно жилы и земли [4, 5]. Так как рефлектор, внедренный в стресс-конус, имеет нулевой потенциал, емкости всех элементов между рефлектором и жилой составляют общую емкость на жилу и влияют на ток, протекающий через изоляцию кабеля к жиле, в то время как емкости элементов, расположенных между рефлектором и внешним изолятором муфты, составляют емкость на землю и влияют на ток через изоляцию муфты к земле [1–3, 6–7]. Разрез кабельной муфты представлен на рис. 2.

На данном разрезе видно, что стресс-конус имеет сложную геометрию. Для упрощения задачи рассмотрим сечение в заранее выбранной плоскости, а именно в точках наивысшей напряженности поля, которые ранее были обозначены в [1]. Областям заданных зон дадим понятие разделки. Рассматриваться будет зона А (красный прямоугольник на рис. 3) с наивысшей напряженностью на стыке изоляции токопроводящей жилы (ТПЖ), полупроводящего экрана по изоляции ТПЖ и тела стресс-конуса. Тогда уточненная схема замещения для выбранного сечения имеет вид, приведенный на рис. 4.

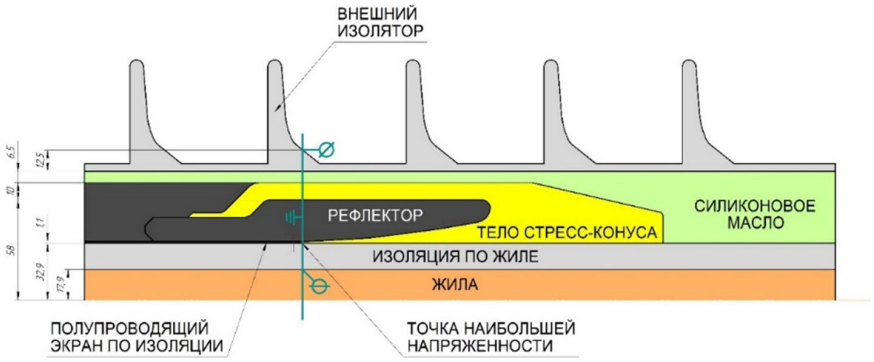


Рис. 2. Геометрическая модель концевой кабельной муфты
Fig. 2. Geometric model of the cable terminal

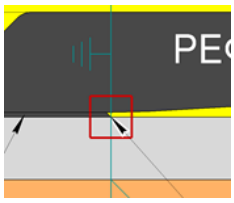


Рис. 3. Зона А повышенной напряженности
Fig. 3. Zone A of high electric intensity

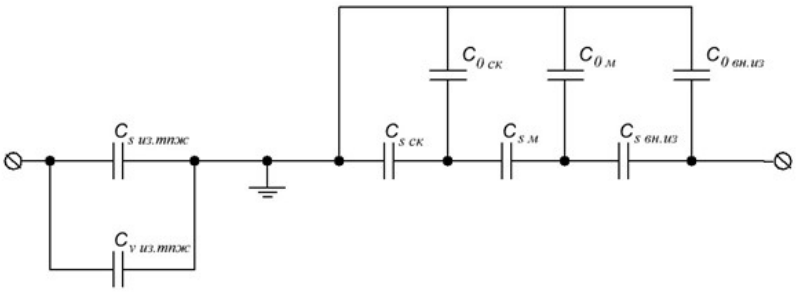


Рис. 4. Схема замещения кабельной муфты
Fig. 4. Cable terminal equivalent circuit

На данном рисунке:
$C_{s\ из.тпж}$ – продольная емкость изоляции ТПЖ, Ф;
$C_{v\ из.тпж}$ – емкость изоляции ТПЖ по отношению к жиле, Ф;
$C_{s\ ск}$ – продольная емкость тела стресс-конуса, Ф;
$C_{s\ м}$ – продольная емкость масла, Ф;
$C_{s\ вн.из}$ – продольная емкость внешнего изолятора, Ф;
$C_{0\ ск}$ – емкость тела стресс-конуса по отношению к земле, Ф;
$C_{0\ м}$ – емкость масла по отношению к земле, Ф;
$C_{0\ вн.из}$ – емкость внешнего изолятора по отношению к земле, Ф.

Важно заметить, что расчет по формулам рассматривается на единицу длины. Используя данную схему замещения, были вычислены соответствующие емкости по следующим формулам [3, 8, 9]:

$$C_{S\,ск} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{ск} \cdot \left[\left(r_a + d_{ск} \right)^2 - r_a^2 \right]}{l}; \quad (1)$$

$$C_{S\,м} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{м} \cdot \left[\left(r_a + d_{ск} + d_{м} \right)^2 - \left(r_a + d_{ск} \right)^2 \right]}{l}; \quad (2)$$

$$C_{S\,вн.из} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{вн.из} \cdot \left[\left(r_a + d_{ск} + d_{м} + d_{вн.из} \right)^2 - \left(r_a + d_{ск} + d_{м} \right)^2 \right]}{l}; \quad (3)$$

$$C_{S\,из.тпж} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{из.тпж} \cdot \left[r_{из.тпж}^2 - r_0^2 \right]}{l}; \quad (4)$$

$$C_{0\,ск} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{ск} \cdot l}{\ln\left(\frac{r_a + d_{ск}}{r_a} \right)}; \quad (5)$$

$$C_{0\,м} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{м} \cdot l}{\ln\left(\frac{r_a + d_{ск} + d_{м}}{r_a + d_{ск}} \right)}; \quad (6)$$

$$C_{0\,вн.из} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{вн.из} \cdot l}{\ln\left(\frac{r_a + d_{ск} + d_{м} + d_{вн.из}}{r_a + d_{ск} + d_{м}} \right)}; \quad (7)$$

$$C_{\nu\,из.тпж} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{из.тпж} \cdot l}{\ln\left(\frac{r_{из.тпж}}{r_0} \right)}, \quad (8)$$

где $\varepsilon_{ск}$ – диэлектрическая проницаемость тела стресс-конуса; $\varepsilon_{м}$ – диэлектрическая проницаемость масла; $\varepsilon_{вн.из}$ – диэлектрическая проницаемость внешнего изолятора; $\varepsilon_{из.тпж}$ – диэлектрическая проницаемость изоляции ТПЖ; r_a – внешний радиус рефлектора стресс-конуса, м; r_0 – внешний радиус ТПЖ, м; $r_{из.тпж}$ – внешний радиус изоляции ТПЖ, м; $d_{ск}$ – толщина слоя тела стресс-конуса, м; $d_{м}$ – толщина слоя масла, м; $d_{вн.из}$ – толщина слоя внешнего изолятора, м.

После расчета емкостей разделки рассчитываются полные емкости на жилу и на землю по следующим формулам:

$$C_{на\ жилу} = C_{\nu\,из.тпж} + C_{S\,из.тпж}; \quad (9)$$

$$C_{на\ землю} = \frac{1}{\frac{1}{C_{S\,ск}} + \frac{1}{C_{S\,м}} + \frac{1}{C_{S\,вн.из}}} + \frac{1}{\frac{1}{C_{0\,ск}} + \frac{1}{C_{0\,м}} + \frac{1}{C_{0\,вн.из}}}. \quad (10)$$

В табл. 1 приведены характеристики слоев изоляции муфты 110 кВ, принятые при решении задачи.

Внешние радиусы ТПЖ и рефлектора стресс-конуса составляют 17,9 и 58 мм соответственно.

В результате полные емкости на жилу и на землю соответственно равны $2{,}102 \cdot 10^{-10}$ Ф и $3{,}534 \cdot 10^{-10}$ Ф. Далее необходимо рассчитать ток на жилу и ток на землю для их последующего сравнения. Проведен расчет напряжения на поверхности изолятора с использованием закона Ома для участка цепи (изолятора), которое равно 8,1 кВ. Напряжение на жиле кабеля равно амплитудному фазному напряжению в кабеле – 89,81 кВ.

Таблица 1

Характеристики слоев изоляции

Table 1

Characteristics of insulation layers

Элемент изоляции	Диэлектрическая изоляция, ε	Толщина слоя, *d*, мм
Тело стресс-конуса	2,6	10
Масло	2,5	6,5
Внешний изолятор	2,6	12,5
Изоляция ТПЖ	2,3	15

Теперь можно рассчитать искомые токи по следующим формулам:

$$I_{земли} = \frac{U_{изолятора}}{Z_{на\ землю}}; \tag{11}$$

$$I_{жилы} = \frac{U_{амплитудноефазное}}{Z_{на\ жилу}}. \tag{12}$$

Токи состоят из двух составляющих: резистивной и емкостной. Резистивной составляющей пренебрегаем в связи с ее незначительной величиной по сравнению с емкостной (согласно расчетам, емкостной ток на жилу равен $6 \cdot 10^{-3}$ А, а резистивный ток на жилу – $7 \cdot 10^{-5}$ А) [10].

По результатам расчета емкостной ток на жилу равен $6 \cdot 10^{-3}$ А, а емкостной ток на землю – $9 \cdot 10^{-4}$ А, т.е. разница между токами составляет 85%.

Используя рефракционный способ регулирования поля, можно изменять значение тока на землю за счет изменения емкости тела стресс-конуса. Таким образом можно понизить напряженность поля в опасных зонах [11–13]. Для расчета модифицированного стресс-конуса (в тело внедрены примеси с повышенной диэлектрической проницаемостью) была также применена схема замещения, приведенная выше. Диэлектрическая проницаемость материала (модифицированная мелкодисперсной сажей силиконовая резина) тела стресс-конуса была взята равной 22 [1]. Согласно расчету по схеме замещения после модификации, было получено, что ток на землю стал равен $1{,}3 \cdot 10^{-3}$ А, и разница между током на жилу и током на землю снизилась на 9,2%.

Таким образом, использование схемы замещения позволяет выполнить предварительную оценку влияния внедрения полупроводящих примесей в тело стресс-конуса, что создает предпосылки для оптимизации конструкции кабельной муфты. Однако применение данной схемы замещения для расчета указанных эффектов требует подтверждения корректности ее построения и достаточной точности. С этой целью была проведена верификация разработанной схемы замещения.

Для верификации была построена численная модель кабельной муфты в программном обеспечении Comsol. В модели используется модуль физики Electric Currents, определяющий следующие граничные условия и уравнения [4, 5]:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J_c} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \tag{13}$$

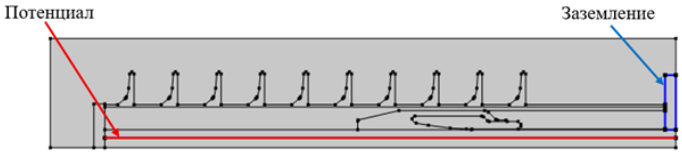


Рис. 5. Геометрия и граничные условия численной модели
Fig. 5. Geometry and boundary conditions of the FEM

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \tag{14}$$

$$\vec{D} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \vec{E}; \tag{15}$$

$$\vec{J_c} = \gamma \vec{E}, \tag{16}$$

где H – напряженность магнитного поля, А/м; E – напряженность электрического поля, В/м; J_c – плотность тока проводимости, А/мм^2; B – магнитная индукция, Тл; ρ – объемная плотность заряда, Кл/м^3; ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 – электрическая постоянная, Ф/м; γ – электропроводность См/м;

Граничные условия и геометрия представлены на рис. 5.

Результаты

По результатам моделирования, напряженность в зоне А составила 6,2 кВ/мм (рис. 6) до модификации и 4,7 кВ/мм (рис. 7) после модификации тела стресс-конуса. Также напряжение на поверхности изолятора, которое использовалось в теоретическом расчете с использованием схемы замещения, составило 7,6 кВ.

Для сравнения полученных данных в Comsol с данными схемы замещения был рассчитан ток в слоях конструкции кабельной муфты [14, 15]. Ток рассчитывался по следующей формуле:

$$I_i = U_i \omega C_i, \tag{17}$$

где I_i – ток в слое изоляции, А; U_i – напряжении на внешней границе изоляции, В; ω – круговая частота, Гц; C_i – емкость слоя изоляции, Ф.

Значение напряжения было взято на срезе зоны А в каждом из слоев. Были рассчитаны токи в изоляции жилы, в изоляции тела стресс-конуса, в масле и в теле внешнего изолятора. Результаты расчета токов, полученных с помощью программы Comsol, и сравнение их с полученными по схеме замещения приведены в табл. 2.

В результате расчетов по предложенной выше схеме замещения были получены токи на жилу и на землю. При моделировании в среде Comsol были получены токи в каждом слое изоляции муфты. По полученным значениям токов (табл. 2) можно сделать вывод, что результирующие токи (сумма токов по слоям), полученные в среде Comsol и аналитическим расчетом по схеме замещения, близки по своей величине (разница токов на землю составила 4,2%).

Обсуждение

Повышение диэлектрической проницаемости основного тела приводит к снижению напряженности поля в критических точках на 24,2%, а разница токов на жилу и на землю снижается

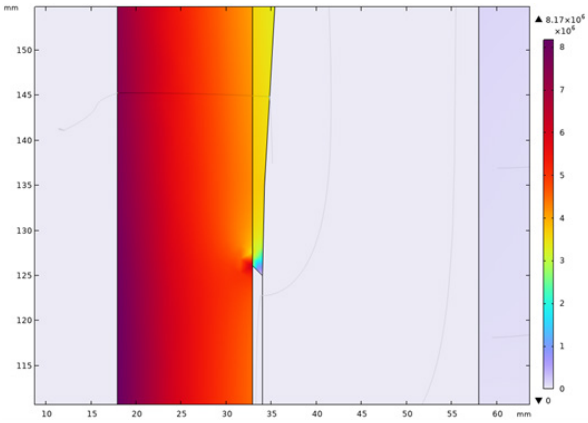


Рис. 6. Напряженность в зоне А до модификации
Fig. 6. Electric intensity zone A before modification

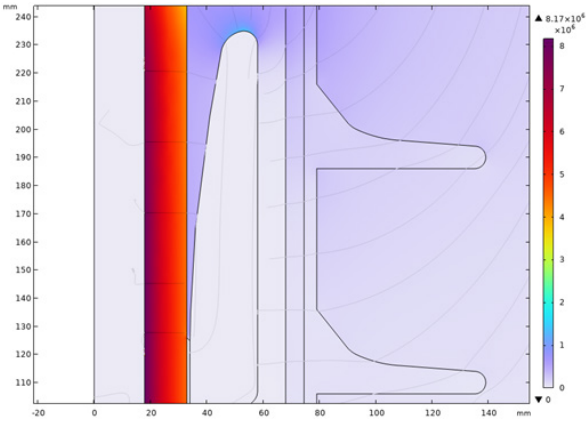


Рис. 7. Напряженность в зоне А после модификации
Fig. 7. Electric intensity zone A after modification

Таблица 2

Результаты расчета токов

Table 2

Current calculation results

Слой	**Емкость изоляции слоя**	**Напряжение, прикладываемое к слою**	**Ток в слое**	**Ток по расчетам схемы замещения**
	нФ	кВ	мА	мА
Изоляция ТПЖ	0,21	89,89	5,93	5,93
Тело стресс конуса	0,91	1,23	0,95	0,91
Масло	1,52	1,97		
Внешний изолятор	0,93	3,23		

на 9,2%. За счет модификации силиконовой резины мелкодисперсной сажей увеличивается не только диэлектрическая проницаемость, но и проводимость материала, что приводит к менее значительному снижению тока. В связи с этим надо искать способы увеличения емкостей в схеме замещения комбинированным повышением диэлектрической проницаемости и изменением геометрии. То есть помимо свойств материалов в будущем необходимо модифицировать конструктивное исполнение элементов усиливающей изоляции с возможностью перехода к другому геометрическому исполнению (уход от стресс-конуса).

Заключение

В процессе исследования была построена схема замещения кабельной муфты в зоне критической напряженности. Были рассчитаны параметры схемы замещения.

С использованием схемы замещения была рассчитана разность емкостных токов на жилу и на замелю, являющихся причиной неравномерного распределения напряженности электрического поля в усиленной изоляции муфты. Резистивной составляющей токов было решено пренебречь в связи с ее незначительной величиной по сравнению с емкостной (согласно расчетам, емкостной ток на жилу равен $6 \cdot 10^{-3}$ А, а резистивный ток на жилу – $7 \cdot 10^{-5}$ А).

Была построена численная модель в программной среде Comsol. Полученные результаты представлены в табл. 2. Из них следует, что результирующие токи, полученные в среде Comsol и рассчитанные по схеме замещения, близки по своей величине (разница между токами составила 4,2%). Полученные результаты следует использовать для комбинированной модификации конструкции усиленной изоляции кабельной муфты для увеличения ее емкости как за счет свойств усиленной изоляции (повышение диэлектрической проницаемости материала за счет внедрения примесей), так и изменением геометрии усиленной изоляции (уход от стресс-конуса).

Таким образом, с высокой степенью вероятности можно говорить о том, что анализ емкостных токов по разработанной схеме замещения является аналитической верификацией результата численного расчета в среде Comsol емкостных токов в изоляционных слоях усиленной изоляции со стресс-конусом концевой кабельной муфты 110 кВ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Грешняков Г., Селезнев Д.** Некоторые аспекты конструирования соединительных муфт высокого напряжения // Силовая электроника. 2014. Т. 4, № 49. С. 92–94.

[2] **Селезнёв Д.А., Грешняков Г.В.** Применение резистивно-емкостного принципа регулирования электрического поля кабельных муфт // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2020. Т. 26. № 1. С. 5–14. DOI: 10.18721/JEST.26101

[3] **Шварцман Л.Г.** Регулирование электрического поля в концевых муфтах кабелей высокого напряжения // Труды ВНИИКП. 1969. № 13. С. 11–34.

[4] **Zhuxin Ma, Kun Wang, Peng Cheng, Tianpeng Yang, Weikang Li, Bo Qiao, Wei Yang, Ming Wu, Lisheng Zhong.** Experiments and Simulations on the Equivalence of Pre-Cross-Linking in Cable Insulation Material Extrusion, High Voltage, 11 (1) (2026) 37–48. DOI: 10.1049/hve2.70163

[5] **Xu Lu, Ran Hu, Kongying Guo, Rui Lan, Jie Tian, Yanhui Wei, Guochang Li.** Effect of interface defects on the electric–thermal–stress coupling field distribution of cable accessory insulation, Energies, 17 (17) (2024) 4498. DOI: 10.3390/en17174498

[6] **Грачев А.С.** О переходных процессах в соединительных муфтах кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена // Символ науки. 2023. Т. 10, № 1. С. 25–27.

[7] **Zheng Wu, Mingyan Wu, Ruxin Zhang, Lei Liao, Gang Du, Xueyou Huang, Wenpei Jin, Ji'an Zhang, Haiming Li, Binxian Lu.** Simulation of Electric Field Distribution in Cable Joint under the Influence of

Metal Particle, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 790 (2020) 012133. DOI: 10.1088/1757-899X/790/1/012133

[8] **Yue Zhang, Xiaoxin Chen, Yong Qian, Zhe Li, Gehao Sheng, Xiuchen Jiang.** Simulation study and detection position analysis on position of partial discharge detection in XLPE cable cross-bonding system, 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2018, 1–6. DOI: 10.1109/CMD.2018.8535708

[9] **Yani Wang, Yalin Wang, Xingwu Yang, Aiqing Ma, Yuanyuan Sun, Yi Yin.** Charge transport in full-size HVDC cable joint with modeling of XLPE/EPDM interface, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 28 (6) (2021) 2117–2125. DOI: 10.1109/TDEI.2021.009635

[10] **Guochang Li, Xiaojian Liang, Jiahao Zhang, Xuejing Li, Yanhui Wei, Chuncheng Hao.** Insulation properties and interface defect simulation of distribution network cable accessories under moisture condition, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 29 (2) (2022) 403–411. DOI: 10.1109/TDEI.2022.3157902

[11] **Guevara Asorza J.E., Colqui J.S.L., Kurokawa S., Pissolato Filho J.** Analysis of increased induced voltages on the sheath of double-circuit underground transmission lines guaranteeing ampacity, Energies, 17 (7) (2024) 1637. DOI: 10.3390/en17071637

[12] **Brakelmann H., Anders G.J.** Ampacity calculations of underground power cables with end effects, IEEE Transactions on Power Delivery, 38 (3) (2023) 1968–1976. DOI: 10.1109/TPWRD.2022.3229585

[13] **Qingfeng Guo, Jun Xiong, Nianqin Dai, Sizhuo Liao, Binxian Lu.** Influence of the material parameters on the electric field intensity distribution of 10kV cable elbow connector, 2018 2nd IEEE conference on energy internet and energy system integration (EI2), (2018) 1–5. DOI: 10.1109/EI2.2018.8582320

[14] **Metwally I.A., Al-Badi A.H., Al-Hinai A.S., Al Kamali F., Al-Ghaithi H.** Influence of design parameters and defects on electric field distributions inside MV cable joints, 2016 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), (2016) C. 1–6. DOI: 10.1109/MELCON.2016.7495348

[15] **Alboyaci B., Cinar M.A., Demirol Y.B., Ince A.** Evaluation of the effect of structural defects in the heat-shrink cable terminal on electric field distribution, Engineering Failure Analysis, 132 (2022) 105920. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105920

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КРАСНИКОВ-ВЕРБНИКОВ Владислав Игоревич – *ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*
E-mail: krasnikov_vi@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-2139-3621

ГРЕШНЯКОВ Георгий Викторович – *профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.*
E-mail: g.greshnyakov@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9076-4841

ЧЕСНОКОВ Евгений Анатольевич – *ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*
E-mail: e-chesnokov@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6658-0399

ДРУЖИНИН Евгений Васильевич – *студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*
E-mail: druzhinin.ev@edu.spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3271-9827

REFERENCES

[1] **G. Greshniakov, D. Seleznev,** Nekotorye aspekty konstruirovaniia soedinitel'nykh muft vysokogo napriazheniia [Some aspects of high-voltage coupling design], Silovaia elektronika [Power electronics], 4 (49) (2014) 92–94.

[2] **D.A. Seleznev, G.V. Greshnyakov,** Application of the resistive-capacitive principle of regulating the electric field of cable couplings for 110 kV, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 26 (01) (2020) 5–14. DOI: 10.18721/JEST.26101

[3] **L.G. Shvartsman,** Regulirovanie elektricheskogo polia v kontsevykh muftakh kabelei vysokogo napriazheniia [Electric field control in high-voltage cable terminations], Trudy VNIIKP [Proceedings of the All-Union Research Design and Technological Institute of the Cable Industry], 13 (1969) 11–34.

[4] **Zhuxin Ma, Kun Wang, Peng Cheng, Tianpeng Yang, Weikang Li, Bo Qiao, Wei Yang, Ming Wu, Lisheng Zhong,** Experiments and Simulations on the Equivalence of Pre-Cross-Linking in Cable Insulation Material Extrusion, High Voltage, 11 (1) (2026) 37–48. DOI: 10.1049/hve2.70163

[5] **Xu Lu, Ran Hu, Kongying Guo, Rui Lan, Jie Tian, Yanhui Wei, Guochang Li,** Effect of interface defects on the electric–thermal–stress coupling field distribution of cable accessory insulation, Energies, 17 (17) (2024) 4498. DOI: 10.3390/en17174498

[6] **A.S. Grachev,** O perekhodnykh protsessakh v soedinitel'nykh muftakh kabel'nykh linii s izoliatsiei iz sshitogo polietilena [On transient processes in connecting joints of XLPE-insulated cable lines], Simvol nauki [Science Symbol], 10 (1) (2023) 25–27.

[7] **Zheng Wu, Mingyan Wu, Ruxin Zhang, Lei Liao, Gang Du, Xueyou Huang, Wenpei Jin, Ji'an Zhang, Haiming Li, Binxian Lu,** Simulation of Electric Field Distribution in Cable Joint under the Influence of Metal Particle, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 790 (2020) 012133. DOI: 10.1088/1757-899X/790/1/012133

[8] **Yue Zhang, Xiaoxin Chen, Yong Qian, Zhe Li, Gehao Sheng, Xiuchen Jiang,** Simulation study and detection position analysis on position of partial discharge detection in XLPE cable cross-bonding system, 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2018, 1–6. DOI: 10.1109/CMD.2018.8535708

[9] **Yani Wang, Yalin Wang, Xingwu Yang, Aiqing Ma, Yuanyuan Sun, Yi Yin,** Charge transport in full-size HVDC cable joint with modeling of XLPE/EPDM interface, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 28 (6) (2021) 2117–2125. DOI: 10.1109/TDEI.2021.009635

[10] **Guochang Li, Xiaojian Liang, Jiahao Zhang, Xuejing Li, Yanhui Wei, Chuncheng Hao,** Insulation properties and interface defect simulation of distribution network cable accessories under moisture condition, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 29 (2) (2022) 403–411. DOI: 10.1109/TDEI.2022.3157902

[11] **J.E. Guevara Asorza, J.S.L. Colqui, S. Kurokawa, J. Pissolato Filho,** Analysis of increased induced voltages on the sheath of double-circuit underground transmission lines guaranteeing ampacity, Energies, 17 (7) (2024) 1637. DOI: 10.3390/en17071637

[12] **H. Brakelmann, G.J. Anders,** Ampacity calculations of underground power cables with end effects, IEEE Transactions on Power Delivery, 38 (3) (2023) 1968–1976. DOI: 10.1109/TPWRD.2022.3229585

[13] **Qingfeng Guo, Jun Xiong, Nianqin Dai, Sizhuo Liao, Binxian Lu,** Influence of the material parameters on the electric field intensity distribution of 10kV cable elbow connector, 2018 2nd IEEE conference on energy internet and energy system integration (EI2), (2018) 1–5. DOI: 10.1109/EI2.2018.8582320

[14] **I.A. Metwally, A.H. Al-Badi, A.S. Al-Hinai, F. Al Kamali, H. Al-Ghaithi,** Influence of design parameters and defects on electric field distributions inside MV cable joints, 2016 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), (2016) C. 1–6. DOI: 10.1109/MELCON.2016.7495348

[15] **B. Alboyaci, M.A. Cinar, Y.B. Demirol, A. Ince,** Evaluation of the effect of structural defects in the heat-shrink cable terminal on electric field distribution, Engineering Failure Analysis, 132 (2022) 105920. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105920

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Vladislav I. KRASNIKOV-VERBNIKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: krasnikov_vi@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-2139-3621

George V. GRESHNYAKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: g.greshnyakov@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9076-4841

Evgenii A. CHESNOKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: e-chesnokov@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6658-0399

Evgeniy V. DRUZHININ – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: druzhinin.ev@edu.spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3271-9827

Поступила: 14.02.2026; Одобрена: 28.06.2026; Принята: 27.07.2026.
Submitted: 14.02.2026; Approved: 28.06.2026; Accepted: 27.07.2026.

Глобальная энергия. Том 32, № 3, 2026. С. 43–58.
Global Energy, 2026, 32 (3); 43–58.

Обзорная статья
УДК 621.313
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32304

Э.Р. Маннанов[1] ✉ , *А.М. Костельов*[1],
К.В. Корнеев[1], *А.А. Степанов*[1], *В.О. Белько*[2]

[1] АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия;

[2] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

✉ emil-mannanov@mail.ru

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ВНЕШНЕГО ПАЗОВОГО КОРОНОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ СТАТОРНЫХ ОБМОТОК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Аннотация. В статье выполнен анализ современных технических решений в области конструкции внешнего пазового коронозащитного покрытия статорных обмоток высоковольтных турбогенераторов. Рассмотрены основные физические механизмы деградации коронозащитных покрытий: искровая эрозия (виброискровые разряды) и эрозия внешней коронозащиты («обесцвечивание»), вызванная воздействием озона и оксидов азота в воздушно-охлаждаемых электрических машинах. Показано, что ключевыми конструктивными условиями обеспечения работоспособности являются надежное заземление внешнего пазового коронозащитного слоя и выбор оптимального диапазона поверхностного электрического сопротивления, позволяющего одновременно подавлять пазовые частичные разряды и предотвращать виброискровую эрозию. Выполнен анализ тенденций в области создания новых материалов и конструктивных решений. Особое внимание уделено патентным разработкам последних лет, направленным на повышение ресурса, устойчивости к частичным разрядам и совместимости с VPI-процессами. Представлен обзор перспективных методов оценки работоспособности покрытий на стадии проектирования и мониторинга технического состояния полупроводящих покрытий с выбором критериальных оценок.

Ключевые слова: турбогенератор, статорная обмотка, коронозащитное покрытие, пазовые частичные разряды, виброискровые разряды, поверхностное электрическое сопротивление, VPI-технология, конечно-элементное моделирование.

Для цитирования:

Маннанов Э.Р., Костельов А.М., Корнеев К.В. и др. Анализ конструктивно-технологических решений для внешнего пазового коронозащитного покрытия статорных обмоток высоковольтных турбогенераторов // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 3. С. 43–58. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32304

© Маннанов Э.Р., Костельов А.М., Корнеев К.В. и др., 2026. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Overview article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32304

E.R. Mannanov[1] ✉ , *A.M. Kostelov*[1],
K.V. Korneev[1], *A.A. Stepanov*[1], *V.O. Belko*[3]

[1] Power machines JSC, St. Petersburg, Russia;
[2] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ emil-mannanov@mail.ru

A REVIEW OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR EXTERNAL SLOT CORONA PROTECTION COATINGS ON STATOR WINDINGS OF HIGH-VOLTAGE TURBOGENERATORS

Abstract. The paper presents an analysis of modern technical solutions for the design of external slot corona protection coatings for stator windings of high-voltage turbogenerators. The main physical mechanisms of corona protection coating degradation are considered: spark erosion (vibration-induced spark discharges) and erosion of the external corona protection ("discoloration") caused by exposure to ozone and nitrogen oxides in air-cooled electrical machines. It is shown that the key design conditions for ensuring operability are reliable grounding of the external slot corona protection layer and the selection of an optimal range of surface electrical resistivity, which simultaneously suppresses slot partial discharges and prevents spark erosion. An analysis of trends in the development of new materials and design solutions is performed. Particular attention is paid to recent patent developments aimed at increasing service life, resistance to partial discharges, and compatibility with Vacuum Pressure Impregnation processes. An overview of promising methods for assessing the performance of coatings at the design stage and for monitoring the technical condition of coatings with the selection of criteria-based evaluations is presented.

Keywords: turbogenerator, stator winding, corona protection coating, slot partial discharges, vibration sparking, surface electrical resistance, VPI technology, finite element modeling.

Citation:

Mannanov E.R., Kostelov A.M., Korneev K.V. et al., A review of design and technological solutions for external slot corona protection coatings on stator windings of high-voltage turbogenerators, Global Energy, 32 (03) (2026) 43–58, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32304

Введение. Коронозащитные покрытия (системы выравнивания напряженности – Stress Grading Systems, SGS) являются критическим элементом изоляционной системы статорных обмоток высоковольтных турбогенераторов (ТГ). Они предотвращают опасные разрядные процессы на поверхности изоляции в зоне выхода стержня из паза (лобовая часть) и обеспечивают равномерное распределение потенциала вдоль пазовой части [1]. В зависимости от типа, размера или номинального напряжения машины в систему изоляции могут быть интегрированы несколько компонентов выравнивания поля для того, чтобы справляться с различными типами неоднородности электрического поля [2, 3]. Например, на больших ТГ внутренняя защита от коронного разряда (Internal Corona Protection, ICP), внешняя защита от коронного разряда (Outer Corona Protection, OCP) и лобовая защита от коронного разряда (End-winding Corona Protection, ECP) являются важнейшими частями системы изоляции высокого напряжения [2].

Согласно [4], около 60% проблем при эксплуатации мощных высоковольтных машин связаны с разрядными процессами на поверхности изоляции. В последние десятилетия проблема обострилась из-за трех основных тенденций:

© Mannanov E.R., Kostelov A.M., Korneev K.V. et al., 2026. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

1) повышения рабочих напряженностей (на 30–60% по сравнению с машинами прошлых поколений), что увеличивает нагрузки на покрытие пропорционально квадрату напряженности [4];

2) перехода от водородного охлаждения к воздушному, что снижает разрядное напряжение газовой среды в 2–3 раза и создает условия для генерации озона, ускоряющего химическое разрушение покрытий [5];

3) увеличения требований к сроку службы (до 40–60 лет) и к межремонтным интервалам [6].

В последние годы в Китае, Европе и России ведутся разработки генераторов с номинальным напряжением 27–35 кВ и выше, что требует создания новых коронозащитных структур [6–11].

Целью данного обзора являются систематизация и анализ известных данных о коронозащитных материалах, механизмах их деградации, методах диагностики и моделирования, а также выявление пробелов и направлений дальнейших исследований с учетом новейших конструктивно-технологических решений.

Физические механизмы деградации коронозащитных покрытий

***Искровая эрозия* (*Spark Erosion*, *SE*)**

Искровая эрозия возникает вследствие инициации виброискровых разрядов (ВИ) при вибрации стержня в пазу и при прерывистом контакте между полупроводящим покрытием и заземленным сердечником [12]. Различают два электрических механизма [12]:

• Индуктивный механизм: ток, индуцированный главным магнитным потоком машины, протекает по покрытию и сердечнику. При разрыве контакта возникает электрическая дуга. Если поверхностное сопротивление превышает 1,0 кОм, индуктивный ток не повреждает покрытие.

• Емкостной механизм: ток смещения, обусловленный переменным напряжением между проводником стержня и сердечником, может действовать даже при напряжении около 30 В. Зажигание искры происходит при ≈35 В и токе 7 мА; при этом амплитуда разряда составляет около 400 пКл и возрастает с напряжением [13]. Со временем искровая эрозия приводит к увеличению сопротивления покрытия (до 1 МОм и более), что, однако, не останавливает развитие процесса [14].

Эрозия внешней коронозащиты – «обесцвечивание» (bleaching)

Эрозия внешней коронозащиты обусловлена пазовыми частичными разрядами (ПЧР) в микропорах (<0,1 мкм) в стеклянной основе слюдяной ленты [5]. В воздушной среде корона генерирует озон и оксиды азота, которые разрушают органическую матрицу покрытия и испаряют проводящие наполнители (графит), приводя к потере проводимости и возникновению скользящих разрядов с энергией, соответствующей таковой при искровой эрозии [5, 14].

Влияние температуры на разрядную активность

При нагреве от 20 до 132 °C амплитуда положительных пазовых разрядов возрастает в 7,4 раза при постоянном зазоре 0,25 мм [15]. Для водородного охлаждения (давление 4 бар) критический размер повреждения покрытия для инициирования разряда составляет ≈2,3 мм (против 1,2 мм в воздухе) [15].

Требования к конструктивному исполнению

Считается [3], что требования к конструкции статорной обмотки имеют иерархическую структуру. В первую очередь должны выполняться требования относительно предотвращения ПЧР. Затем заданная базовая конструкция приводится в соответствие с требованиями по предотвращению ВИ, т.е. искрения вследствие вибраций.

Общепризнано, что фактически невозможно уложить в пазы отдельные пропитанные и отвержденные стержни генератора, не оставляя пустот, поскольку, несмотря на передовые

технологии изготовления стержней, их толщина изменяется в пределах заданных допусков по длине. У изготовителей имеются различные методы улучшения крепления стержня в пазе после их укладки, например посредством вставки слабопроводящих (обычно волнистых) боковых прокладок в пустоты, если это возможно. Но в конечном итоге все равно останется несколько незаполненных пустот, в которых могут инициироваться ПЧР при возникновении разности потенциалов в таких пустотах, превышающих напряжение пробоя соответствующих газовых промежутков. Необходимость предотвращения ПЧР, несмотря на наличие неизбежных боковых пустот, определяет основные требования к конструкции статорной обмотки.

Полупроводящий наружный слой коронозащитного покрытия является основной частью решения. Он представляет собой слабопроводящее покрытие на поверхности стержня по длине паза. Однако эффективным это покрытие становится только в том случае, если будет заземлено. При наличии слоя с нулевым потенциалом в боковых пустотах не будет возникать разность потенциалов. В конечном итоге надежное заземление наружного коронозащитного слоя является ключевым вопросом конструкции, который решается, когда наружные коронозащитные слои покрытия будут иметь достаточно периодических точек контактирования (касания) со стенками паза [3].

Требования к электрическому сопротивлению внешних пазовых покрытий

Вторым важным условием, кроме обеспечения надежного заземления, является оптимальное значение поверхностного удельного сопротивления коронозащитного слоя, обеспечивающего основное требование – недопущение формирования допустимой разности потенциалов в пустотах [3]. Допустимый диапазон поверхностного сопротивления является компромиссом между подавлением ПЧР и предотвращением искровой эрозии [12, 13].

Анализ требований с целью предотвращения ПЧР

В монографии [16] выработаны требования к адекватному значению поверхностного сопротивления в диапазоне от 0,5 до 5 кОм. Несколько больший диапазон (0,1–10 кОм/□) указан в работе [17]. Однако большинство исследователей [12, 18, 19], а также авторы статьи [20] указывают на значения поверхностного сопротивления, которые должны быть не менее 15–25 кОм/□.

Анализ требований с целью предотвращения ВИ

В работе [21] установлено, что при значениях поверхностного сопротивления в диапазоне (100 кОм/□ – 10 МОм/□) наблюдается сильное разрушение коронозащитного слоя под действием ВИ. В работе [22] отмечается, что удельное сопротивление внешнего полупроводящего слоя от 0,3 до 0,4 кОм/□, как правило, считается слишком низким для новых установок, хотя отраслевой стандарт отсутствует. Более низкие значения поверхностного удельного сопротивления приводят к более высоким уровням искрового тока (индуктивная модель), что ускоряет повреждение основной изоляции стержней при наличии зазоров и вибрации. Однако если стержень плотно прижат к сердечнику, надлежащим образом заземлен и не подвержен вибрации, то низкие значения поверхностного удельного сопротивления не являются вредными. Это подтверждается на примере нижних стержней – даже при низких значениях (0,3–0,4 кОм/□) повреждений от искровой эрозии обнаружено не было. Если бы низкое поверхностное удельное сопротивление было основным фактором, способствующим искровой эрозии, то на этих нижних стержнях наблюдались бы повреждения.

В работе [12] установлено, что сопротивление коронозащитного слоя должно быть не ниже 0,3–2 кОм/□, чтобы предотвратить ВИ.

Большинство исследователей в своих последних работах [3, 20] считает, что поверхностное сопротивление коронозащитного слоя должно быть выбрано выше 5 кОм/□, чтобы предупредить возникновение ВИ, однако выбранное сопротивление коронозащитного слоя не должно

превышать 25 кОм/□, иначе могут возникнуть ПЧР, а также чрезмерный перегрев покрытия вследствие джоулевых потерь.

В исследовании [13] на основе модельных испытаний (без проверки на практике) был уточнен диапазон поверхностного сопротивления, который составил 7,5–20 кОм/□ в случае длины контактного зазора не больше 110 см (в средней части паза) и не больше 30 см (в конечной части паза).

Тенденции развития материалов и конструкций коронозащитных покрытий

Традиционные наполнители и связующие

Основным наполнителем для нелинейных покрытий является карбид кремния (SiC). ВАХ описывается экспоненциальной зависимостью $G = G_0 \exp(\beta E)$ [4]. Оптимальное содержание SiC в эмали – около 80% по массе, дисперсность 20–28 мкм [4]. Добавка алюминиевого порошка (5–15%) повышает проводимость и нелинейность [4]. ZnO-микровaристоры обладают нелинейностью $\alpha > 10$ (против 4–8 для SiC), но требуют высокотемпературного спекания (1200–1600°C) [23].

Равнопотенциальный слой с полупроводящей шпатлевкой

Патент [10] предлагает использовать полупроводящую шпатлевку для заполнения зазоров в зоне транспозиции проводников. Шпатлевка формирует равнопотенциальный слой со скругленными углами (радиус 2,5 мм), что снижает концентрацию электрического поля. Для обеспечения надежного электрического контакта в шпатлевку укладывается медная проволока диаметром 0,25 мм, привариваемая к проводникам. Поверх наматывается полупроводящая лента того же диапазона сопротивлений. Такая структура экранирует перестановочные зазоры, подавляя внутренние частичные разряды [10].

Одностадийная VPI-технология с коронозащитной лентой

Согласно [11], технологический процесс включает последовательную намотку:

- равнопотенциальный слой из полупроводящих пластин (объемное сопротивление 2000–20000 Ом·см) на полупроводящем клее (<5000 Ом·м);
- главную изоляцию (малосмоляную слюдяную ленту, ½ перекрытия);
- низкоомную коронозащитную ленту (поверхностное сопротивление 1000–3000 Ом) на пазовой части;
- высокоомную коронозащитную ленту (10^9–10^{13} Ом при 5000 В) на лобовых частях с перекрытием 20 мм;
- изолирующую низкоомную коронозащитную ленту (200–2000 Ом) поверх низкоомной, намотанную в противоположном направлении;
- пористую тефлоновую ленту для отделения от пресс-формы.

После вакуумно-нагнетательной пропитки (давление при вакуумировании < 0,2 мбар; давление пропитки 2,7–3,0 бар) и отверждения при 100–120 °C в течение не менее 24 ч формируется единая коронозащитная система. Испытания показали, что напряжение начала короны превышает 40 кВ (требование $1{,}5U_n = 27$ кВ), а значения $\mathrm{tg}\delta$ и $\Delta\mathrm{tg}\delta$ остаются в допустимых диапазонах [11].

Двухступенчатая эмалевая конструкция

Покрытие [4] представляет собой две ступени:

1) первая ступень (20–40 мм) с повышенной проводимостью (на 1–2 порядка) предназначена для выравнивания плотности тока;

2) вторая ступень (≥200 мм) с нелинейной ВАХ увеличивает срок службы более чем в 3 раза, позволяет проводить испытания стержней напряжением до 82 кВ.

Двухслойная высокоомная структура с выравнивающими кольцами

Новое решение для повышения токонесущей способности концевой части разработано Dongfang Electric Corporation в 2024 г. Решение заключается в том, что высокоомный блок

выполнен в виде двух слоев (высокоомный слой I и высокоомный слой II), разделенных изолирующим слоем из слюдяной ленты. Высокоомный слой I состоит из нескольких сегментов с последовательно возрастающими начальным поверхностным сопротивлением и коэффициентом нелинейности. В местах перекрытия сегментов снаружи установлены выравнивающие кольца из низкоомной ленты. Эти кольца создают эквипотенциальные зоны между слоями, выравнивают плотность тока, снижают риск короны, перекрытия и обжига. Технология применима как для VPI, так и для многокомпонентного горячего прессования, формуется за один раз без дополнительной окраски [7].

Нано-композитное гидрофобное покрытие

Патент [8] предлагает антикоронное покрытие на основе органического полимера (силоксановый полимер + фторполимер FEP, ETFE, PFA или ECTFE), нанооксидов (SiO_2, TiO_2, ZnO, θ-Al_2O_3) и нанонитридов (BN, Si_3N_4) с добавкой PTFE или PVDF. Все компоненты гидрофобны и обладают высокой изоляцией. Нанооксиды и нанонитриды используются с гранулометрическим градиентом (частицы 30–40 нм и 10–20 нм в соотношении 1:1–1:3), что обеспечивает плотную упаковку и равномерную гидрофобность. Покрытие наносится распылением или кистью. Испытания показали: в условиях влажности >90% напряжение возникновения короны повышается с 13,8 кВ (без покрытия) до 15,0–15,5 кВ (с покрытием), что близко к сухому состоянию (15,4 кВ) [8].

Простая двухслойная краска без армирующих слоев

Патент [9] описывает коронозащитную структуру, состоящую только из низкоомного слоя (на прямолинейном участке) и высокоомного слоя (на торцевом участке) с перекрытием 20–30 мм. Оба слоя формируются отверждением соответствующих красок (эпоксидных с наполнителями). Толщина низкоомного слоя составляет 50–200 мкм, высокоомного – 150–400 мкм. Низкоомная краска содержит эпоксидную смолу, проводящую сажу, графит; высокоомная – эпоксидную смолу, SiC, нано-модификатор типа «ядро-оболочка» (SiC, SiO_2 и др.) и наполнители. Испытания на стержнях 27 кВ показали напряжение возникновения короны 50–52 кВ, стойкость к короне – до 85 кВ (против 42 кВ и отказа при 55 кВ у аналогов) [9].

Неорганические покрытия

В патентах [24–26] предложены полностью неорганические покрытия на основе легированного оксида олова (SnO_2:Sb) или ITO, наносимые методом погружения с термообработкой 350–700°C. Преимущество – термостойкость до 500°C и устойчивость к озону.

Барьерный слой для защиты антикоронного покрытия от миграции VPI-смолы

Патент [27] решает проблему изменения сопротивления высокоомного торцевого покрытия из-за вытеснения пропиточной смолы из главной изоляции в процессе горячего прессования. Предлагается перед намоткой антикоронного слоя нанести на главную изоляцию барьерный слой из многоклеевой слюдяной ленты (содержание связующего 35–45%) толщиной 0,3–1,0 мм. Этот слой поглощает избыток смолы и предотвращает ее проникновение в полупроводящий антикоронный слой. Технология включает намотку барьерного слоя после VPI-пропитки и подтека, перед намоткой антикоронных лент, с последующим горячим прессованием по двухступенчатому режиму (130–140°C, 3–4 ч; затем 160–170°C, 8–12 ч). Для стержней на 27 кВ достигнуто напряжение возникновения короны >50 кВ и стойкость к перекрытию >83 кВ [27].

Химическая присадка для безангидридных VPI-систем

Патент [28] решает проблему неравномерного отверждения эпоксидных VPI-смол в безангидридных системах, вызванную неоднородным распределением катализатора отверждения, вымываемого из твердого изоляционного материала (лент). Предложено вводить в пропиточный состав присадку – фениловые сложные эфиры карбоновых кислот (линейные или циклические) в стехиометрическом количестве по отношению к эпоксидным группам не менее 0,1%,

предпочтительно 50–100%. Примеры: дигидрокумарин, ацетат-пропионат бисфенола А. Присадка модифицирует реакционную способность эпоксидных групп, позволяя им эффективно сшиваться даже при низкой концентрации катализатора. DSC-измерения подтверждают: без присадки при 0,5% катализатора энтальпия реакции –8,3 Дж/г (почти нет сшивания); с добавлением 50–100% фенилового эфира энтальпия возрастает до значений, сопоставимых с высококонцентрированными системами [28].

Электропроводящая PTFE-ткань для внешней коронозащиты в GVPI

Патент [29] предлагает заменить традиционную многослойную конструкцию внешней коронозащиты на один слой электропроводящей PTFE-ткани (тефлон с графитовым наполнителем). Ткань имеет поры, которые легко пропитываются VPI-смолой, но ее электропроводность не меняется после пропитки. Конструкция для GVPI: главная изоляция → внутренняя коронозащитная лента → электропроводящая PTFE-ткань → опционально внешняя коронозащитная лента. Толщина слоя уменьшена с ~450 мкм до ~100 мкм. Испытания на стержнях 13,8 кВ подтвердили работоспособность [29].

Керамическое покрытие частиц слюды

Патент [24] предлагает решение проблемы расслоения слюды – одной из главных причин дефектов в коронозащитных слоях. Каждая частица слюды (размер <100 мкм) полностью покрывается слоем керамического оксида металла (Al_2O_3, SiO_2 или TiO_2). Керамическая оболочка механически связывает отдельные слои слюды, предотвращая расслоение. Частицы распределяются в полимерной матрице (эпоксидной смоле), образуя коронозащитную бумагу или ленту. Система совместима с VPI-технологией. Патент прямо ориентирован на высоковольтные машины, включая ТГ, и позволяет создавать системы выравнивания напряжения с предельно высокой надежностью при повышенных рабочих напряженностях (оценочно до 20–24 кВ/мм) [24].

АТО-покрытые наполнители

Патент [25] описывает коронозащитную ленту, получаемую пропиткой тканевой подложки раствором реакционной смолы (эпоксидной), содержащей неорганический наполнитель, покрытый легированным сурьмой оксидом олова (АТО). Наполнителем служат слюда или титанат калия (в том числе в форме вискеров). Покрытие наносится химическим осаждением из растворов $SnCl_4$ и $SbCl_3$ с последующей термообработкой. Доля сурьмы в АТО – 0,1–30 мас.%. Содержание наполнителя в ленте – 2,5–25% от органических твердых компонентов. После пропитки и сушки (110 °С) лента находится в В-стадии (частично отверждена, нелипкая). Ключевые преимущества: высокая воспроизводимость поверхностного сопротивления (разброс ±20%), низкие диэлектрические потери ($\tan\delta = 9\cdot10^{-3}$ при 10 кВ против $38\cdot10^{-3}$ у SiC-ленты), низкий уровень частичных разрядов (Qs max = 1,1 нКл при 10 кВ), стабильность при хранении не менее 16 недель [25].

Полностью неорганическая коронозащита

Патент [26] предлагает кардинальное решение – подложка (стеклоткань, ткань из оксида алюминия или карбида кремния) и нанесенное на нее покрытие выполнены полностью из неорганических материалов. Покрытие формируется из растворов или золей солей металлов (Sn, In, Sb и др.) с последующей кальцинацией при 350–700°С. Получаются слои легированных оксидов: АТО (SnO_2:Sb), ITO (In_2O_3:Sn), фтор-легированный SnO_2, а также оксиды переходных металлов. Толщина покрытия составляет 50–500 нм. Поверхностное сопротивление регулируется составом и толщиной: для внешней коронозащиты 500–5000 Ом/□, для лобовой $5\cdot10^7$ – $5\cdot10^9$ Ом/□. Заявлено, что такая коронозащита выдерживает температуры до 500 °С, полностью устойчива к озону и частичным разрядам, не загрязняет VPI-пропиточные составы [26].

Методы оценки работоспособности и диагностики состояния коронозащитных покрытий в процессе эксплуатации

Методы оценки работоспособности пазовых коронозащитных покрытий

В работе [2] описан способ тестовых сравнительных испытаний внешних пазовых коронозащитных покрытий. Суть метода заключается в том, что на круглый алюминиевый профиль наносится несколько слоев слюдяной изоляции, и покрывается стандартной внешней лентой защиты от коронного разряда. После стандартного цикла пропитки и отверждения образец подвергается воздействию повышенных температур и электрическому напряжению, пока на поверхности покрытия не появятся первые признаки деградации материала. Специальная испытательная установка обеспечивает оценку изменения удельного сопротивления материала в отношении распространения эрозии. Критерием оценки для испытания служит зависящее от времени распространение эрозионной деградации [2].

Методы диагностики и критерии оценки технического состояния коронозащитных покрытий в процессе эксплуатации

Мониторинг частичных разрядов является основным методом диагностики технического состояния пазовых коронозащитных покрытий [6, 9]. К основному критерию можно отнести максимальный кажущийся заряд частичных разрядов q_m, предельное значение, которое определяет критическое (предпробойное) состояние системы изоляции, при онлайн измерениях. Согласно ГОСТ IEC/TS 60034-27-2 – 2015 «Машины электрические вращающиеся», рекомендуемая предельная величина составляет:

- 798 мВ при измерениях частичных разрядов электрическим методом с использованием конденсатора связи емкостью 80 пФ для ТГ номинальным напряжением более 19 кВ;
- 115 мВ при измерениях пазовых частичных разрядов электромагнитным методом с использованием антенного пазового датчика (SSC) для ТГ номинальным напряжением 16–24 кВ;
- 18 мВ при измерениях частичных разрядов в лобовой зоне обмотки электромагнитным методом с использованием антенного пазового датчика (SSC) для ТГ номинальным напряжением 16–24 кВ;
- 30 000 пКл при измерениях частичных разрядов электрическим методом с использованием конденсатора связи емкостью 1000–2000 пФ для ТГ номинальным напряжением более 10 кВ.

Проблемно-ориентированное моделирование систем коронозащиты

Современные средства моделирования [4, 6, 32–38] позволяют:

- рассчитывать распределение электрического поля и температуры с учетом нелинейной зависимости сопротивления покрытий от напряженности и температуры и моделировать комплексное воздействие внешних факторов в целом;
- оценивать влияние дефектов: локального отсутствия внешнего покрытия, обрыва волнистой прокладки, потери упругости [33–35, 38];
- разрабатывать технические требования к полупроводящим материалам и изделиям, например определять границы удельного объемного сопротивления внешнего коронозащитного покрытия (например, 6·104 Ом·м для ТГ 220 МВт) [6, 33];
- прогнозировать эквивалентные свойства материалов при их разработке [34];
- оценивать техническое состояние и остаточный ресурс полупроводящих материалов и конструкций на их основе по выработанным критериям электрического старения, термомеханических напряжений и частичных разрядов [39];
- оптимизировать конструкции системы коронозащиты (например, длину зоны внешней коронозащиты, шаг и форму обмотки) для снижения градиентов электрического поля;
- выполнять многопараметрический анализ чувствительности для определения наиболее критичных допусков при изготовлении и монтаже.

Основные тенденции развития

Повышение рабочих напряженностей (с 2,5 до 3,0 кВ/мм) ускоряет эрозию в 2–4 раза, требуя материалов с более высокими коэффициентами нелинейности [5, 40–42].

Развитие новых наполнителей – ZnO-микровaристоры [23], нано-модификаторы типа «ядро-оболочка» (SiC SiO_2) [9], АТО-покрытые слюда и титанат калия [25].

Многослойные и гибридные конструкции:

- двухступенчатые эмалевые покрытия [4];
- двухслойные высокоомные структуры с выравнивающими кольцами [7];
- одностадийные VPI-технологии с коронозащитной лентой [11];
- нано-композитные гидрофобные покрытия [8];
- простые двухслойные краски без армирования [9];
- барьерные слои из многоклеевой ленты для защиты от миграции смолы [27];
- электропроводящие PTFE-ткани для упрощения внешней коронозащиты [29].

1. Химическая модификация VPI-систем – введение фениловых эфиров карбоновых кислот для обеспечения равномерного отверждения в безангидридных составах [28].

2. Керамическая стабилизация слюдяных наполнителей – покрытие частиц слюды Al_2O_3, SiO_2 или TiO_2 для предотвращения расслоения [24].

3. Переход к полностью неорганическим системам – оксидные покрытия на стеклоткани с кальцинацией, термостойкость до 500°C [26].

4. Интеграция с системами мониторинга – использование фазово-разрешенных диаграмм ЧР для идентификации источника разряда [6, 9].

5. Численное моделирование как обязательный этап проектирования [32–42].

Выводы и заключение

Основные механизмы деградации коронозащитных покрытий в воздушно-охлаждаемых машинах – искровая эрозия и эрозия внешней коронозащиты («обесцвечивание»), активируемые кислородом.

Для обеспечения работоспособности должны быть выполнены два конструктивных условия, предполагающие надежное заземление внешних пазовых коронозащитных покрытий и обеспечение необходимого уровня электрического сопротивления покрытий, данные о значении которого разнятся. Однако большинство исследователей считает, что поверхностное сопротивление коронозащитного слоя должно быть выбрано выше 5 кОм/□, чтобы предупредить возникновение ВИ, но не должно превышать 25 кОм/□, иначе могут возникнуть ПЧР.

Патенты китайских авторов предлагают эффективные конструктивные решения: равнопотенциальные слои со шпатлевкой и медной проволокой; одностадийную VPI-технологию; двухслойные высокоомные структуры с выравнивающими кольцами; нано-композитные гидрофобные покрытия; простые двухслойные краски.

Дополнительные технологические решения, значимые для VPI-процессов:

- барьерный слой из многоклеевой слюдяной ленты – простое и надежное средство защиты антикоронного слоя от миграции пропиточной смолы;
- химическая присадка (фениловые эфиры карбоновых кислот) – позволяет создавать безангидридные VPI-системы с равномерным отверждением;
- электропроводящая PTFE-ткань – инновационный материал для глобальной VPI-пропитки.

Патенты Siemens открывают новые направления:

- керамически стабилизированная слюда [24] устраняет расслоение – ключевую причину дефектов;

• АТО-покрытые наполнители [25] обеспечивают высокую воспроизводимость и низкие потери;

• полностью неорганическая коронозащита [26] позволяет достичь термостойкости до 500°С и потенциально – рабочих напряженностей 24 кВ/см и выше.

Отбор материалов коронозащитных покрытий на стадии проработки конструкции может быть выполнен путем испытаний при комплексных воздействиях покрытий при повышенных уровнях электрического поля и температуры. Техническое состояние коронозащитных покрытий в эксплуатации может выполнено на основе мониторинга максимального кажущегося заряда частичных разрядов q_m.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Onishi D., Kumada A., Hidaka K., Umemoto T., Otake Y., Tsurimoto T.** Surface potential measurement of stress grading system of high voltage rotating machine coils using pockels field sensor, 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), (2017) 95–98. DOI: 10.23919/ISEIM.2017.8088697

[2] **Litinsky A., Schmidt G., Pohlmann F., Hirsch H.** Advanced Assessment of Outer Corona Protection Material Durability, 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2018) 538–541. DOI: 10.1109/EIC.2018.8481083

[3] **Liese M.** Vibration sparking, an ignored damage mechanism of high voltage windings. 2008 18th International Conference on Electrical Machines, (2008) 1–6. DOI: 10.1109/ICELMACH.2008.4799823

[4] **Гегенава А.Г.** Исследование и усовершенствование противокоронных покрытий высоковольтных электрических машин: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.02: защищена 16 мая 2003 г. СПб, 2003.

[5] **Khazanov A., Hutt J.** Specific Aging Processes in Two-Pole, Air-Cooled, High-Voltage Rotating Machines, CIGRE A1 “Rotating Electrical Machines” COLLOQUIUM, (2017).

[6] **Yamanaka Y., Umemoto T., Ikeda R., Okajima N., Sakurai T., Okamoto T.** Deterioration of Corona Armor Tape by Partial Discharge and its Lifetime Evaluation for Form-wound Rotating Machine, 2023 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2023), 1–4. DOI: 10.1109/EIC55835.2023.10177341

[7] **Huang Ze, Xie Zhihui, Cheng Sheng, Zhou Jin, Zhang Yue, Liang Zhiming, Yang Shuai, Zhang Genbo, Liu Jiangjun.** Method for improving end current-carrying capacity of stator bar structure by designing stator bar structure, China Patent, No. CN119382441 (2025).

[8] **Feng Ya, Guo Weichang, Liu Zhenyu, He Xinlin, Liu Lang, Li Chunli, Zhao Xianghui, Lei Yang, Dai Songbai, Wang Jianmin, Xiong Yin, Li Haoran, Liu Zhuo.** Anti-corona coating and preparation method thereof, stator wire rod and stator, China Patent, No. CN120118614A, (2025).

[9] **Liu Wei, Cheng Sheng, Li Shanping, Zhou Jin, Zuo Rui, Liu Guoyong, Cheng Zhidong, Li Haonan, Huang Zhou, He Fuyou.** Stator bar anti-corona structure, China Patent, No. CN119864977A, (2025).

[10] **Jurkovic S., Rahman K.M**. The injection molded magnets shape of inner permanent magnetic machine extremely to pole modification, China Patent, No. CN106169821A, (2016).

[11] **Min Yanan, Zhang Dalong, Shao Wei, Wang Shuai.** Anti-corona manufacturing process for stator bar of high-capacity steam turbine generator, China Patent, No. CN119010496A, (2024).

[12] **Liese M., Brown M.** Design-dependent slot discharge and vibration sparking on high voltage windings, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 15 (4) (2008) 927–932. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4591212

[13] **Xia Y., Jia Z., Guan Z., Wang L., Zhang Z.** Principles and characteristics of vibration sparking in high voltage stator slots, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 20 (1) (2013) 42–53. DOI: 10.1109/TDEI.2013.6451340

[14] **Yamanaka Y., Ikeda R., Okajima N., Kikuta S., Sakurai T., Okamoto T.** Evaluation on Lifetime of Several Corona Armor Tape for Form-Wound Rotating Machines under Partial Discharge Aging, 2024 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2024) 325–328. DOI: 10.1109/EIC58847.2024.10579404

[15] **Hudon C., Belec M., Levesque M.** Study of slot partial discharges in air-cooled generators, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 15 (6) (2008) 1675–1690. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4712672

[16] **Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhiranl H.** Electrical Insulation for Rotating Machines, Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004.

[17] **Mráz P., Kindl V., Hruška K.** Influence of low-conductive coating on insulation system of rotary electric machines, Journal of Electrical Engineering, 63 (3) (2012) 180–185.

[18] **Jackson R., Wilson A.** Slot-Discharge Activity in Air-Cooled Motor and Generators. Proceedings of the IEE, 129 (3) (1982) 159–167.

[19] **Emery F.T.** The application of conductive and stress grading tapes to vacuum pressure impregnated, high voltage stator coils, IEEE Electrical Insulation Magazine, 12 (4) (1996) 15–22. DOI: 10.1109/57.526943

[20] **Stone G.C., Maughan C.V., Nelson D., Schultz R.P.** Impact of Slot Discharge and Vibration Sparking on Stator Winding Life in Large Generators, IEEE Electrical Insulation Magazine, 24 (5) (2008) 14–21. DOI: 10.1109/MEI.2008.4635657

[21] **Moore W.G., Khazanov A.** Insulation degradation in generator stator bars due to spark erosion and partial discharge damage, 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, (2010) 1–5. DOI: 10.1109/ELINSL.2010.5549794

[22] **Moore B., Khazanov A., Moudy H.** Stator Winding Failure due to Spark Erosion, 5th EPRI Turbine Generator Technology Transfer Workshop, (2008) 1–7.

[23] **Yang X., Zhao X., Hu J., He J.** Grading electric field in high voltage insulation using composite materials, IEEE Electrical Insulation Magazine, 34 (1) (2018) 15–25. DOI: 10.1109/MEI.2018.8246118

[24] **Klaussner B., Lang J., Lang S., Litinsky A., Schmidt G., Schulz-Drost C., Schaefer K., Staubach C.** Corona shielding system and electrical machine, US Patent, No. US10862362B2, (2020).

[25] **Muhrer V., Rogler W., Schaefer K.** Glow protection band, US Patent, No. US6645886B1, (2003).

[26] **Klaussner B., Meyer C., Muhrer V., Maurer A., Russel C., Schafer K.** Electric machine with a corona shield, US Patent, No. US20070149073A1, (2007).

[27] **Shi Zhiying.** Method for twining VPI corona-prevention layer between stator coil main insulating layer and corona-prevention layer, China Patent, No. CN100426630C, (2008).

[28] **Хубер Ю., Ширм Д., Ублер М.** Присадка, варианты ее применения, система изоляции и электрическая машина. Пат. RU2800608C2 Российская Федерация, МПК5 H 01 B 3/40, H 02 K 3/30; заявитель и патентообладатель СИМЕНС АКЦИЕНГЕЗЕЛЛЬШАФТ (DE). № 2021138127; заявл. 28.06.2023; опубл. 25.07.2023, Бюл. № 21. 26 с.: илл.

[29] **Brockschmidt M., Gröppel P., Pohlmann F., Rohr C., Röding R.** Material for insulation system, insulation system, external corona shield and an electric machine, US Patent, No. US20150041178A1, (2015).

[30] **Gegenava A., Khazanov A., Moore B.** Acceleration factors for faster Voltage Endurance Testing on generator insulation systems, 2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2017) 177–180. DOI: 10.1109/EIC.2017.8004717

[31] **Khazanov A., Vakser B., Gegenava A., Moore B.** Voltage endurance test at increasing voltage as a tool to express determinations of mathematical model parameters of electrical aging, 2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP), (2017) 810–815. DOI: 10.1109/CEIDP.2017.8257532

[32] **Staubach C., Kempen S., Pohlmann F.** Calculation of electric field distribution and temperature profile of end corona protection systems on large rotating machines by use of finite element model, 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, (2010) 1–6. DOI: 10.1109/ELINSL.2010.5549543

[33] **Маннанов Э.Р., Костельов А.М., Белько В.О., Андреев А.М., Железняк В.Н.** Моделирование разрядной активности в системе изоляции статорных обмоток турбогенераторов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 5. С. 69–80. DOI: 10.32603/2071-8985-2025-18-5-69-80

[34] **Mannanov E.R., Kostelov A.M., Belko V.O., Fedotov N.A., Govor V.M.** Investigation of the Thermophysical Processes in Highly Thermally Conductive Composite Material with a Complex Structure, 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), (2022) 1026–1029. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755505

[35] **Белько В.О., Феклистов Е.Г., Фэн Ш., Маннанов Э.Р., Костельов А.М.** Исследование электрофизических свойств материалов системы коронозащиты статорных обмоток турбогенераторов // Труды XX Международной Конференции «Электротехника, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты». 2024. С. 79–84.

[36] **Маннанов Э.Р., Коновалов А.В., Костельов А.М., Филин А.Г.** Особенности систем охлаждения и возможности повышения эффективности теплопередачи в обмотках статоров турбогенераторов с косвенным охлаждением // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 7. С. 5–15. DOI: 10.32603/2071-8985-2024-17-7-5-15

[37] **Kowalski M., Schmitz L., Gertz S., Kreischer C.** Advanced numerical Methods for accelerating Calculation of Eddy Current Loss in Roebel-Bars in Turbogenerator End-Regions, 2022 23rd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG), (2022) 1–4. DOI: 10.1109/COMPUMAG55718.2022.9827516

[38] **Otake Y., Umemoto T., Suga K., Yoshimura M., Tsurimoto T., Hasegawa H.** Influence of Defect Size on Insulation Deterioration of Epoxy Resins with Voids, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 28 (1) (2021) 52–57. DOI: 10.1109/TDEI.2020.008990

[39] **Маннанов Э.Р., Костельов А.М., Андреев А.М., Балыков О.С., Баранов В.С., Белько В.О.** Обзор методик оценки технического состояния электрической изоляции обмоток статоров высоковольтных турбогенераторов с воздушным охлаждением, находящихся в эксплуатации // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 4. С. 90–105. DOI: 10.32603/2071-8985-2025-18-4-90-105

[40] **Маннанов Э.Р., Костельов А.М., Таджибаев А.И., Андреев А.М.** Анализ уровня технических разработок полимерных материалов с высокой теплопроводностью для оценки возможности использования в системах изоляции обмоток турбогенераторов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 3. С. 21–35. DOI: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-21-35

[41] **Elspaß L., Backhaus K., Schlegel S., Stahl J.** Comparative Study on Different Outer Corona Protection Materials for Rotating High-Voltage Machines, 2022 IEEE 4th International Conference on Dielectrics (ICD), (2022) 166–170. DOI: 10.1109/ICD53806.2022.9863589

[42] **Stone G.C., Maughan C.V., Nelson D., Schultz R.P.** Impact of Slot Discharge and Vibration Sparking on Stator Winding Life in Large Generators, IEEE Electrical Insulation Magazine, 24 (5) (2008) 14–21. DOI: 10.1109/MEI.2008.4635657

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МАННАНОВ Эмиль Рамилевич – *руководитель группы, АО «Силовые машины», канд. техн. наук.*
E-mail: emil-mannanov@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9988-793X

КОСТЕЛЬОВ Андрей Михайлович – *главный специалист по обмоткам турбогенераторов, АО «Силовые машины», без степени.*
E-mail: Kostelov_AM@power-m.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3242-310X

КОРНЕЕВ Константин Викторович – *технический директор, АО «Силовые машины», канд. техн. наук.*
E-mail: Korneev_KV@power-m.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8021-4284

СТЕПАНОВ Александр Андреевич – *начальник технологического отдела по изоляционно-обмоточным процессам и материаловедению, АО «Силовые машины», без степени.*
E-mail: Stepanov_AA@power-m.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0123-7929

БЕЛЬКО Виктор Олегович – *директор ВШВЭ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.*
E-mail: vobelko@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8287-5561

REFERENCES

[1] **D. Onishi, A. Kumada, K. Hidaka, T. Umemoto, Y. Otake, T. Tsurimoto,** Surface potential measurement of stress grading system of high voltage rotating machine coils using pockels field sensor, 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), (2017) 95–98. DOI: 10.23919/ISEIM.2017.8088697

[2] **A. Litinsky, G. Schmidt, F. Pohlmann, H. Hirsch,** Advanced Assessment of Outer Corona Protection Material Durability, 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2018) 538–541. DOI: 10.1109/EIC.2018.8481083

[3] **M. Liese,** Vibration sparking, an ignored damage mechanism of high voltage windings. 2008 18th International Conference on Electrical Machines, (2008) 1–6. DOI: 10.1109/ICELMACH.2008.4799823

[4] **A.G. Gegenava,** Issledovanie i usovershenstvovanie protivokoronnykh pokrytii vysokovol'tnykh elektricheskikh mashin. Diss. kand. tekhn. nauk [Research and improvement of anti-corona coatings for high-voltage electrical machines. Cand. tech. sci. diss.], St. Petersburg, 2003.

[5] **A. Khazanov, J. Hutt,** Specific Aging Processes in Two-Pole, Air-Cooled, High-Voltage Rotating Machines, CIGRE A1 “Rotating Electrical Machines” COLLOQUIUM, (2017).

[6] **Y. Yamanaka, T. Umemoto, R. Ikeda, N. Okajima, T. Sakurai, T. Okamoto,** Deterioration of Corona Armor Tape by Partial Discharge and its Lifetime Evaluation for Form-wound Rotating Machine, 2023 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2023), 1–4. DOI: 10.1109/EIC55835.2023.10177341

[7] **Huang Ze, Xie Zhihui, Cheng Sheng, Zhou Jin, Zhang Yue, Liang Zhiming, Yang Shuai, Zhang Genbo, Liu Jiangjun,** Method for improving end current-carrying capacity of stator bar structure by designing stator bar structure, China Patent, No. CN119382441 (2025).

[8] **Feng Ya, Guo Weichang, Liu Zhenyu, He Xinlin, Liu Lang, Li Chunli, Zhao Xianghui, Lei Yang, Dai Songbai, Wang Jianmin, Xiong Yin, Li Haoran, Liu Zhuo,** Anti-corona coating and preparation method thereof, stator wire rod and stator, China Patent, No. CN120118614A, (2025).

[9] **Liu Wei, Cheng Sheng, Li Shanping, Zhou Jin, Zuo Rui, Liu Guoyong, Cheng Zhidong, Li Haonan, Huang Zhou, He Fuyou,** Stator bar anti-corona structure, China Patent, No. CN119864977A, (2025).

[10] **S. Jurkovic, K.M. Rahman,** The injection molded magnets shape of inner permanent magnetic machine extremely to pole modification, China Patent, No. CN106169821A, (2016).

[11] **Min Yanan, Zhang Dalong, Shao Wei, Wang Shuai,** Anti-corona manufacturing process for stator bar of high-capacity steam turbine generator, China Patent, No. CN119010496A, (2024).

[12] **M. Liese, M. Brown,** Design-dependent slot discharge and vibration sparking on high voltage windings, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 15 (4) (2008) 927–932. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4591212

[13] **Y. Xia, Z. Jia, Z. Guan, L. Wang, Z. Zhang,** Principles and characteristics of vibration sparking in high voltage stator slots, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 20 (1) (2013) 42–53. DOI: 10.1109/TDEI.2013.6451340

[14] **Y. Yamanaka, R. Ikeda, N. Okajima, S. Kikuta, T. Sakurai, T. Okamoto,** Evaluation on Lifetime of Several Corona Armor Tape for Form-Wound Rotating Machines under Partial Discharge Aging, 2024 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2024) 325–328. DOI: 10.1109/EIC58847.2024.10579404

[15] **C. Hudon, M. Belec, M. Levesque,** Study of slot partial discharges in air-cooled generators, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 15 (6) (2008) 1675–1690. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4712672

[16] **G.C. Stone, E.A. Boulter, I. Culbert, H. Dhiranl,** Electrical Insulation for Rotating Machines, Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004.

[17] **P. Mráz, V. Kindl, K. Hruška,** Influence of low-conductive coating on insulation system of rotary electric machines, Journal of Electrical Engineering, 63 (3) (2012) 180–185.

[18] **R. Jackson, A. Wilson,** Slot-Discharge Activity in Air-Cooled Motor and Generators. Proceedings of the IEE, 129 (3) (1982) 159–167.

[19] **F.T. Emery,** The application of conductive and stress grading tapes to vacuum pressure impregnated, high voltage stator coils, IEEE Electrical Insulation Magazine, 12 (4) (1996) 15–22. DOI: 10.1109/57.526943

[20] **G.C. Stone, C.V. Maughan, D. Nelson, R.P. Schultz**, Impact of Slot Discharge and Vibration Sparking on Stator Winding Life in Large Generators, IEEE Electrical Insulation Magazine, 24 (5) (2008) 14–21. DOI: 10.1109/MEI.2008.4635657

[21] **W.G. Moore, A. Khazanov,** Insulation degradation in generator stator bars due to spark erosion and partial discharge damage, 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, (2010) 1–5. DOI: 10.1109/ELINSL.2010.5549794

[22] **B. Moore, A. Khazanov, H. Moudy,** Stator Winding Failure due to Spark Erosion, 5th EPRI Turbine Generator Technology Transfer Workshop, (2008) 1–7.

[23] **X. Yang, X. Zhao, J. Hu, J. He,** Grading electric field in high voltage insulation using composite materials, IEEE Electrical Insulation Magazine, 34 (1) (2018) 15–25. DOI: 10.1109/MEI.2018.8246118

[24] **B. Klaussner, J. Lang, S. Lang, A. Litinsky, G. Schmidt, C. Schulz-Drost, K. Schaefer, C. Staubach,** Corona shielding system and electrical machine, US Patent, No. US10862362B2, (2020).

[25] **V. Muhrer, W. Rogler, K. Schaefer,** Glow protection band, US Patent, No. US6645886B1, (2003).

[26] **B. Klaussner, C. Meyer, V. Muhrer, A. Maurer, C. Russel, K. Schafer,** Electric machine with a corona shield, US Patent, No. US20070149073A1, (2007).

[27] **Shi Zhiying,** Method for twining VPI corona-prevention layer between stator coil main insulating layer and corona-prevention layer, China Patent, No. CN100426630C, (2008).

[28] **J. Huber, D. Schirm, M. Ubler,** Additive, its applications, insulation system and electric machine, Russian Federation Patent, No. RU2800608C2, (2023).

[29] **M. Brockschmidt, P. Gröppel, F. Pohlmann, C. Rohr, R. Röding,** Material for insulation system, insulation system, external corona shield and an electric machine, US Patent, No. US20150041178A1, (2015).

[30] **A. Gegenava, A. Khazanov, B. Moore,** Acceleration factors for faster Voltage Endurance Testing on generator insulation systems, 2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2017) 177–180. DOI: 10.1109/EIC.2017.8004717

[31] **A. Khazanov, B. Vakser, A. Gegenava, B. Moore,** Voltage endurance test at increasing voltage as a tool to express determinations of mathematical model parameters of electrical aging, 2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP), (2017) 810–815. DOI: 10.1109/CEIDP.2017.8257532

[32] **C. Staubach, S. Kempen, F. Pohlmann,** Calculation of electric field distribution and temperature profile of end corona protection systems on large rotating machines by use of finite element model, 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, (2010) 1–6. DOI: 10.1109/ELINSL.2010.5549543

[33] **A.M. Kostelov, V.O. Belko, A.M. Andreev, V.N. Zheleznyak,** Discharge Activity Simulation in Turbogenerators Stator Windings Insulation, LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science, 18 (5) (2025) 69–80. DOI: 10.32603/2071-8985-2025-18-5-69-80

[34] **E.R. Mannanov, A.M. Kostelov, V.O. Belko, N.A. Fedotov, V.M. Govor,** Investigation of the Thermophysical Processes in Highly Thermally Conductive Composite Material with a Complex Structure, 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), (2022) 1026–1029. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755505

[35] **V.O. Bel'ko, E.G. Feklistov, Sh. Fen, E.R. Mannanov, A.M. Kostel'ov,** Issledovanie elektrofizicheskikh svoistv materialov sistemy koronozashchity statornykh obmotok turbogeneratorov [Study of the electrophysical properties of materials for the corona protection system of stator windings of turbogenerators], Trudy XX Mezhdunarodnoi Konferentsii "Elektrotekhnika, Elektrotekhnologii, Elektrotekhnicheskie materialy i Komponenty" [Proceedings of the 20th International Conference "Electrical Engineering, Electrotechnology, Electrical Materials and Components"], (2024) 79–84.

[36] **E.R. Mannanov, A.V. Konovalov, A.M. Kostelov, A.G. Filin,** Features of Cooling Systems and Possibilities of Increased Heat Transfer Efficiency in Stator Windings of Indirect-Cooled Turbogenerators, LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science, 17 (7) (2024) 5–15. DOI: 10.32603/2071-8985-2024-17-7-5-15

[37] **M. Kowalski, L. Schmitz, S. Gertz, C. Kreischer,** Advanced numerical Methods for accelerating Calculation of Eddy Current Loss in Roebel-Bars in Turbogenerator End-Regions, 2022 23rd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG), (2022) 1–4. DOI: 10.1109/COMPUMAG55718.2022.9827516

[38] **Y. Otake, T. Umemoto, K. Suga, M. Yoshimura, T. Tsurimoto, H. Hasegawa,** Influence of Defect Size on Insulation Deterioration of Epoxy Resins with Voids, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 28 (1) (2021) 52–57. DOI: 10.1109/TDEI.2020.008990

[39] **E.R. Mannanov, A.M. Kostelov, A.M. Andreev, O.S. Balykov, V.S. Baranov, V.O. Belko,** Review of Methods for Assessing the Technical Condition of the Electrical Insulation Stator Windings of Air-Cooled Turbogenerators in Operation, LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science, 18 (4) (2025) 90–105. DOI: 10.32603/2071-8985-2025-18-4-90-105

[40] **E.R. Mannanov, A.M. Kostelov, A.I. Tajibaev, A.M. Andreev,** Analysis of Technical Level Developments of Polymeric Materials with High Thermal Conductivity to Assess the Possibility of Using Turbogenerator Windings in Insulation Systems, LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science, 17 (3) (2024) 21–35. DOI: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-21-35

[41] **L. Elspaß, K. Backhaus, S. Schlegel, J. Stahl,** Comparative Study on Different Outer Corona Protection Materials for Rotating High-Voltage Machines, 2022 IEEE 4th International Conference on Dielectrics (ICD), (2022) 166–170. DOI: 10.1109/ICD53806.2022.9863589

[42] **G.C. Stone, C.V. Maughan, D. Nelson, R.P. Schultz,** Impact of Slot Discharge and Vibration Sparking on Stator Winding Life in Large Generators, IEEE Electrical Insulation Magazine, 24 (5) (2008) 14–21. DOI: 10.1109/MEI.2008.4635657

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Emil R. MANNANOV – *Power machines JSC.*
E-mail: emil-mannanov@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9988-793X

Andrey M. KOSTELOV – *Power machines JSC.*
E-mail: Kostelov_AM@power-m.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3242-310X

Konstantin V. KORNEEV – *Power machines JSC.*
E-mail: Korneev_KV@power-m.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8021-4284

Alexander A. STEPANOV – *Power machines JSC.*
E-mail: Stepanov_AA@power-m.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0123-7929

Victor O. BELKO – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: vobelko@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8287-5561

Поступила: 22.04.2026; Одобрена: 05.07.2026; Принята: 07.07.2026.
Submitted: 22.04.2026; Approved: 05.07.2026; Accepted: 07.07.2026.

Глобальная энергия. Том 32, № 3, 2026. С. 59–70.
Global Energy, 2026, 32 (3); 59–70.

Металлургия. Материаловедение
Metallurgy. Material Science

Научная статья
УДК 621.762.04
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32305

А.Н. Борисов ✉ *, М.А. Ковалев, Е.Л. Гюлиханданов, А.А. Попович, В.Ш. Суфияров*

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

✉ brsvrtm@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ПОСТОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ TIC / INCONEL 718, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЕЙ СТРУЙНОГО НАНЕСЕНИЯ СВЯЗУЮЩЕГО С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ИНФИЛЬТРАЦИЕЙ

Аннотация. Показана возможность целенаправленного управления эксплуатационными свойствами металлокерамического материала TiC / Inconel 718, полученного методом струйного нанесения связующего с последующей инфильтрацией, за счет выбора режима постобработки. Установлено, что механические и трибологические характеристики материала определяются совместным влиянием остаточной пористости и фазового состава, которые изменяются в результате применения горячего изостатического прессования и термической обработки. Выявлены закономерности формирования структуры и свойств материала при различных режимах постобработки, что позволяет направленно формировать требуемый комплекс прочностных и трибологических характеристик в зависимости от условий эксплуатации.

Ключевые слова: струйное нанесение связующего, инфильтрация, Inconel 718, карбид титана, микроструктура, фазовый состав, механические свойства, абразивный износ.

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:

Борисов А.Н., Ковалев М.А., Гюлиханданов Е.Л. и др. Влияние постобработки на микроструктуру, механические и трибологические свойства металлокерамических материалов TiC / Inconel 718, изготовленных технологией струйного нанесения связующего с последующей инфильтрацией // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 3. С. 59–70. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32305

© Борисов А.Н., Ковалев М.А., Гюлиханданов Е.Л. и др., 2026. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32305

A.N. Borisov ✉ , *M.A. Kovalev,*
E.L. Gyulikhandanov, A.A. Popovich, V.S. Sufiiarov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
✉ brsvrtm@mail.ru

EFFECT OF POST-PROCESSING ON THE MICROSTRUCTURE, MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF TIC / INCONEL 718 CERMETS FABRICATED BY BINDER JETTING ADDITIVE MANUFACTURING AND SUBSEQUENT INFILTRATION

Abstract. The possibility of tailoring the performance characteristics of TiC / Inconel 718 cermets fabricated by binder jetting additive manufacturing followed by melt infiltration through the selection of post-processing routes is demonstrated. It was established that the mechanical and tribological properties of the material are governed by the combined effect of residual porosity and phase composition, both of which are modified by hot isostatic pressing and heat treatment. The relationships between post-processing conditions, microstructure evolution, and resulting properties were identified, enabling the targeted design of cermets with the required combination of strength and wear performance for specific service conditions.

Keywords: binder jetting additive manufacturing, infiltration, Inconel 718, TiC, microstructure, phase composition, mechanical properties, abrasive wear.

Acknowledgements: This work is supported by the Russian Science Foundation (No. 23 79-30004, https://rscf.ru/project/23-79-30004/).

Citation:

Borisov A.N., Kovalev M.A., Gyulikhandanov E.L. et al., Effect of post-processing on the microstructure, mechanical and tribological properties of TiC / Inconel 718 cermets fabricated by binder jetting additive manufacturing and subsequent infiltration, Global Energy, 32 (03) (2026) 59–70, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32305

Введение. Научно-технический прогресс в различных отраслях промышленности, таких как энергетическая, нефтегазовая, химическая, требует постоянного повышения эксплуатационных характеристик конструкционных материалов. При этом возможности традиционных металлических сплавов во многом приближаются к пределу функциональных возможностей. В связи с этим в современном материаловедении наблюдается устойчивый переход к композиционным материалам, способным более эффективно работать в условиях интенсивного износа и агрессивных сред. Особый интерес представляют металлокерамические материалы (МКМ), сочетающие вязкость металла с твердостью керамических армирующих компонентов [1]. Применение подобных материалов в различных высоконагруженных деталях позволяет повышать надежность и безопасность эксплуатации оборудования, а также снижать эксплуатационные затраты.

Одновременно с развитием композиционных материалов в рамках перехода к цифровому производству активно развиваются аддитивные технологии, обеспечивающие изготовление изделий сложной геометрии и возможность управления структурой материала [2, 3]. Особый интерес представляет технология струйного нанесения связующего, которая отличается высокой производительностью, относительной простотой процесса и отсутствием термического

© Borisov A.N., Kovalev M.A., Gyulikhandanov E.L. et al., 2026. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

воздействия на стадии формирования заготовки. Это исключает возникновение значительных остаточных напряжений и дефектов, характерных для процессов с локальным плавлением [4–6]. Ключевым преимуществом данной технологии является возможность получения материалов с высоким содержанием керамической фазы, что невозможно при использовании других аддитивных технологий, таких как селективное лазерное плавление [7, 8] или электронно-лучевая плавка [9]. МКМ с высоким содержанием керамики могут быть получены путем изготовления пористых керамических заготовок струйной 3D-печатью и последующей их инфильтрацией металлическим расплавом, что обеспечивает формирование композиционного материала с равномерным распределением фаз и хорошим межфазным взаимодействием [10]. Важным фактором при этом является высокая смачиваемость керамических частиц металлическим расплавом, как в системах материалов WC-Co [11], TiC Ni [12, 13] и др.

Для повышения эксплуатационных характеристик получаемых материалов применяют горячее изостатическое прессование (ГИП), позволяющее эффективно снижать остаточную пористость, и термическую обработку (ТО), приводящую к выделению упрочняющих фаз и способствующую повышению прочности и износостойкости конечного материала [14]. Подобные МКМ находят применение в условиях интенсивного абразивного износа, включая буровой инструмент, элементы насосного оборудования и другие узлы, работающие в агрессивных средах. Высокая твердость керамической фазы в сочетании с вязкостью металлической матрицы обеспечивает эффективное сопротивление изнашиванию и разрушению [15, 16].

Цель настоящей работы заключается в установлении закономерностей влияния постобработки, включающей ГИП и ТО, на микроструктуру, фазовый состав, механические и триботехнические свойства МКМ на основе TiC и Inconel 718, полученных методом струйного нанесения связующего с последующей инфильтрацией.

Методы и материалы

Исходным материалом для получения пористых керамических заготовок служил порошок карбида титана (TiC), характеризующийся осколочной формой частиц и средним размером 17,1 мкм. Заготовки были изготовлены технологией струйного нанесения связующего с использованием установки ExOne Innovent (North Huntington, USA).

В качестве инфильтранта использовался порошок из суперсплава Inconel 718. Инфильтрация проводилась с использованием печи Carbolite Gero LHTW 200-300/22-1G (Neuhausen, Germany) в вакууме при температуре 1370 °C; процесс включал этап удаления связующего при температуре 600 °C в течение 1 часа в атмосфере аргона.

ГИП проводили в атмосфере аргона при температуре 1200 ± 5 °C и давлении 130 МПа в течение 3 часов. ТО состояла из отжига при 1060 ± 5 °C с выдержкой 1 час и охлаждением на воздухе, а также двухступенчатого старения: выдержки при 760 ± 5 °C в течение 10 часов, охлаждения до 650 ± 5 °C за 2 часа и выдержки при этой температуре в течение 8 часов. После завершения обработки образцы охлаждали на воздухе.

Макроструктуру образцов исследовали с использованием оптического микроскопа Leica DMI5000. Пористость оценивали путем анализа изображений, полученных оптической микроскопией (ОМ), с использованием программного обеспечения Image J.

Для изучения особенностей микроструктуры образцов применяли сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) с использованием микроскопа Tescan Mira3 LMU (Brno, Czech Republic). Съемку выполняли в режиме регистрации обратно отраженных электронов (BSE). Фазовый состав материалов определяли методом рентгенофазового анализа на дифрактометре Bruker D8 Advance (Billerica, MA, USA) с использованием Cu-Kα-излучения (λ = 1,5418 Å).

Измерение твердости выполняли по методу Виккерса на приборе Zwick/Roell ZHU (Zwick-Roell GmbH & Co., Ulm, Germany) при нагрузке 100 Н.

Испытания на абразивный износ проводили в соответствии со стандартом ASTM G65 “Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus”. Испытания проводили по процедуре B при нагрузке 130 Н и 2000 оборотах колеса. Каждый образец подвергали двум последовательным циклам изнашивания. Потерю массы после каждого цикла определяли взвешиванием на аналитических весах с точностью до 0,0001 г.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлена схема процесса изготовления МКМ TiC / Inconel 718 с использованием технологии струйного нанесения связующего с последующей инфильтрацией. Формирование заготовки осуществляется путем выборочного нанесения жидкого связующего на слой порошкового материала в соответствии текущим сечением цифровой модели изделия [17], после чего порошковый слой подвергается локальному нагреву инфракрасным излучением, что обеспечивает предварительную фиксацию жидкого связующего. После этого рабочая платформа перемещается на шаг, соответствующий толщине слоя, и цикл нанесения порошка и связующего повторяется до полного построения изделия [18]. По завершении процесса печати рабочую платформу помещают в сушильный шкаф для низкотемпературной обработки, в ходе которой происходит отверждение связующего; после этого заготовки могут быть извлечены и очищены от излишков порошка. Последним этапом изготовления являлась инфильтрация, т.е. заполнение пор заготовки металлическим расплавом, в результате которой происходило формирование МКМ, представляющего собой матрицу из Inconel 718, непрерывно упрочненную частицами TiC. Объемное содержание керамической фазы в подобных МКМ определяется относительной плотностью пористой керамической заготовки, которая в данной работе составляла 50%.

Оценка макроструктуры полученного материала проводилась с использованием ОМ. На рис. 2а представлена панорама образца в исходном состоянии (ИСХ), т.е. после инфильтрации без применения дополнительной постобработки. Материал характеризовался остаточной пористостью около 1,8%. Наличие пор было связано с особенностями формирования пористой керамической заготовки, а также с неполным заполнением пространства пор расплавом в процессе инфильтрации. С целью снижения остаточной пористости применялось ГИП. Как видно из панорамы, представленной на рис. 2б, использование ГИП приводило к существенному уплотнению структуры (образец, подверженный ГИП, маркировался в работе как ГИП). Анализ демонстрировал снижение пористости до 0,2%, что свидетельствует о высокой эффективности ГИП как способа постобработки подобных материалов.

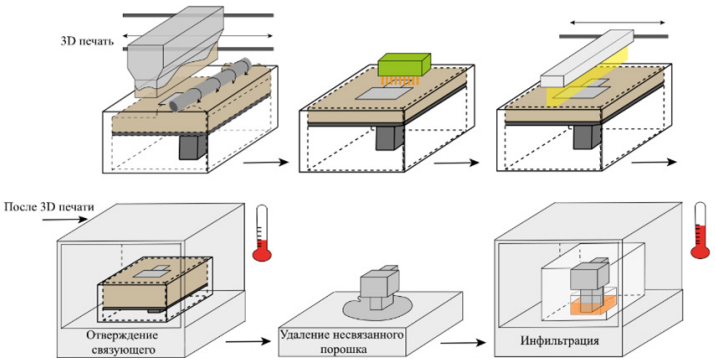


Рис. 1. Схема процесса изготовления МКМ с использованием технологии струйного нанесения связующего с последующей инфильтрацией

Fig. 1. Schematic diagram of the cermets fabrication process using binder jetting technology followed by infiltration

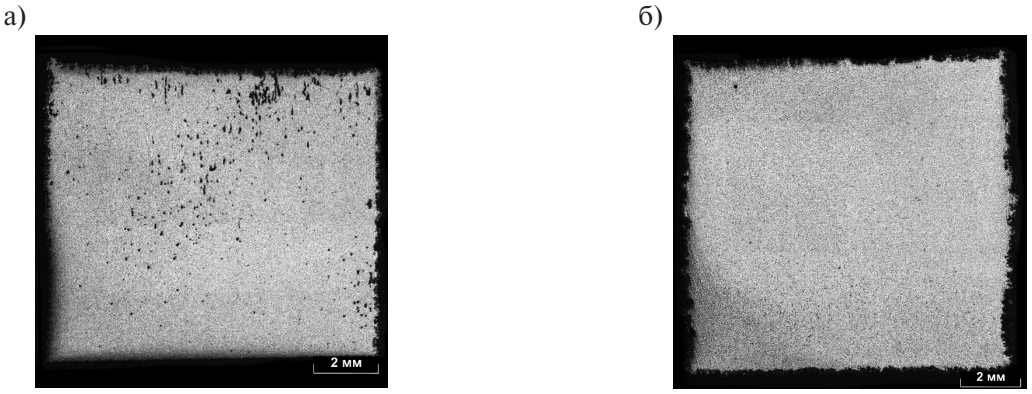


Рис. 2. Панорамы, полученные с использованием ОМ: образца ИСХ (а); образца ГИП (б)
Fig. 2. Optical micrographs of the as-built (AB) sample (a) and hot isostatically pressed (HIP) sample (b)

С целью дополнительного повышения эксплуатационных характеристик была проведена ТО, включающая отжиг и старение. Поскольку матричный сплав Inconel 718 является дисперсно-упрочняемым, выбранный режим ТО направлен на инициирование выделения вторичных фаз, способствующих упрочнению материала [19]. Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов в различных состояниях (рис. 3) показал, что во всех случаях основными фазами являются TiC и γ-никелевая матрица. На увеличенных участках рентгенограмм фиксируются рефлексы, соответствующие карбидной фазе типа MC, являющейся предположительно сложным карбидом на основе молибдена и титана. Также наблюдаются пики, соответствующие фазе Ni_3Ti, не являющейся когерентной по отношению к γ-матрице; при этом характерные для данного режима ТО пики γ′-фазы (Ni3Al) и γ′′-фазы (Ni_3Nb) не обнаруживаются.

Микроструктура образцов во всех исследованных состояниях имела схожий характер. Распределение частиц TiC в металлической матрице являлось равномерным, при этом их форма становится более сглаженной по сравнению с исходным карбидным порошком (рис. 4). Было выявлено наличие вторичной фазы, локализованной вокруг частиц TiC. Результаты энергодисперсионного анализа подтвердили результаты РФА о том, что данная фаза представляет собой карбид типа MC на основе молибдена и титана. Кроме того, в образцах, подвергнутых ТО (ТО и ГИП+ТО), наблюдались светлые вторичные выделения, локализованные по границе раздела фаз TiC–MC.

Результаты измерения твердости (рис. 5а) демонстрируют, что проведение ТО приводит к значительному увеличению твердости в сравнении с образцом ИСХ. Применение ГИП также способствует росту твердости, однако данный эффект выражен в меньшей степени по сравнению с ТО. Наибольшее значение твердости достигается при комбинированной обработке, что свидетельствует о синергетическом эффекте снижения пористости и упрочнения матрицы. Результаты испытаний на абразивный износ (рис. 5б) показали, что наименьшей массопотерей и соответственно наибольшей износостойкостью характеризовались образцы ТО. Наименьшую износостойкость демонстрировали образцы ГИП+ТО.

Износ образцов V рассчитывали по отношению $\Delta m/\rho$, где Δm – потеря массы образца, ρ – плотность материала. Коэффициент износа оценивали по формуле:

$$K_{\text{и}} = \frac{V}{FL}, \tag{1}$$

где F – нагрузка (Н); L – пройденный путь (м). Результаты расчетов представлены в табл. 1.

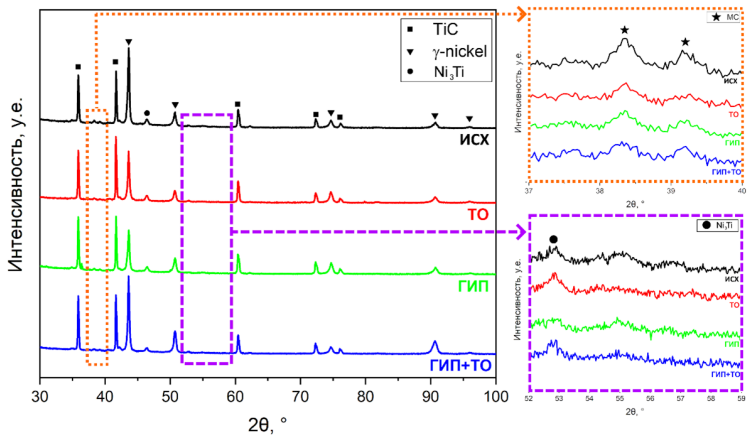


Рис. 3. Рентгенограммы образцов с различной постобработкой

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of samples subjected to different post-processing treatments

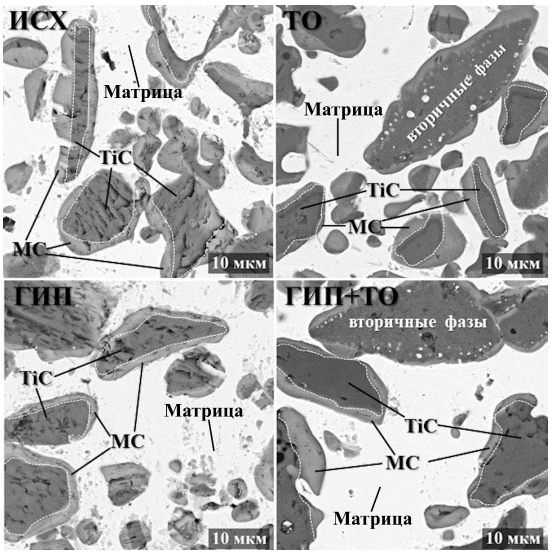


Рис. 4. СЭМ изображения образцов с различной постобработкой

Fig. 4. SEM images of samples subjected to different post-processing treatments

Таблица 1

Результаты испытаний на абразивный износ

Table 1

Results of abrasive wear testing

	ИСХ	ГИП	ТО	ГИП+ТО
Износ, мм^3	0,0214	0,0201	0,0201	0,0255
Коэффициент износа мм^3/(Н·м)	$5{,}72\cdot10^{-8}$	$5{,}39\cdot10^{-8}$	$5{,}37\cdot10^{-8}$	$6{,}82\cdot10^{-8}$

Более высокая износостойкость образцов ТО обусловлена формированием упрочненной, но сохраняющей достаточную вязкость матрицы, что обеспечивает эффективное перераспределение нагрузок и снижает склонность к выкрашиванию частиц TiC при абразивном воздействии.

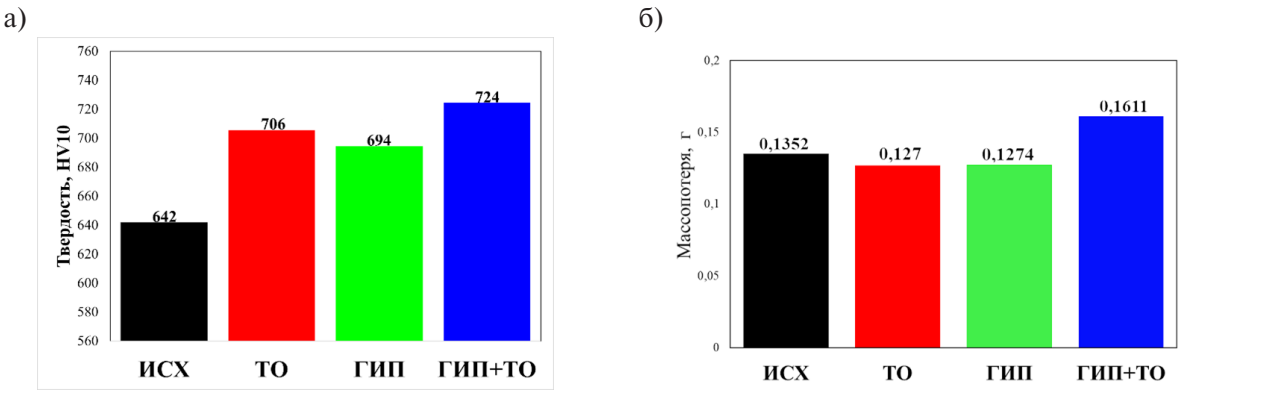


Рис. 5. Результаты измерения твердости образцов (а) и испытаний на абразивный износ (б)

Fig. 5. Hardness (a) and abrasive wear test results (b)

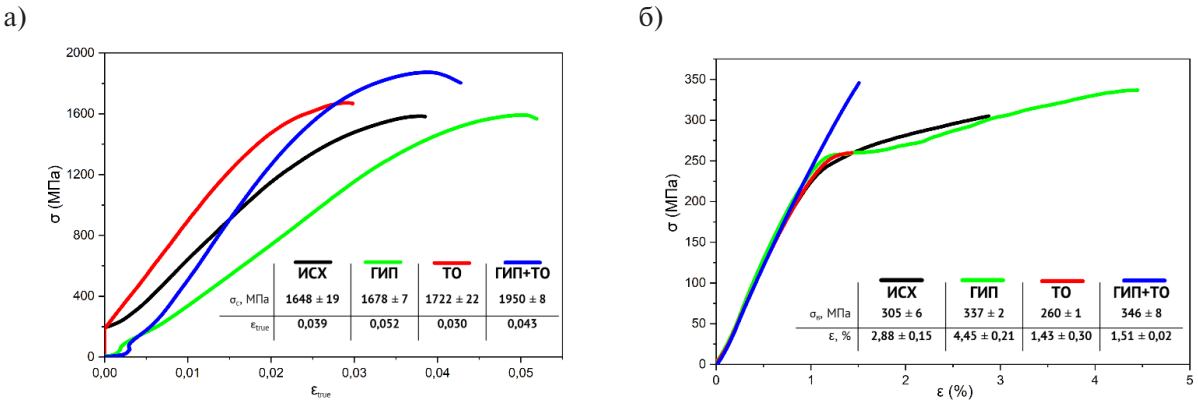


Рис. 6. Результаты испытаний на сжатие (а) и растяжение (б)

Fig. 6. Compression (a) and tensile test results (b)

В случае ГИП+ТО, несмотря на максимальную твердость и плотную структуру, повышение жесткости в результате ГИП, вероятно, приводит к снижению способности материала к локальной деформации, что в совокупности с выделением вторичных фаз в результате ТО способствует развитию хрупкого механизма износа и повышению массопотери.

Результаты испытаний на сжатие (рис. 6а) демонстрировали тенденцию, аналогичную результатам измерения твердости: ТО приводила к увеличению предела прочности при сжатии по сравнению с исходным состоянием, тогда как применение ГИП оказывало менее выраженное влияние, несмотря на повышение истинной деформации. Наибольшее значение прочности достигалось в образцах ГИП+ТО, что, как и в случае с твердостью, свидетельствует о синергетическом эффекте снижения пористости и упрочнения матрицы. Согласно результатам испытаний на растяжение, все образцы характеризовались сравнительно невысокими свойствами, что закономерно для композитов с высокой объемной долей керамической фазы (рис. 6б).

Наиболее благоприятное сочетание прочности и пластичности демонстрировали образцы после ГИП, что можно объяснить снижением концентрации напряжений за счет устранения пор и более эффективной передаче нагрузки между металлической матрицей и керамическим упрочнением. Максимальная прочность была достигнута после комбинированной обработки ГИП+ТО, однако сопровождалась значительным снижением пластичности. Наименьшими

свойствами характеризовались образцы после ТО. Вероятно, сохранение остаточной пористости в сочетании со структурно-фазовыми изменениями, происходящими в матрице при старении, оказывали негативное влияние на свойства МКМ.

Одним из возможных объяснений наблюдаемого охрупчивания материала является формирование η-фазы вместо упрочняющей γ′-фазы в результате старения. В работе [20] исследовались механизмы формирования η-фазы (Ni_3Ti) в литейном никелевом суперсплаве с повышенным отношением Ti/Al. Авторы показали, что образование η-фазы происходит через промежуточную стадию укрупненной γ′-фазы, а движущей силой данного процесса является более высокая термодинамическая стабильность η-фазы при увеличении содержания титана относительно алюминия. В текущей работе источником титана в системе мог служить TiC, поскольку в процессе инфильтрации его частицы в некоторой степени диссоциировали на поверхности вследствие взаимодействия с металлическим расплавом, что могло приводить к обогащению матрицы титаном и углеродом. Косвенным подтверждением этого являются наблюдаемые изменения морфологии керамической фазы: после инфильтрации частицы TiC приобретали более сглаженную форму, а их средняя площадь уменьшалась с 63,5 до 51,4 мкм^2. Кроме того, результаты энергодисперсионного анализа показали, что содержание титана в металлической матрице после инфильтрации существенно возрастало по сравнению с исходным порошком Inconel 718, применяемым в качестве инфильтранта. С учетом хрупкого характера η-фазы и ее склонности к замещению упрочняющих выделений γ′, можно предположить, что ее формирование стало одной из основных причин ухудшения механических свойств исследуемого материала после ТО.

Заключение

Изменение свойств МКМ TiC / Inconel 718 после постобработки определяется как снижением остаточной пористости, так и трансформацией фазового состава металлической матрицы. Уменьшение пористости в результате ГИП способствует достижению наиболее благоприятного сочетания прочности и пластичности при растяжении. В то же время структурно-фазовые изменения, происходящие при ТО, обеспечивают максимальную износостойкость материала, однако сопровождаются ухудшением его характеристик при растяжении. Предполагается, что частичное растворение TiC в процессе инфильтрации приводит к избыточному насыщению матрицы титаном, что может способствовать формированию хрупкой η-фазы вместо целевых γ′- и γ″-фаз при последующем старении. Для комбинированной обработки, включающей ГИП и ТО, были зафиксированы максимальные значения твердости и прочности при сжатии, при этом возможное выделение η-фазы не приводило к ухудшению данных характеристик, поскольку испытания на сжатие менее чувствительны к присутствию хрупких фаз. Полученные результаты свидетельствуют о том, что остаточная пористость и фазовый состав матрицы являются ключевыми факторами, определяющими механические и трибологические свойства МКМ TiC / Inconel 718, а выбор режимов постобработки позволяет целенаправленно формировать требуемый комплекс эксплуатационных характеристик.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Sufiiarov V., Borisov A., Popovich A., Erutin D.** Effect of TiC Particle Size on Processing, Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 718/TiC Composite Material made by Binder Jetting Additive Manufacturing, Metals, 13 (7) (2023) 1271. DOI: 10.3390/met13071271

[2] **Shabani M., Xiong W.** Metal matrix composite development using binder jet additive manufacturing, Metal-Matrix Composites, (2022) 215–223. DOI: 10.1007/978-3-030-92567-3_14

[3] **Dadkhah M., Mosallanejad M.H., Iuliano L., Saboori A.** A comprehensive overview on the latest progress in the additive manufacturing of metal matrix composites: potential, challenges, and feasible solutions, Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 34 (2021) 1173–1200. DOI: 10.1007/s40195-021-01249-7

[4] **Tian Y.F., Sun J., Xu Z.Q., Meng X.Q., Chen Z., Tang J.Y., Tao P., Luo L.M., Wu Y.C.** Microstructure and properties of tungsten-40 wt.-% copper composites fabricated by binder jet 3D printing, Materials Science & Engineering Technology, 55 (6) (2024) 851–863. DOI: 10.1002/mawe.202300112

[5] **Mostafaei A., De Vecchis P.R., Kimes K.A., Elhassid D., Chmielus M.** Effect of binder saturation and drying time on microstructure and resulting properties of sinter HIP binder-jet 3D-printed WC-Co composites, Additive Manufacturing, 46 (2021) 102128. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102128

[6] **Mostafaei A., Elliott A.M., Barnes J.E., Li F., Tan W., Cramer C.L., Nandwana P., Chmielus M.** Binder jet 3D printing – Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges, Progress in Materials Science, 119 (2021) 100707. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100707

[7] **Mandal V., Tripathi P., Kumar A., Singh S.S., Ramkumar J.** A study on selective laser melting (SLM) of TiC and B_4C reinforced IN718 metal matrix composites (MMCs), Journal of Alloys and Compounds, 901 (2022) 163527. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.163527

[8] **Zaitceva M., Borisov A., Popovich A., Sufiiarov V.** Selective laser melting of ferritic/martensitic oxide dispersion-strengthened steel: Processing, microstructure, and mechanical properties, Materials Science in Additive Manufacturing, 4 (1) (2025) 025060004. DOI: 10.36922/MSAM025060004

[9] **Peng H., Liu C., Guo H., Yuan Y., Gong S., Xu H.** Fabrication of WCp/NiBSi metal matrix composite by electron beam melting, Materials Science and Engineering: A, 666 (2016) 320–323. DOI: 10.1016/j.msea.2016.04.079

[10] **Амосов А.П., Латухин Е.И., Умеров Э.Р.** Применение процессов инфильтрации и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для получения керметов. Обзор // Известия вузов. Цветная Металлургия. 2021. Т. 27, № 6. С. 52–75.

[11] **Cramer C.L., Wieber N.R., Aguirre T.G., Lowden R.A., Elliott A.M.** Shape retention and infiltration height in complex WC-Co parts made via binder jet of WC with subsequent Co melt infiltration, Additive Manufacturing, 29 (2019) 100828. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100828

[12] **León-Patiño C.A., Braulio-Sánchez M., Aguilar-Reyes E.A., Bedolla-Becerril E.** Microstructure, mechanical and thermal properties of Ni matrix composites reinforced with high-volume TiC, Journal of Alloys and Compounds, 792 (2019) 1102–1111. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.04.132

[13] **Gao M.X., Pan Y., Oliveria F.J., Baptista J.L., Vieira J.M.** Microstructural characteristics of NiAl/TiC composites with high TiC content prepared by pressureless melt infiltration, Journal of Materials Science, 39 (2004) 6385–6387. DOI: 10.1023/B:JMSC.0000043615.96019.b3

[14] **Borisov A., Shamshurin A., Kovalev M., Popovich A., Sufiiarov V.** Binder Jetting Additive Manufacturing of Inconel 718/TiC Metal Matrix Composites: Influence of TiC Content on Processing, Microstructure, Mechanical and Tribological Properties, Materials, 17 (20) (2024) 5050. DOI: 10.3390/ma17205050

[15] **Plucknett K.P., Becher P.F.** Processing and Microstructure Development of Titanium Carbide–Nickel Aluminide Composites Prepared by Melt Infiltration/Sintering (MIS), Journal of the American Ceramic Society, 84 (1) (2001) 55–61. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2001.tb00607.x

[16] **Arnold J.M., Cramer C.L., Elliott A.M., Nandwana P., Babu S.S.** Microstructure evolution during near-net-shape fabrication of NixAly-TiC cermets through binder jet additive manufacturing and pressureless melt infiltration, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 84 (2019) 104985. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.104985

[17] **Sufiiarov V., Polozov I., Kantykov A., Khaidorov A.** Binder jetting additive manufacturing of 420 stainless steel: Densification during sintering and effect of heat treatment on microstructure and hardness, Materials Today: Proceedings, 30 (3) (2020) 592–595. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.144

[18] **Lores A., Azurmendi N., Agote I., Zuza E.** A review on recent developments in binder jetting metal additive manufacturing: materials and process characteristics, Powder Metallurgy, 62 (5) (2019) 267–296. DOI: 10.1080/00325899.2019.1669299

[19] **Ajay P., Dabhade V.V.** Heat treatments of Inconel 718 nickel-based superalloy: A Review, Metals and Materials International, 31 (2025) 1204–1231. DOI: 10.1007/s12540-024-01812-8

[20] **Hou K., Ou M., Xing W., Ma G., Hao X., Wang M., Ma Y.** The formation of η-Ni_3Ti phase microstructure in a cast nickel-based superalloy with high Ti/Al ratio, Journal of Materials Research and Technology, 29 (2024) 764–778. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.01.156

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БОРИСОВ Артем Николаевич – *инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*
E-mail: brsvrtm@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8321-4247

КОВАЛЕВ Марк Андреевич – *инженер-исследователь, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*
E-mail: kovalev.ma@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1929-4566

ГЮЛИХАНДАНОВ Евгений Львович – *ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.*
E-mail: gyulihand_el@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9337-2310

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич – *директор ИММиТ, 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 – *доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.*
E-mail: vadim.spbstu@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1889-4183

REFERENCES

[1] **V. Sufiiarov, A. Borisov, A. Popovich, D. Erutin,** Effect of TiC Particle Size on Processing, Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 718/TiC Composite Material made by Binder Jetting Additive Manufacturing, Metals, 13 (7) (2023) 1271. DOI: 10.3390/met13071271

[2] **M. Shabani, W. Xiong,** Metal matrix composite development using binder jet additive manufacturing, Metal-Matrix Composites, (2022) 215–223. DOI: 10.1007/978-3-030-92567-3_14

[3] **M. Dadkhah, M.H. Mosallanejad, L. Iuliano, A. Saboori,** A comprehensive overview on the latest progress in the additive manufacturing of metal matrix composites: potential, challenges, and feasible solutions, Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 34 (2021) 1173–1200. DOI: 10.1007/s40195-021-01249-7

[4] **Y.F. Tian, J. Sun, Z.Q. Xu, X.Q. Meng, Z. Chen, J.Y. Tang, P. Tao, L.M. Luo, Y.C. Wu,** Microstructure and properties of tungsten-40 wt.-% copper composites fabricated by binder jet 3D printing, Materials Science & Engineering Technology, 55 (6) (2024) 851–863. DOI: 10.1002/mawe.202300112

[5] **A. Mostafaei, P.R. De Vecchis, K.A. Kimes, D. Elhassid, M. Chmielus,** Effect of binder saturation and drying time on microstructure and resulting properties of sinter HIP binder-jet 3D-printed WC-Co composites, Additive Manufacturing, 46 (2021) 102128. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102128

[6] **A. Mostafaei, A.M. Elliott, J.E. Barnes, F. Li, W. Tan, C.L. Cramer, P. Nandwana, M. Chmielus,** Binder jet 3D printing – Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges, Progress in Materials Science, 119 (2021) 100707. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100707

[7] **V. Mandal, P. Tripathi, A. Kumar, S.S. Singh, J. Ramkumar,** A study on selective laser melting (SLM) of TiC and B_4C reinforced IN718 metal matrix composites (MMCs), Journal of Alloys and Compounds, 901 (2022) 163527. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.163527

[8] **M. Zaitceva, A. Borisov, A. Popovich, V. Sufiiarov,** Selective laser melting of ferritic/martensitic oxide dispersion-strengthened steel: Processing, microstructure, and mechanical properties, Materials Science in Additive Manufacturing, 4 (1) (2025) 025060004. DOI: 10.36922/MSAM025060004

[9] **H. Peng, C. Liu, H. Guo, Y. Yuan, S. Gong, H. Xu,** Fabrication of WCp/NiBSi metal matrix composite by electron beam melting, Materials Science and Engineering: A, 666 (2016) 320–323. DOI: 10.1016/j.msea.2016.04.079

[10] **A.P. Amosov, E.I. Latukhin, E.R. Umerov,** Applying Infiltration Processes and Self-Propagating High-Temperature Synthesis for Manufacturing Cermets: A Review, Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 63 (1) (2022) 81–100. DOI: 10.3103/S1067821222010047

[11] **C.L. Cramer, N.R. Wieber, T.G. Aguirre, R.A. Lowden, A.M. Elliott,** Shape retention and infiltration height in complex WC-Co parts made via binder jet of WC with subsequent Co melt infiltration, Additive Manufacturing, 29 (2019) 100828. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100828

[12] **C.A. León-Patiño, M. Braulio-Sánchez, E.A. Aguilar-Reyes, E. Bedolla-Becerril,** Microstructure, mechanical and thermal properties of Ni matrix composites reinforced with high-volume TiC, Journal of Alloys and Compounds, 792 (2019) 1102–1111. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.04.132

[13] **M.X. Gao, Y. Pan, F.J. Oliveria, J.L. Baptista, J.M. Vieira,** Microstructural characteristics of Ni-Al/TiC composites with high TiC content prepared by pressureless melt infiltration, Journal of Materials Science, 39 (2004) 6385–6387. DOI: 10.1023/B:JMSC.0000043615.96019.b3

[14] **A. Borisov, A. Shamshurin, M. Kovalev, A. Popovich, V. Sufiiarov,** Binder Jetting Additive Manufacturing of Inconel 718/TiC Metal Matrix Composites: Influence of TiC Content on Processing, Microstructure, Mechanical and Tribological Properties, Materials, 17 (20) (2024) 5050. DOI: 10.3390/ma17205050

[15] **K.P. Plucknett, P.F. Becher,** Processing and Microstructure Development of Titanium Carbide–Nickel Aluminide Composites Prepared by Melt Infiltration/Sintering (MIS), Journal of the American Ceramic Society, 84 (1) (2001) 55–61. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2001.tb00607.x

[16] **J.M. Arnold, C.L. Cramer, A.M. Elliott, P. Nandwana, S.S. Babu,** Microstructure evolution during near-net-shape fabrication of NixAly-TiC cermets through binder jet additive manufacturing and pressureless melt infiltration, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 84 (2019) 104985. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.104985

[17] **V. Sufiiarov, I. Polozov, A. Kantykov, A. Khaidorov,** Binder jetting additive manufacturing of 420 stainless steel: Densification during sintering and effect of heat treatment on microstructure and hardness, Materials Today: Proceedings, 30 (3) (2020) 592–595. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.144

[18] **A. Lores, N. Azurmendi, I. Agote, E. Zuza,** A review on recent developments in binder jetting metal additive manufacturing: materials and process characteristics, Powder Metallurgy, 62 (5) (2019) 267–296. DOI: 10.1080/00325899.2019.1669299

[19] **P. Ajay, V.V. Dabhade,** Heat treatments of Inconel 718 nickel-based superalloy: A Review, Metals and Materials International, 31 (2025) 1204–1231. DOI: 10.1007/s12540-024-01812-8

[20] **K. Hou, M. Ou, W. Xing, G. Ma, X. Hao, M. Wang, Y. Ma,** The formation of η-Ni3Ti phase microstructure in a cast nickel-based superalloy with high Ti/Al ratio, Journal of Materials Research and Technology, 29 (2024) 764–778. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.01.156

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Artem N. BORISOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: brsvrtm@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8321-4247

Mark A. KOVALEV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: kovalev.ma@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1929-4566

Evgeniy L. GYULIKHANDANOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: gyulihand_el@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9337-2310

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: 11.06.2026; Одобрена: 28.06.2026; Принята: 01.07.2026.
Submitted: 11.06.2026; Approved: 28.06.2026; Accepted: 01.07.2026.

Глобальная энергия. Том 32, № 3, 2026. С. 71–81.
Global Energy, 2026, 32 (3); 71–81.

Научная статья
УДК 678
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32306

А.И. Колотий[1] ✉ , *Д.В. Нечаев*[1], *С.Б. Ермаков*[2]

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

[2] Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

✉ aleksandr.spbpu@gmail.com

ЗАВИСИМОСТЬ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ ИЗ PEEK И PEEK CF ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ТРЕХТОЧЕЧНЫЙ ИЗГИБ ОТ ПАРАМЕТРОВ 3D-ПЕЧАТИ

Аннотация. В работе исследовано влияние траектории 3D-печати и постпечатного отжига на прочность при трехточечном изгибе образцов из полиэфирэфиркетона (PolyEther Ether Ketone, PEEK) и композиционного материала PEEK CF. Образцы изготавливали методом FDM-печати с концентрической, прямолинейной и поперечной траекториями укладки материала. Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 4648–2014 (ISO 178:2010). Показано, что траектория печати существенно влияет на прочность и механизм разрушения. Наибольшая прочность достигалась при концентрической укладке, тогда как поперечная ориентация приводила к снижению прочности и более хрупкому разрушению. Влияние углеродного волокна зависело от траектории печати: при концентрической укладке наблюдалось повышение прочности, при поперечной – снижение прочностных характеристик. Эффект постпечатного отжига также определялся траекторией укладки: для концентрических образцов отмечено устойчивое повышение прочности, тогда как для прямолинейных и поперечных образцов эффект был менее выраженным или отрицательным. Полученные результаты подтверждают необходимость комплексного учета траектории печати, состава материала и режима термообработки при проектировании изделий из PEEK и PEEK CF.

Ключевые слова: полиэфирэфиркетон, PEEK CF, углеродное волокно, FDM-печать, трехточечный изгиб, отжиг, прочность при изгибе, аддитивные технологии.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Разработка моделей деградации служебных свойств металлических и композиционных материалов для строительства в условиях многолетнемерзлых грунтов» (FSEG-2024-0009).

Для цитирования:

Колотий А.И., Нечаев Д.В., Ермаков С.Б. Зависимость механических характеристик изделий из PEEK и PEEK CF при испытаниях на трехточечный изгиб от параметров 3D-печати // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 3. С. 71–81. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32306

© Колотий А.И., Нечаев Д.В., Ермаков С.Б., 2026. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32306

A.I. Kolotiy[1] ✉ , *D.V. Nechaev*[1], *S.B. Ermakov*[2]

[1] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;
[2] Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

✉ aleksandr.spbpu@gmail.com

INFLUENCE OF 3D PRINTING PARAMETERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PEEK AND PEEK CF SPECIMENS UNDER THREE-POINT BENDING TESTS

Abstract. This study investigates the influence of 3D printing toolpath and post-print annealing on the flexural strength of polyether ether ketone (PEEK) and PEEK CF composite specimens under three-point bending. The specimens were manufactured using fused deposition modeling (FDM) with concentric, rectilinear, and transverse deposition patterns. Mechanical testing was performed in accordance with GOST 4648–2014 (ISO 178:2010). The results demonstrate that the printing toolpath has a significant effect on both flexural strength and failure mechanisms. The highest strength values were achieved with the concentric deposition pattern, whereas the transverse orientation resulted in reduced strength and more brittle fracture behavior. The effect of carbon fiber reinforcement was found to depend on the printing toolpath: an increase in strength was observed for concentrically printed specimens, while a decrease in mechanical performance occurred for specimens printed with the transverse pattern. The influence of post-print annealing was also toolpath-dependent. Concentric specimens exhibited a consistent improvement in flexural strength after annealing, whereas the effect was less pronounced or even detrimental for rectilinear and transverse specimens. The obtained results highlight the necessity of considering printing toolpath, material composition, and heat-treatment conditions simultaneously when designing PEEK and PEEK CF components manufactured by additive technologies.

Keywords: PEEK, PEEK CF, polyether ether ketone, carbon fiber, fused deposition modeling, three-point bending, annealing, flexural strength, additive manufacturing.

Acknowledgements: The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment "Development of models for the degradation of service properties of metallic and composite materials for construction in permafrost conditions" (FSEG-2024-0009).

Citation:

Kolotiy A.I., Nechaev D.V., Ermakov S.B., Influence of 3D printing parameters on the mechanical properties of PEEK and PEEK CF specimens under three-point bending tests, Global Energy, 32 (03) (2026) 71–81, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32306

Введение. Аддитивные технологии – в частности, Fused Deposition Modeling (FDM) – активно применяются для изготовления изделий из высокопрочных термопластов, таких как полиэфирэфиркетон (PolyEther Ether Ketone, PEEK) и композитов на его основе. PEEK сочетает высокую прочность, термостойкость и химическую стойкость, поэтому его детали востребованы в космической, авиационной, автомобильной и медицинской отраслях. При этом механические свойства 3D-печатных деталей сильно зависят от условий печати. Будучи полукристаллическим полимером с высокой температурой плавления, PEEK особенно чувствителен к режиму формирования: температура сопла и рабочей камеры, скорость печати, скорость охлаждения и другие параметры определяют структуру и прочность напечатанной заготовки. В результате напечатанные изделия часто демонстрируют большую вариативность свойств и выраженную анизотропию по сравнению с деталями, полученными традиционными методами [1–5].

© Kolotiy A.I., Nechaev D.V., Ermakov S.B., 2026. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Анизотропия свойств возникает на двух уровнях. На молекулярном уровне она объясняется ориентированием макромолекул в процессе экструзии и неоднородной степенью кристалличности в разных направлениях. На надмолекулярном уровне анизотропия определяется архитектурой укладки дорожек: при послойном формировании изделие состоит из отдельных слоев, каждый из которых образован экструдированными линиями (дорожками). Это приводит к формированию множественных границ раздела, образованных слабым зацеплением между полимерными цепями соседних дорожек и слоев, которые оказывают определяющее влияние на механические характеристики изделия. Факторы печати, влияющие на адгезию между слоями (например, температура, высота слоя, скорость печати), играют при этом ключевую роль в печати высокотемпературными термопластами. Следовательно, прочность напечатанного изделия определяется не только свойствами матрицы PEEK, но и ориентацией дорожек и качеством межслойной адгезии [6–10].

Параметры печати (температуры сопла и камеры, скорость печати, высота слоя и т.д.) задают тепловую историю детали и определяют степень кристалличности полимера. Для полукристаллического PEEK соотношение аморфной и кристаллической фаз напрямую влияет на его прочностные и деформационные характеристики на молекулярном уровне. Поэтому оптимальная настройка режимов печати и последующая термообработка существенно повышают прочность изделия [11–14].

Для оценки качества полученных образцов в работе применяли испытания на трехточечный изгиб. Методы нагружения на изгиб, включая трех- и четырехточечные схемы, широко используются при исследовании механического поведения материалов, поскольку по ряду экспериментальных параметров они удобнее испытаний на растяжение и сжатие. Их преимущество заключается в сравнительно простой реализации: образец не требует жесткого закрепления или высокоточной подготовки торцевых поверхностей, а надежность результатов в значительной степени определяется корректным размещением образца на опорах. Кроме того, испытания на изгиб проводятся при меньших нагрузках и сопровождаются более выраженными перемещениями, что упрощает регистрацию деформационного отклика и снижает требования к чувствительности измерительного оборудования. Важным преимуществом данного подхода является его высокая информативность. В рамках одного эксперимента можно определить несколько механических характеристик материала, в том числе модуль упругости, модуль сдвига, а также прочностные параметры, связанные с действием нормальных и касательных напряжений. Сочетание простоты проведения, высокой чувствительности к изменению структуры материала и полноты получаемых данных делает испытания на изгиб эффективным методом экспериментальной механики, особенно при изучении полимеров и полимерных композиционных материалов (ПКМ) [15, 16].

Цель настоящей работы заключается в установлении закономерностей влияния режимов печати и температурной истории на прочность изделий из PEEK и армированного углеродным волокном PEEK (PEEK CF), а также в выявлении взаимосвязи между технологическими параметрами, микроструктурными особенностями материала и механизмами разрушения.

Методы и материалы

В исследовании использовались два типа материалов на основе высокотемпературного термопласта PEEK:

- чистый PEEK;
- композиционный материал PEEK CF, содержащий 15 мас. % мелкодисперсного углеродного волокна.

Выбор данных материалов обусловлен их широким применением в аддитивных технологиях для изготовления конструкционных изделий с повышенными требованиями к прочности и термостойкости.



Рис. 1. Траектории печати образцов: а) концентрическая, б) прямолинейная, в) поперечная
Fig. 1. Printing toolpaths: a) concentric, b) rectilinear, c) transverse

Форма и размеры образцов для испытаний на изгиб соответствовали требованиям ГОСТ 4648–2014 (ISO 178:2010). Образцы имели форму прямоугольного бруска, что обеспечивает сопоставимость результатов и корректное определение характеристик при изгибе.

Для оценки влияния технологических параметров на механические свойства были выбраны три варианта траектории печати (заполнения), различающиеся ориентацией экструдированных дорожек относительно оси образца. Схема печати представлена на рис. 1:

- Концентрическая траектория – укладка материала осуществляется по замкнутым контурам от внешней поверхности к центру образца.
- Прямолинейная траектория – формируются два внешних периметра, а внутренний объем заполняется под углом 45° к оси образца с чередованием ортогональных направлений в соседних слоях.
- Поперечная траектория – укладка дорожек осуществляется под углом 90° к продольной оси образца.

Такая вариация траекторий позволяет целенаправленно изменять степень вовлечения межслойной адгезии в процесс деформирования и разрушения образцов.

Данные виды печати образцов позволяют выявить совокупность факторов, таких как межслойная и междорожечная адгезии (рис. 2), расположение наполнителя, скорость охлаждения при печати, влияющих на механические характеристики.

Печать осуществлялась на 3D-принтере с закрытой термостатируемой камерой, что обеспечивает стабилизацию температурного режима и снижение градиентов охлаждения. Основные параметры печати приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы печати образцов

Table 1

Printing parameters

Материал	Температура экструдера, °C	Температура стола, °C	Температура в камере, °C	Скорость печати мм/с	Сушка до печати, Темп./Время	Отжиг после печати, Темп./Время
PEEK	440	150	70	30	130 °C / 6 ч	200 °C / 8 ч
PEEK CF	440	150	70	25	130 °C / 6 ч	200 °C / 8 ч

После печати проводился визуальный и измерительный контроль образцов. PEEK относится к полукристаллическим полимерам, а степень его кристалличности существенно зависит от температурно-временных условий переработки. После печати образцы различались по внешнему виду и оттенку поверхности: у образцов с концентрическим заполнением наблюдался более темный и стекловидный оттенок, тогда как образцы с поперечным заполнением имели более равномерную светло-песочную окраску. После отжига (термообработки) цвет образцов выравнивался и становился более однородным. Для PEEK CF различия во внешнем виде выражены слабее: сразу после печати концентрические образцы также были несколько темнее остальных,

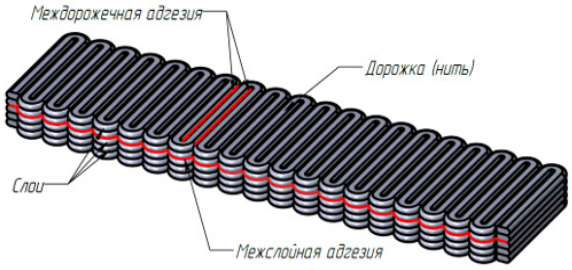


Рис. 2. Схема слоев и дорожек на образце с поперечной траекторией печати
Fig. 2. Schematic representation of layers and filament roads in a specimen printed with a transverse toolpath strategy

а после отжига их цвет выравнивался и приобретал более равномерный светло-серый оттенок. Эти изменения внешнего вида предположительно можно рассматривать как косвенный признак структурных различий, связанных с разной степенью кристалличности, что подтверждается в работе [8] испытаниями образцов после печати без термообработки и после отжига.

Испытания на изгиб проводили по трехточечной схеме нагружения в соответствии с ГОСТ 4648–2014. Образец устанавливали на две опоры, после чего нагрузку прикладывали в средней части пролета. Испытание продолжали до полного разрушения образца, частичного разрушения, сопровождавшегося падением нагрузки до нуля, либо до проскальзывания образца между опорами.

Полученные значения использовались для оценки прочностных характеристик и анализа влияния технологических параметров печати, наполнителя и термообработки на механическое поведение образцов.

Результаты

Испытания образцов из PEEK и PEEK CF на трехточечный изгиб показали, что прочность и характер деформирования определяются совокупным влиянием нескольких факторов, включая траекторию укладки расплава при печати, последующий отжиг, наличие наполнителя и температуры испытания.

Для исследованных материалов определяющим фактором является именно траектория печати, поскольку она задает механизм восприятия внешней нагрузки и, соответственно, степень влияния межслойной адгезии на процесс разрушения. Это имеет принципиальное значение для 3D-печати, при которой изделие формируется системой отдельных экструдированных дорожек (нитей), а междорожечные и межслойные границы могут выступать в качестве структурно ослабленных областей.

При концентрическом заполнении механизм деформирования и разрушения образцов наиболее близок к характерному для монолитных полимерных материалов. На начальной стадии нагружения преобладает упругая деформация, сопровождаемая перестройкой надмолекулярной структуры. По мере увеличения нагрузки развивается пластическая деформация, связанная со смещением сегментов макромолекул. При дальнейшем нагружении возможен переход к стадии разрушения, связанной с разрывом полимерных цепей [8]. В настоящем исследовании образцы из ненаполненного PEEK демонстрировали пластическую деформацию без перехода к хрупкому разрушению (рис. 3а).

Для образцов из PEEK CF с концентрическим заполнением в целом наблюдался сходный механизм деформирования и разрушения, однако наличие углеродного наполнителя приводило к повышению жесткости прежде всего в растягиваемых слоях. Во всех случаях фиксировалось разрушение отдельных слоев. Максимальная пластическая деформация была характерна

а) Без ТО Отжиг



б) Без ТО Отжиг



Рис. 3. Концентричные образцы после испытания: а) PEEK, б) PEEK CF
Fig. 3. Concentric specimens after flexural testing: a) PEEK, b) PEEK CF

а) Без ТО Отжиг

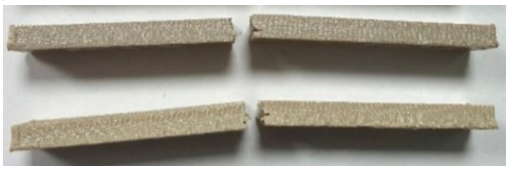


б) Без ТО Отжиг



Рис. 4. Прямолинейные образцы после испытания: а) PEEK, б) PEEK CF
Fig. 4. Rectilinear specimens after flexural testing: a) PEEK, b) PEEK CF

а) Без ТО Отжиг



б) Без ТО Отжиг

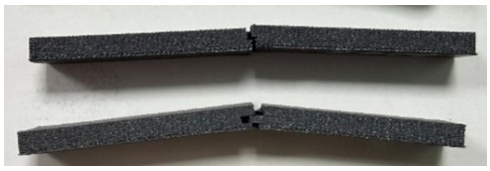


Рис. 5. Поперечные образцы после испытания: а) PEEK, б) PEEK CF
Fig. 5. Transverse specimens after flexural testing: a) PEEK, b) PEEK CF

для образца без термообработки. Отжиг приводил к увеличению жесткости и смещению механизма разрушения в сторону более хрупкого (рис. 3б).

При других типах заполнения на характер разрушения в большей степени влияет межслойная адгезия, в результате наблюдается смешанный характер разрушения с вкладом межслойного расслоения и излома дорожек. Для образцов из PEEK и PEEK CF с прямолинейным заполнением наблюдались различия в механизме разрушения (рис. 4). Образцы из ненаполненного полимера характеризовались преимущественно хрупким изломом, тогда как композитные образцы демонстрировали выраженное расслоение и разрыв преимущественно в растягиваемых слоях. Сжимаемые слои при этом сохраняли целостность, поскольку после падения нагрузки испытание прекращали.

Поперечное заполнение в наибольшей степени отражает вклад межслойной адгезии в прочность образцов и во всех рассмотренных случаях сопровождается хрупким разрушением (рис. 5).

Обсуждение

Влияние введения углеволокна на прочность оказалось менее однозначным, чем предполагалось. Для наглядного сопоставления на рис. 6 представлены графики, отражающие влияние углеволокна на прочность в зависимости от вида заполнения образца.

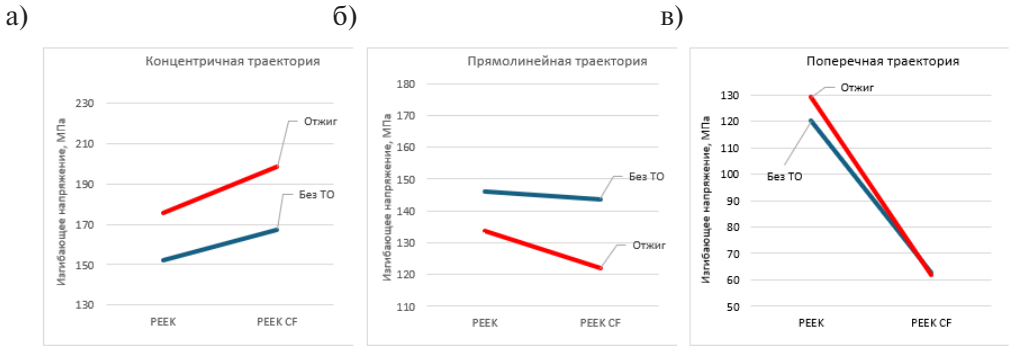


Рис. 6. Зависимость прочности от добавления 15% углеволокна
Fig. 6. Effect of 15 wt.% carbon fiber addition on flexural strength

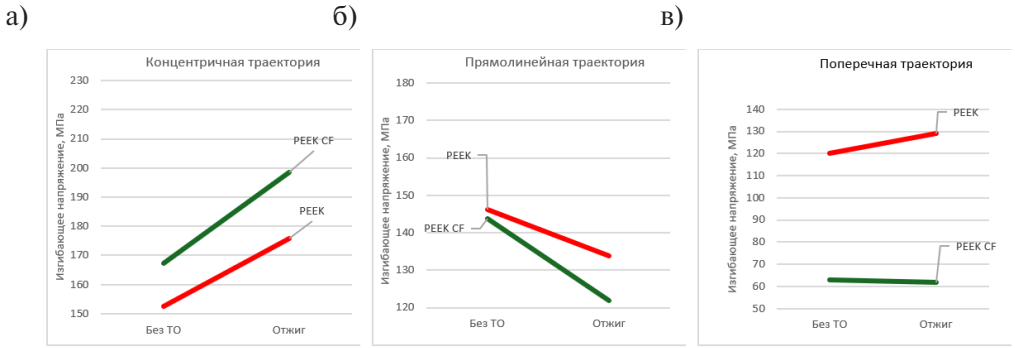


Рис. 7. Зависимость прочности от отжига после печати
Fig. 7. Effect of post-print annealing on flexural strength

К числу основных факторов, определяющих прочность композитных изделий, относятся ориентация волокон наполнителя и межфазная адгезия. Как следует из представленных данных, наиболее выраженное положительное влияние введения углеволокна наблюдается при концентрическом заполнении как без термообработки, так и после отжига. Это обусловлено ориентацией волокон относительно приложенной нагрузки: в данном случае они преимущественно ориентированы вдоль траектории печати и, соответственно, более эффективно участвуют в восприятии нагрузки.

Для образцов с прямолинейным заполнением влияние углеволокна носит неоднозначный характер. Влияние на прочность практически не проявляется, после отжига наблюдается некоторое снижение прочности, особенно для композитного материала.

При поперечном заполнении введение углеволокна оказывает отрицательное влияние на прочность. Это, как отмечалось выше, связано с ориентацией волокон относительно оси экструзии и направлением действия нагрузки: в данном случае волокна в основном расположены перпендикулярно направлению растягивающих напряжений и поэтому не обеспечивают эффективного армирования.

Влияние отжига на механические характеристики показано на рис. 7. Отжиг в данном случае целесообразно рассматривать как повышение доли кристаллической фазы относительно аморфной составляющей материала образцов и выравнивание между образцами разного заполнения исходно имеющих разную температурную историю печати.

По результатам механических испытаний наибольшее положительное влияние отжиг оказывает на образцы, изготовленные с концентрическим заполнением, для которых наблюдается повышение прочности (рис. 7а). Для образцов с прямолинейным заполнением влияние отжига оказывается менее благоприятным, а в ряде случаев – сильно отрицательным, особенно для композита PEEK CF. Вероятно, это связано с тем, что увеличение кристалличности сопровождается ростом жесткости и снижением способности материала и межслойных границ к релаксации напряжений, вследствие чего повышается склонность к более хрупкому разрушению. Для поперечного заполнения выраженного влияния отжига не наблюдается, для чистого PEEK можно предположить некоторое упрочнение межслойного связывания.

Полученные результаты позволяют заключить, что степень кристалличности зависит не только от последующей термообработки, но и от режима печати, прежде всего от скорости охлаждения экструдируемой нити. При концентрическом заполнении отдельная дорожка, по-видимому, охлаждается быстрее, чем при прямолинейном и поперечном заполнении, поскольку экструдер проходит замкнутую траекторию, и к моменту укладки следующего участка предыдущая дорожка успевает остыть. При прямолинейном и поперечном заполнениях соседние дорожки укладываются последовательно на близком расстоянии, что может способствовать их дополнительному подогреву и, соответственно, изменению условий кристаллизации.

Выводы

Выполненное исследование позволило установить закономерности формирования механических свойств изделий из PEEK и PEEK CF, полученных методом FDM-печати, с учетом влияния технологических параметров, структуры материала и условий эксплуатации.

Введение углеродного волокна влияет на прочность образцов неоднозначно. При благоприятной ориентации волокон, соответствующей концентрической траектории укладки, прочностные характеристики повышаются за счет более эффективного восприятия нагрузки армирующим наполнителем. В то же время при неблагоприятной ориентации, характерной для поперечной укладки, армирование не обеспечивает ожидаемого эффекта и может сопровождаться снижением прочности. Таким образом, эффективность армирования определяется не только наличием наполнителя, но и его ориентацией относительно направления нагрузки.

Отжиг оказывает существенное влияние на свойства материала за счет увеличения степени кристалличности. Для образцов с концентрической структурой это приводит к росту прочности, тогда как при прямолинейной и поперечной траекториях эффект может быть нейтральным или отрицательным вследствие повышения хрупкости и снижения способности межслойных границ к релаксации напряжений, что соответствует литературным данным [1–10]. Полученные данные позволяют предположить, что степень кристалличности определяется тепловой историей печати, зависящей от стратегии укладки материала. При этом чем выше исходная степень кристалличности материала после печати (характерная для прямолинейного и поперечного заполнения), тем менее выражено влияние последующего отжига, поскольку потенциал дополнительной кристаллизации оказывается ограниченным. Для более точного определения зависимости требуется определение соотношения кристаллической и аморфной фаз методами дифференциальной сканирующей калориметрии или рентгеновской дифракции.

Ключевым фактором, определяющим прочностные характеристики, является траектория печати. Концентрическое заполнение обеспечивает наиболее благоприятное распределение напряжений и формирует механизм деформирования, близкий к монолитному материалу, что приводит к максимальным значениям прочности и пластичности. Прямолинейная траектория укладки приводит к смешанному характеру разрушения, при котором заметную роль играет межслойная адгезия. Наименее эффективной является поперечная укладка: для нее характерно преимущественно хрупкое разрушение, связанное с недостаточной прочностью междорожечной и межслойной адгезии.

В работе установлено, что механические свойства изделий из PEEK и PEEK CF, полученных методом FDM, определяются комплексным взаимодействием параметров печати и получаемой микроструктуры. Оптимизация траектории печати и режимов термообработки является необходимым условием обеспечения требуемого уровня прочности и надежности изделий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Cui M., Mao J.** Effect of low temperature on mechanical properties and fracture behavior of 3D printed short carbon fiber reinforced polyether ether ketone composites (CF/PEEK), Scientific Reports, 15 (2025) 36244. DOI: 10.1038/s41598-025-20220-5

[2] **Леонович И.А., Адинцов Д.Д.** Исследование свойств ABS-пластика в образцах, полученных по технологии FFF-печати // Вестник Белорусско-Российского университета. 2023. Т. 78, № 1. С. 13–21. DOI: 10.53078/20778481_2023_1_13

[3] **Ермакова В.А., Гасперович Е.В., Ермаков А.И., Литвяк В.В.** Исследование прочностных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати из PLA // НАУКА и ТЕХНИКА. 2022. Т. 21, № 2. С. 107–113. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-2-107-113

[4] **Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Мельников А.А., Павленко С.А., Гусева М.А., Пыхтин А.А., Ларионов С.А.** Исследование влияния теплового режима FDM-печати на структурирование и коробление образцов полиэтилена // Труды ВИАМ. 2021. № 7. С. 48–58. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-48-58

[5] **Говоров И.С., Потапов А.А., Веневцев А.Ю.** Исследование физико-механических свойств образцов после FDM-печати // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. № 11. С. 446–450. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-446-447

[6] **Rendas P., Figueiredo L., Geraldo M., Vidal C., Soares B.A.** Improvement of tensile and flexural properties of 3D printed PEEK through the increase of interfacial adhesion, Journal of Manufacturing Processes, 93 (2023) 260–274. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.03.024

[7] **Xia Gao, Shunxin Qi, Xiao Kuang, Yunlan Su, Jing Li, Dujin Wang.** Fused filament fabrication of polymer materials: A review of interlayer bond, Additive Manufacturing, 37 (2021) 101658. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101658

[8] **Chuncheng Yang, Xiaoyong Tian, Dichen Li, Yi Cao, Feng Zhao, Changquan Shi.** Influence of thermal processing conditions in 3D printing on the crystallinity and mechanical properties of PEEK material, Journal of Materials Processing Technology, 248 (2017) 1–7. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.04.027

[9] **Ambati S.S., Ambatipudi R.** Effect of infill density and infill pattern on the mechanical properties of 3D printed PLA parts, Materials Today: Proceedings, 64 (1) (2022) 804–807. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.05.312

[10] **Appalsamy T., Hamilton S.L., Kgaphola M.J.** Tensile Test Analysis of 3D Printed Specimens with Varying Print Orientation and Infill Density, Journal of Composites Science, 8 (4) (2024) 121. DOI: 10.3390/jcs8040121

[11] **Honglei Zhen, Bin Zhao, Long Quan, Junyu Fu.** Effect of 3D Printing Process Parameters and Heat Treatment Conditions on the Mechanical Properties and Microstructure of PEEK Parts, Polymers, 15 (9) (2023) 2209. DOI: 10.3390/polym15092209

[12] **Lin Jin, Jerry Ball, Tim Bremner, Hung-Jue Sue.** Crystallization behavior and morphological characterization of poly(ether ether ketone), Polymer, 55 (10) (2014) 5255–5265. DOI: 10.1016/j.polymer.2014.08.045

[13] **Peng Wang, Bin Zou, Shouling Ding, Lei Li, Chuanzhen Huang.** Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK, Chinese Journal of Aeronautics, 34 (9) (2021) 236–246. DOI: 10.1016/j.cja.2020.05.040

[14] **Jiahao Yao, Duongthipthewa A., Xuguang Xu, Menglong Liu, Yi Xiong, Limin Zhou.** Interlayer bonding improvement of PEEK and CF-PEEK composites with laser-assisted fused deposition modeling, Composites Communications, 45 (2024) 101819. DOI: 10.1016/j.coco.2024.101819

[15] **Полилов А.Н., Власов Д.Д., Поляков А.Э., Татусь Н.А.** Учет влияния радиуса цилиндрических опор на определяемые при изгибе упруго-прочностные характеристики полимерных композитов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2025. № 3. С. 147–155. DOI: 10.52261/02346206_2025_3_147

[16] **Qiushi Li, Wei Zhao, Yongxiang Li, Weiwei Yang, Gong Wang.** Flexural Properties and Fracture Behavior of CF/PEEK in Orthogonal Building Orientation by FDM: Microstructure and Mechanism, Polymers, 11 (4) (2019) 656. DOI: 10.3390/polym11040656

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОЛОТИЙ Александр Игоревич – *научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*
E-mail: aleksandr.spbpu@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8072-5620

НЕЧАЕВ Даниил Валерьевич – *инженер-исследователь, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.*
E-mail: nechaev_dv@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5997-143X

ЕРМАКОВ Сергей Борисович – *проректор по научной и инновационной деятельности, Тюменский индустриальный университет, канд. техн. наук.*
E-mail: ermakovsb@tyuiu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4243-0984

REFERENCES

[1] **M. Cui, J. Mao,** Effect of low temperature on mechanical properties and fracture behavior of 3D printed short carbon fiber reinforced polyether ether ketone composites (CF/PEEK), Scientific Reports, 15 (2025) 36244. DOI: 10.1038/s41598-025-20220-5

[2] **I.A. Leanovich, D.D. Adzintsou,** Study of properties of ABS plastic in samples obtained by FFF printing technology, Belarusian-Russian University Bulletin, 1 (78) (2023) 13–21. DOI: 10.53078/20778481_2023_1_13

[3] **V.A. Ermakova, E.V. Gasperovich, A.I. Ermakov, V.V. Litvyak,** Study of Strength Characteristics of Products Produced by 3D-Printing from PLA, Science & Technique, 21 (2) (2022) 107–113. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-2-107-113

[4] **E.N. Kablov, S.V. Kondrashov, A.A. Melnikov, S.A. Pavlenko, M.A. Guseva, A.A. Pykhtin, S.A. Larionov,** Investigation of the influence of the thermal regime of FDM printing on the structuring and warping of polyethylene samples, Proceedings of VIAM, 7 (2021) 48–58. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-48-58

[5] **I.S. Govorov, A.A. Potapov, A.Y. Venevtsev,** Study of the physical and mechanical properties of printed products from printing parameters, Proceedings of the TSU, 11 (2023) 446–450. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-446-447

[6] **P. Rendas, L. Figueiredo, M. Geraldo, C. Vidal, B.A. Soares,** Improvement of tensile and flexural properties of 3D printed PEEK through the increase of interfacial adhesion, Journal of Manufacturing Processes, 93 (2023) 260–274. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.03.024

[7] **Xia Gao, Shunxin Qi, Xiao Kuang, Yunlan Su, Jing Li, Dujin Wang,** Fused filament fabrication of polymer materials: A review of interlayer bond, Additive Manufacturing, 37 (2021) 101658. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101658

[8] **Chuncheng Yang, Xiaoyong Tian, Dichen Li, Yi Cao, Feng Zhao, Changquan Shi,** Influence of thermal processing conditions in 3D printing on the crystallinity and mechanical properties of PEEK material, Journal of Materials Processing Technology, 248 (2017) 1–7. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.04.027

[9] **S.S. Ambati, R. Ambatipudi,** Effect of infill density and infill pattern on the mechanical properties of 3D printed PLA parts, Materials Today: Proceedings, 64 (1) (2022) 804–807. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.05.312

[10] **T. Appalsamy, S.L. Hamilton, M.J. Kgaphola,** Tensile Test Analysis of 3D Printed Specimens with Varying Print Orientation and Infill Density, Journal of Composites Science, 8 (4) (2024) 121. DOI: 10.3390/jcs8040121

[11] **Honglei Zhen, Bin Zhao, Long Quan, Junyu Fu,** Effect of 3D Printing Process Parameters and Heat Treatment Conditions on the Mechanical Properties and Microstructure of PEEK Parts, Polymers, 15 (9) (2023) 2209. DOI: 10.3390/polym15092209

[12] **Lin Jin, Jerry Ball, Tim Bremner, Hung-Jue Sue,** Crystallization behavior and morphological characterization of poly(ether ether ketone), Polymer, 55 (10) (2014) 5255–5265. DOI: 10.1016/j.polymer.2014.08.045

[13] **Peng Wang, Bin Zou, Shouling Ding, Lei Li,** Chuanzhen Huang, Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK, Chinese Journal of Aeronautics, 34 (9) (2021) 236–246. DOI: 10.1016/j.cja.2020.05.040

[14] **Jiahao Yao, A. Duongthipthewa, Xuguang Xu, Menglong Liu, Yi Xiong, Limin Zhou,** Interlayer bonding improvement of PEEK and CF-PEEK composites with laser-assisted fused deposition modeling, Composites Communications, 45 (2024) 101819. DOI: 10.1016/j.coco.2024.101819

[15] **A.N. Polilov, D.D. Vlasov, A.E. Polyakov, N.A. Tatus',** Consideration of cylindrical supports radius effect on bending characteristics of polymer composites, Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 3 (2025) 147–155. DOI: 10.52261/02346206_2025_3_147

[16] **Qiushi Li, Wei Zhao, Yongxiang Li, Weiwei Yang, Gong Wang,** Flexural Properties and Fracture Behavior of CF/PEEK in Orthogonal Building Orientation by FDM: Microstructure and Mechanism, Polymers, 11 (4) (2019) 656. DOI: 10.3390/polym11040656

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Aleksandr I. KOLOTIY – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: aleksandr.spbpu@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8072-5620

Daniil V. NECHAEV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: nechaev_dv@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5997-143X

Sergey B. ERMAKOV – *Industrial University of Tyumen.*
E-mail: ermakovsb@tyuiu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4243-0984

Поступила: 09.06.2026; Одобрена: 28.06.2026; Принята: 10.07.2026.
Submitted: 09.06.2026; Approved: 28.06.2026; Accepted: 10.07.2026.

Глобальная энергия. Том 32, № 3, 2026. С. 82–99.
Global Energy, 2026, 32 (3); 82–99.

Научная статья
УДК 621.762
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32307

В.Н. Цеменко, М.Ю. Замоздра ✉ *, С.В. Ганин*

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

✉ zamozdra.m@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ СТРУЖКИ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Аннотация. В работе рассмотрены процессы уплотнения и пластической деформации заготовок из стружки магниевых сплавов при температурных и деформационных режимах, полученных на основе физического и компьютерного моделирования. Экспериментально исследован процесс горячей деформации образцов из магниевых сплавов МА2 и МА5 при осадке на комплексе Gleeble 3800. Определены интервалы температур, скорости и степени деформации, позволяющие получать заданную структуру материала. Технологические параметры инструмента определены на основе компьютерного моделирования процессов горячей экструзии и уплотняющей прокатки при использовании программного обеспечения DEFORM-3D. Практическая реализация процессов получения заготовок из стружки магниевых сплавов показала, что при горячей экструзии происходят доуплотнение прессовок при пластической деформации частиц и рекристаллизация материала без нарушения макросплошности заготовки, при этом по направлению течения материала в объеме всего тела формируются анизотропия свойств и дефекты структуры. Установлено, что причиной хрупкого разрушения образцов при механических испытаниях являются недостаточная прочность межчастичных контактов при статическом сжатии и остаточная пористость при растяжении. Для устранения дефектов структуры проведены отжиг и горячая уплотняющая прокатка заготовок, что позволило снизить пористость с 3% до практически беспористого состояния, ликвидировать межчастичные границы. Полученные заготовки по механическим характеристикам не уступают требованиям ГОСТ для прессованных прутков из магниевых сплавов.

Ключевые слова: частицы стружки, холодное уплотнение, физическое и компьютерное моделирование, горячая экструзия, анизотропия свойств, отжиг, уплотняющая прокатка, механические свойства.

Для цитирования:

Цеменко В.Н., Замоздра М.Ю., Ганин С.В. Моделирование и практическая реализация процессов получения заготовок из стружки магниевых сплавов // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 3. С. 82–99. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32307

© Цеменко В.Н., Замоздра М.Ю., Ганин С.В., 2026. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32307

V.N. Tsemenko, Z.Yu. Zamozdra ✉ *, S.V. Ganin*
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
✉ zamozdra.m@gmail.com

MODELING AND PRACTICAL IMPLEMENTATION OF PROCESSES FOR OBTAINING BLANKS FROM MAGNESIUM ALLOY CHIPS

Abstract. The paper examines the compaction and plastic deformation processes of magnesium alloy chip blanks under specific temperature and deformation conditions. These conditions were obtained through physical and computer modeling. Hot deformation of magnesium alloy samples AZ31B and AZ80 was experimentally investigated at the Gleeble 3800 system during precipitation. Temperature ranges, deformation rates and degrees were determined to obtain the desired material structure. Computer modeling of hot extrusion and rolling processes was used to determine the technological parameters of tools. DEFORM-3D software was used for this purpose. The practical implementation of the process for obtaining magnesium alloy blanks has shown that hot extrusion leads to the compaction of the press during the plastic deformation of particles and the recrystallization of the material without disturbing the macrostructure of the workpiece. Anisotropy of properties and structural defects form in the direction of material flow throughout the volume of the body. It has been determined that the cause of brittle fracture in the samples during mechanical testing is the insufficient strength of interparticle contacts under static compression and residual porosity under tension. To eliminate these structural defects, annealing and hot rolling of the blanks were carried out, reducing porosity from 3% to near-zero and eliminating interparticle boundaries. The resulting blanks have mechanical characteristics that meet the requirements of GOST for magnesium alloy pressed rods.

Keywords: chip particles, cold pressing, physical and computer modeling, hot extrusion, anisotropy of properties, annealing, sealing rolling, mechanical properties.

Citation:

Tsemenko V.N., Zamozdra Z.Yu., Ganin S.V., Modeling and practical implementation of processes for obtaining blanks from magnesium alloy chips, Global Energy, 32 (03) (2026) 82–99, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32307

Введение. Производство деталей и изделий механической обработкой связано с получением большого количества стружковых отходов магния и его сплавов. В процессе переплава собранных отходов, помимо высокого потребления энергии, возможны значительный угар, окисление и потеря со шлаком соотношения основных компонентов сплава [1, 2].

В настоящее время актуально внедрение экономичных технологий переработки стружки в компактную форму, среди которых горячая экструзия магниевых отходов является перспективной областью технологии порошковой металлургии как для массового производства в различных отраслях промышленности, так и для получения изделий специального назначения с заданными свойствами в мелкосерийном производстве [3–5].

Этим способом с минимальным количеством стадий переработки и хорошими экономическими показателями из стружки можно получать профиль – круг, квадрат и более сложные формы – для тех областей техники, где требуются материалы малой плотности и средние по величине показатели прочности [6, 7].

Технология горячей экструзии обладает общеизвестными достоинствами методов классической порошковой металлургии: высоким коэффициентом использования материала и низкими

© Tsemenko V.N., Zamozdra Z.Yu., Ganin S.V., 2026. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

капитальными вложениями. Спрессованные порошковые детали могут обладать достаточно высокой прочностью, при этом горячая экструзия позволяет совместить процессы уплотнения и спекания [8, 9].

Как следует из анализа публикаций, современные работы в основном направлены на усовершенствование методов брикетирования стружки либо получения полуфабрикатов без углубленного изучения формирования структуры в процессах компактирования заготовок. Ни в одной из работ не уделяется внимание переработке стружки в полуфабрикат в мелкосерийном производстве, из которого можно получать готовые изделия без переплава в слиток [10–13].

В данной работе представлен комплексный анализ практического применения методов уплотнения и пластической деформации при получении полуфабрикатов из стружки магниевых сплавов. При этом методами физического и компьютерного моделирования осуществлен предварительный анализ поведения материала при различных температурных, скоростных и деформационных условиях для установления технологических режимов деформирования и параметров инструмента. При практической реализации процессов получения полуфабриката уделено внимание формированию макро- и микроструктуры заготовки на всех этапах передела [14, 15].

Таким образом, целью работы явилось получение заготовок из стружки магниевых сплавов на основе анализа процессов структурообразования и формирования физико-механических свойств при уплотнении и пластической деформации методами физического и компьютерного моделирования технологического процесса.

Материалы и методы

Для исследований использована фрезерная стружка магниевых сплавов МА2 и МА5, химический состав этих сплавов определен и приведен в табл. 1. Стружка представляет собой частицы пластинчатой формы. Фактор неравноосности (отношение максимальной длины частицы к ее ширине) в среднем составляет 2,6, размеры частиц находятся в интервале от 0,5 до 1,0 мм. Размер зерен индивидуальной частицы имеет диапазоны от 10 до 18 и от 45 до 80 мкм (рис. 1). Таким образом, в исходном состоянии стружка практически является порошковым материалом, для ее переработки могут быть использованы методы порошковой металлургии и методики определения технологических свойств порошков.

Таблица 1

Химический состав стружки МА2 и МА5 (мас.%) в сравнении с составом по ГОСТ 14957-76

Table 1

Chemical composition of AZ31B and AZ80 chips (wt.%) in comparison with the composition according to GOST 14957-76

	Элемент			
Сплав	Mg	**Al**	Mn	Zn
МА2	93,75	**3,67**	0,19	0,72
ГОСТ 14957	основа	**3,0–4,0**	0,15–0,5	0,2–0,8
МА5	90,64	**8,42**	0,33	0,62
ГОСТ 14957	основа	**7,8–9,2**	0,15–0,5	0,2–0,8

Уплотняемость частиц стружки магниевых сплавов МА2 и МА5 показана на рис. 2. Из графика следует, что увеличение давления прессования почти в два раза – с 250 до 450 МПа – дает

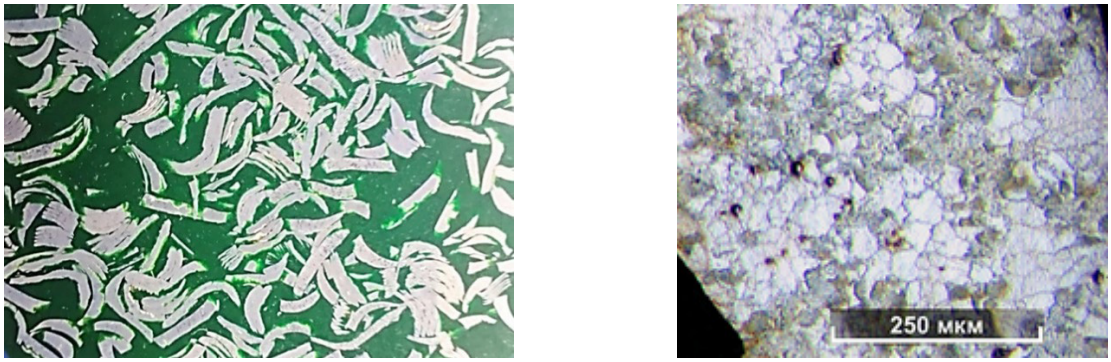


Рис. 1. Форма частиц стружки (слева) и микроструктура индивидуальной частицы (справа)
Fig. 1. The shape of the chip particles (left) and the microstructure of the individual particle (right)

лишь незначительный прирост относительной плотности с 0,75 до 0,9. На этом этапе уплотнение возможно только за счет холодной пластической деформации материала частиц, что и вызывает существенный рост давления при сравнительно небольшом уплотнении. Относительная плотность 0,75 вполне достаточна для удовлетворительной формуемости заготовок и сохранения их целостности после выпрессовки. При давлении 250 МПа в замкнутой матрице были получены образцы для проведения дальнейших технологических операций, в этих условиях объем спрессованной стружки уменьшается в 2,5 раза, а процесс уплотнения осуществляется на стадии структурного деформирования, при котором сопротивление деформации сжимаемого тела существенно ниже стадии пластической деформации материала частиц [16].

Сформованные образцы были подвергнуты горячим методам обработки:

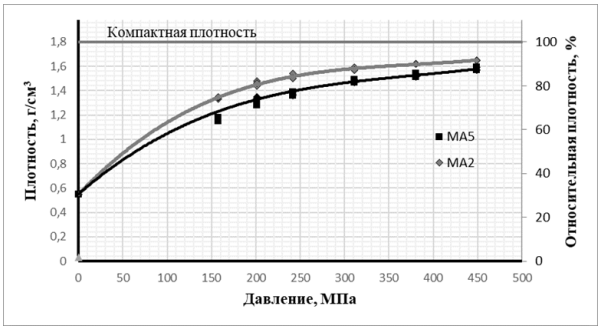
- горячей экструзии;
- диффузионному отжигу;
- горячей уплотняющей прокатке в калибрах.

Процесс горячей экструзии должен предусматривать максимальное доуплотнение в контейнере оснастки предварительно спрессованных заготовок и бездефектную пластическую деформацию материала при прохождении через фильеру. Основными параметрами процесса экструзии являются угол конусности фильеры (α) и редукция (R), определяющая коэффициент вытяжки заготовки после деформации. Редукция в процессах экструзии цилиндрических заготовок равняется отношению квадрата диаметра входного отверстия фильеры к квадрату диаметра выходного отверстия.

Для определения параметров деформирования материала проведена оценка влияния температуры, скорости и степени деформации на процесс нагружения заготовки. При этом исследовано поведение частицы стружки как отдельного объемного элемента, способного пластически деформироваться и изменять свою микроструктуру при заданных режимах деформирования. Эта информация была получена при проведении физического моделирования процесса горячей деформации образцов материала на комплексе Gleeble 3800 [17].

Экспериментальное исследование осуществлено при горячей осадке между плоскими бойками образцов, вырезанных из литой заготовки сплава. В процессе испытаний температура изменялась от 200 до 400 °С, относительная деформация ($\varepsilon_{отн}$) образцов – от 25 до 75%, скорость деформации (W) – от 0,1 до 1,0 $с^{-1}$. На рис. 3 показан внешний вид образцов после горячей деформации сплава МА2.

Для определения параметров инструмента проведено компьютерное моделирование процесса горячей экструзии порошкового тела. Для этой цели использовалось программное обеспечение DEFORM-3D, в котором модель материала реализована встроенной реологической моделью «пористая среда», ее условие текучести задавалось по Мизесу [18].



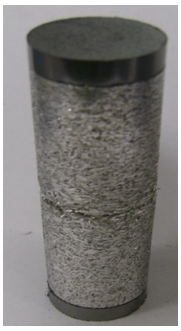


Рис. 2. Зависимость плотности образцов от давления прессования
и внешний вид уплотненного брикета при давлении 250 МПа

Fig. 2. Dependence of sample density on pressing pressure and appearance of compacted briquette at 250 MPa



Рис. 3. Внешний вид образцов после осадки с различными обжатиями

Fig. 3. Appearance of samples after precipitation under different compression conditions

В рабочей среде программы были воссозданы заготовки, идентичные магниевым сплавам МА2 и МА5, реологические и технологические свойства которых были определены в процессе физического моделирования.

В табл. 2 приведены параметры процесса и инструмента, сочетание которых подлежало моделированию.

Таблица 2

Рабочие параметры процесса горячей экструзии заготовок

Table 2

Operating parameters of the hot extrusion process for workpieces

Диаметр отверстия фильер ***d***, (мм)	**6**	**8**	**10**	**12**	**6**	**8**	**10**	**12**	**6**	**8**	**10**	**12**	**6**	**8**	**10**	**12**
Редукция ***R***	**25**	**16**	**9**	**6**	**25**	**16**	**9**	**6**	**25**	**16**	**9**	**6**	**25**	**16**	**9**	**6**
Угол консусности **α**	**30°**				**45°**				**60°**				**75°**			

В программе КОМПАС-3D были оцифрованы геометрические параметры экструдера и создана многокомпонентная сборка, имитирующая взаимодействие всех компонентов: матрица +

а) б)

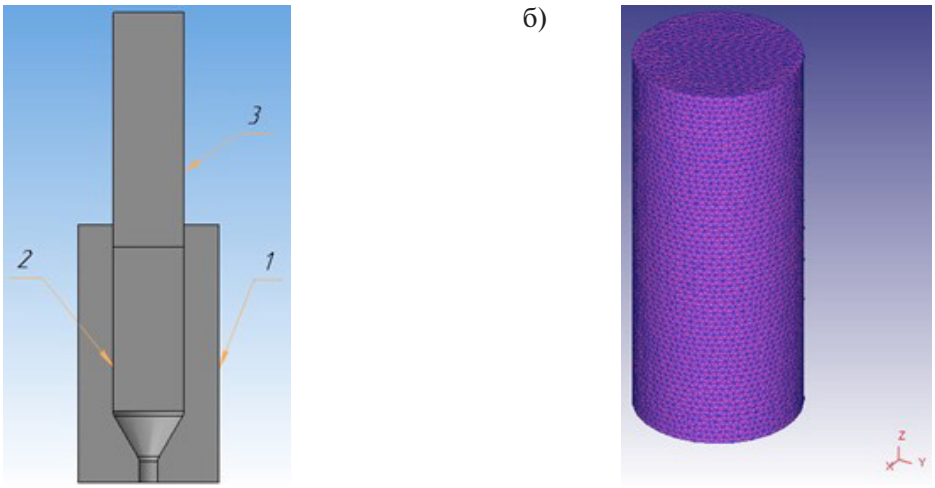


Рис. 4. Схема сборки в программе KOMPAS а): матрица (1) + заготовка (2) + пуансон (3);
б) заготовка с сеткой конечных элементов

Fig. 4. Assembly diagram in the KOMPAS program a): matrix (1), blank (2), punch (3),
b) blank with a grid of finite elements

+ пуансон + заготовка + фильера (рис. 4). При этом основным объектом исследования являлись диаметр выходного отверстия фильер, определяющий редукцию R, и угол конусности α, значительно влияющий на максимальные усилия прессования и разноплотность заготовки.

Для активизации диффузионных процессов по границам частиц, статической рекристаллизации и снятию остаточных напряжений, полученных в процессе пластической деформации материала заготовок, был предусмотрен диффузионный отжиг по режимам: нагрев до температуры 300 °С с выдержкой в течение 8 часов.

Горячая уплотняющая прокатка в калибрах – заключительная операция, позволяющая окончательно сформировать структуру материала и придать заданную форму заготовке. Оценка предельных обжатий в валках прокатного стана за один проход смоделирована с помощью программы DEFORM-3D при использовании критерия Кокрофта–Латама, который позволил определить допустимый диапазон относительных деформаций заготовок для соответствующих температурных и скоростных условий нагружения. Установлено, что предельная относительная деформация не должна превышать 27% для заготовок, полученных экструзией с редукцией <16, и не более 18% для прутков с редукцией ≥16.

Результаты

Магниевые сплавы обладают довольно узким температурным, скоростным и деформационным интервалом обработки, при отступлении от которого может происходить резкое снижение пластических свойств сплава, что на практике приводит к разрушению заготовки в процессе деформации [19–21].

На рис. 5 приведены графики нагружения образцов из сплава МА2 во всем исследуемом интервале температур. Как следует из приведенных зависимостей, при повышении температуры от 200 до 300 °С сопротивление деформации уменьшается вдвое, понижаясь с увеличением степени деформации, что связано с условиями формирования структуры для этих параметров деформирования. Целесообразно за нижнюю температурную границу принять 300 °С, при такой температуре зафиксировано начало процессов динамической рекристаллизации с формированием мелкозернистой структуры.

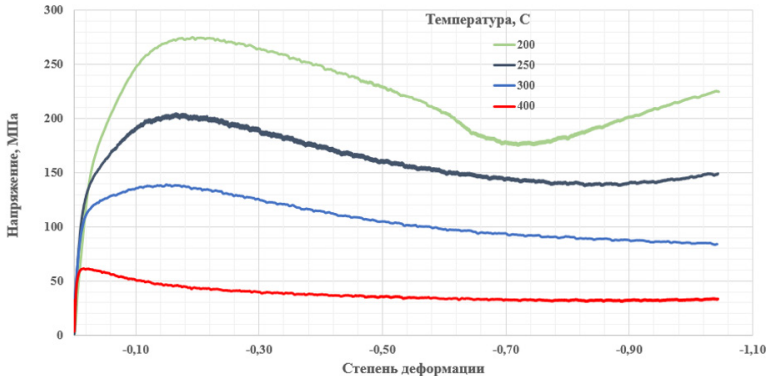


Рис. 5. Графики деформирования сплава МА2 при различных температурах
Fig. 5. Graphs of deformation of the AZ31B alloy at various temperatures

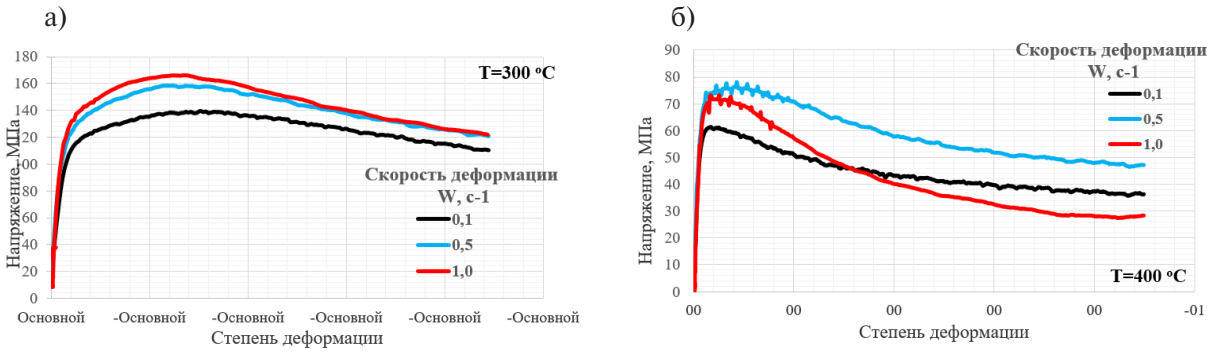


Рис. 6. Графики деформирования магниевого сплава МА2
при различных скоростях деформации, полученные при температуре: а) 300 °С; б) 400 °С
Fig. 6. Graphs of magnesium alloy AZ31B deformation
at various deformation rates, obtained at: a) 300 °C and b) 400 °C

При температуре 400 °С сопротивление деформации образца существенно ниже для всего диапазона изменения степени деформации сплава, что позволяет снизить давление инструмента при осуществлении процесса пластической деформации, однако процесс рекристаллизации происходит с преобладанием роста крупных зерен.

На рис. 6 приведены графики деформирования образцов в исследуемом интервале скоростей при температурах 300 и 400 °С.

Как следует из приведенных зависимостей, при минимальной скорости деформации (0,1 $с^{-1}$) требуется меньшее давление для осуществления процесса деформирования. Однако при максимальной скорости деформации и температуре 400 °С образцы в процессе проведения эксперимента разрушались из-за появления микро- и макродефектов. Это послужило фактором ограничения скорости деформирования до 0,5 $с^{-1}$.

Оценка влияния степени деформации магниевого сплава на процессы динамической рекристаллизации и формирование микроструктуры проведена при скорости деформации 0,1 $с^{-1}$ и температуре 400 °С. Исследован процесс осадки образцов при их относительной деформации 25, 50 и 75%.

На рис. 7 представлены графики нагружения образцов с различными относительными деформациями. При осадке образца более 25% начинаются рекристаллизационные процессы.

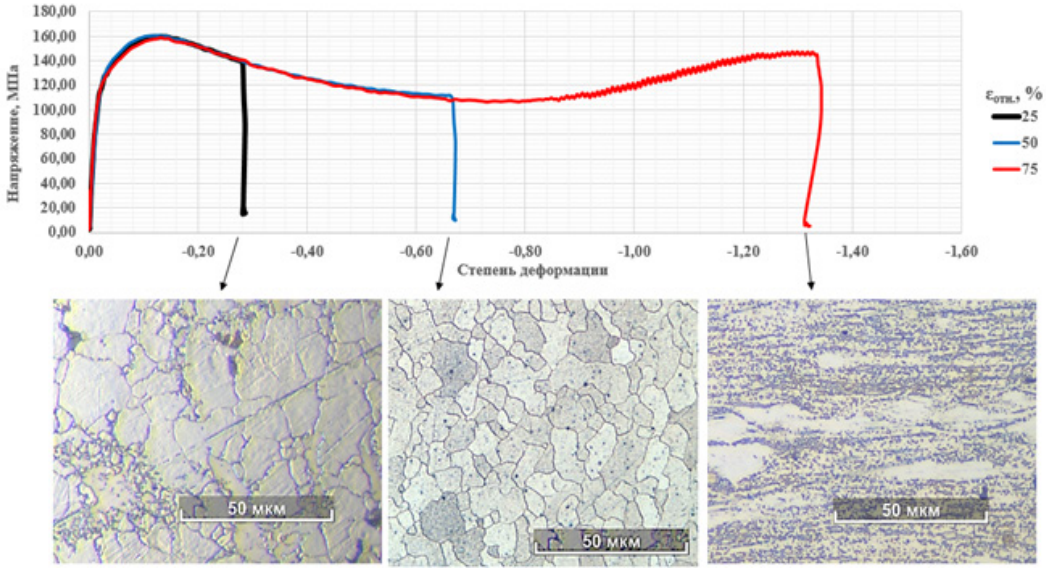


Рис. 7. Графики нагружения образцов при относительной деформации $\varepsilon_{отн}$, равной 25, 50 и 75%, и соответствующие им микроструктуры материала. Скорость деформации 0,1 $с^{-1}$, температура 400 °С

Fig. 7. Graphs of sample loading at relative deformation of 25, 50, and 75%, and the corresponding microstructures of the material. The deformation rate was 0.1 s^{-1} and the temperature was 400 °C

При относительной деформации образца 50% микроструктура материала равноразмерная, равноосная, при этом сопротивление деформации минимальное. При увеличении относительной деформации до 75% происходит измельчение зерна, сопротивление деформации возрастает. На основе полученных результатов установлен рабочий диапазон относительных деформаций образцов: от 33%, при которых обеспечивается протекание рекристаллизационых процессов в магниевом сплаве, и не более 66%, превышение которых может приводить к появлению дефектов в материале и разрушению образцов.

Таким образом, в результате физического моделирования выбран температурный интервал от 300 до 400 °С, при котором сопротивление деформации магниевого сплава в 2–4 раза ниже по сравнению с начальной температурой испытаний 200 °С; скорость деформации 0,1 $с^{-1}$ и степень деформации магниевого сплава от 0,33 до 1,2, при которых осуществляются процессы динамической рекристаллизации материала без существенного увеличения сопротивления деформации и разрушения образцов.

Технологические параметры инструмента должны соответствовать режимам деформирования, которые были определены на основе физического моделирования.

Основные параметры инструмента определены на основе компьютерного моделирования процесса горячей экструзии пористого тела, осуществленного с использованием программного обеспечения DEFORM-3D.

На рис. 8 и 9 приведены некоторые результаты, полученные на модели процесса экструзии.

Анализ математической модели показал, что изменение плотности соответствует теории [18] и подразделяется на три характерные стадии (рис. 8):

1) подпрессовку;
2) доуплотнение;
3) пластическое течение уплотненного материала.

Максимального значения сдвиговые деформации достигают в областях перехода от контейнера к конусу фильеры. В отличие от уплотнения в закрытой цилиндрической матрице в процессе экструзии усилие прессования во многом зависит от геометрии инструмента.

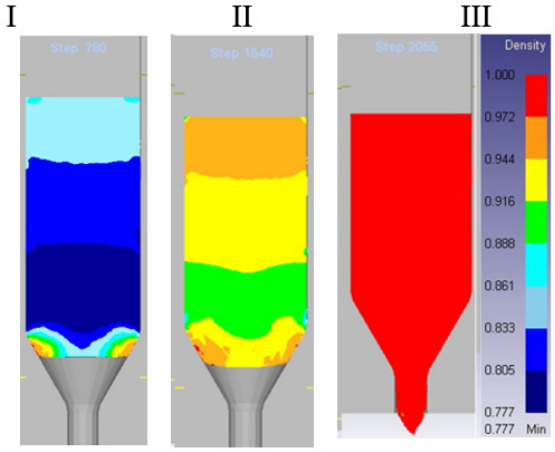


Рис. 8. Этапы деформации в процессе горячей экструзии
Fig. 8. Stages of deformation during hot extrusion

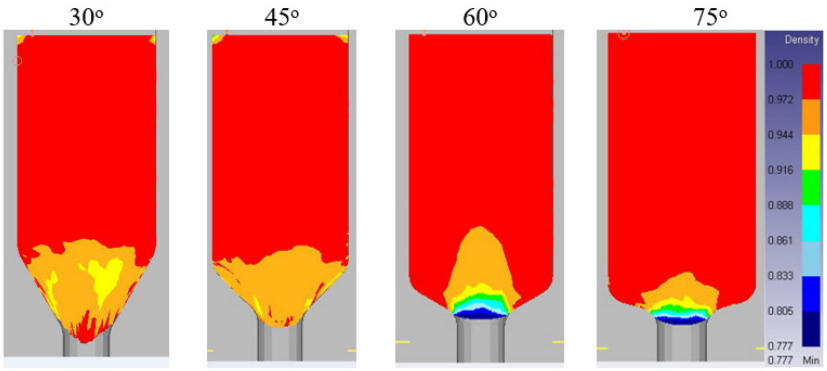


Рис. 9. Распределение плотности в начале третьей стадии прессования при различных углах конусности фильер
Fig. 9. Density distribution at the start of the third pressing stage for different taper angles of the nozzles

На рис. 9 представлено распределение плотности в начале третьей стадии прессования заготовки при различных углах конусности фильеры для d = 10 мм, откуда следует, что область разноплотности минимальная при $\alpha = 75°$.

На рис. 10 представлен обобщенный график зависимости глубины области разноплотности h от угла конусности фильеры α, полученный на основе анализа компьютерных моделей процесса уплотнения и деформации заготовки. Из этих данных следует, что с увеличением редукции R (уменьшением выходного диаметра фильеры) глубина разноплотности уменьшается. При этом различие между показателями $R = 6$ и $R = 9$ значительно, а между $R = 16$ и $R = 25$ невелико. Таким образом, минимальные значения глубины разноплотности образцов лежат в интервале редукции от 9 до 25, и с увеличением угла конусности фильеры α глубина разноплотности уменьшается.

На основе математического моделирования для практической реализации процесса горячей экструзии параметры рабочего инструмента, которые обеспечивают максимальное доуплотнение при снижении до минимума дефектных участков, должны быть в интервалах: угол конусности фильеры 60–75°; редукция 16–25.

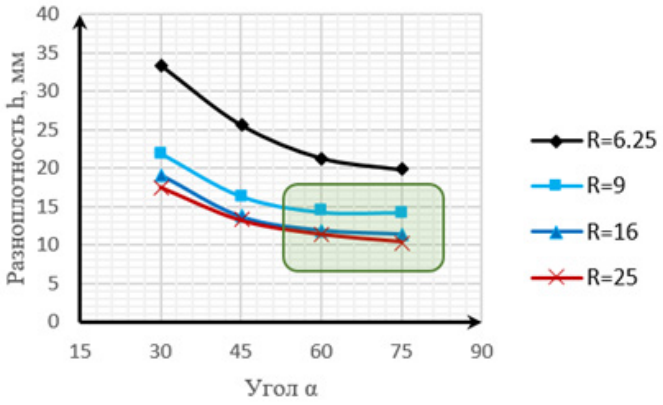


Рис. 10. Обобщенный график зависимости глубины разноплотности *h* от угла конусности α
Fig. 10. A generalized graph of the relationship between the depth of the density *h* and the angle of taper α

Обсуждение

Экспериментально процесс горячей экструзии осуществлен при температурах 300, 350 и 400 °С. Использованы фильеры диаметром выходного отверстия 6, 8 и 10 мм, что соответствует 78, 67 и 58% относительной деформации заготовки. Угол конусности у всех фильер 75°. Процесс осуществлялся при скорости деформации 0,1 $с^{-1}$. Общий вид сконструированной оснастки представлен на рис. 11. Таким образом, комбинировались три режима температур и три режима деформаций, в результате получены девять вариантов заготовок (рис. 12).

Для исследования механических свойств проводились испытания образцов при одноосном сжатии и растяжении. Установлено, что предел прочности при сжатии на 40% выше предела прочности при растяжении для всех комбинаций образцов из температурного и деформационного интервала, при этом разрушение образцов в обоих случаях происходило хрупко. На основе полученных результатов механических испытаний при сжимающих и растягивающих нагрузках были построены зависимости пределов прочности образцов от температуры процесса и редукции, которая определяет коэффициент вытяжки.

Анализ обобщенных зависимостей показал, что при температуре 400 °С и коэффициенте вытяжки 24 образцы имеют наиболее высокие механические свойства. Минимальный показатель из сочетания двух типов механических испытаний лежит в области 350 °С и коэффициента вытяжки 16.

На основе анализа макро- и микроструктуры установлено наличие межчастичных границ стружки в продольном сечении (рис. 13). Эти границы имеют ровную поверхность, расположенную вдоль оси экструзии. Несплошностей между частицами не наблюдается, что говорит о хорошей консолидации частиц, а также не наблюдается разрывов самих частиц в продольном направлении, что свидетельствует о правомерности определения усилий прессования на основе физического моделирования. На рис. 13 видно, что межчастичные границы препятствуют равноосному росту зерен при прохождении рекристаллизационных процессов.

На рис. 14 приведено перпендикулярное сечение с макро- и микроструктурой образца, которое свидетельствует о наличии остаточной пористости в заготовках после проведения процесса горячей экструзии, их относительная плотность не превышала 97%.

Межчастичные границы и остаточная пористость являются основными факторами, приводящими к анизотропии свойств и хрупкому разрушению образцов в процессе испытаний. Эти дефекты структуры формируются по направлению течения и деформации частиц материала при экструзии и являются причиной недостаточно высокой прочности образцов.

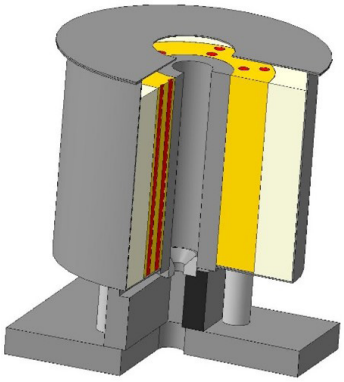


Рис. 11. Общий вид оснастки для экструзии в разрезе
Fig. 11. General view of the extrusion tooling in cross-section

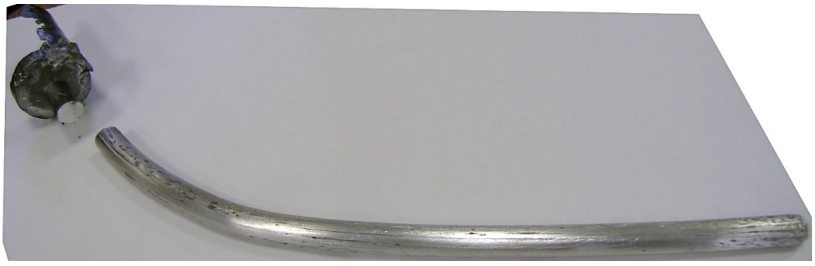


Рис. 12. Образец заготовки из магниевой стружки МА5, полученный методом горячей экструзии
Fig. 12. Sample of blank made from magnesium chips AZ80 obtained by hot extrusion

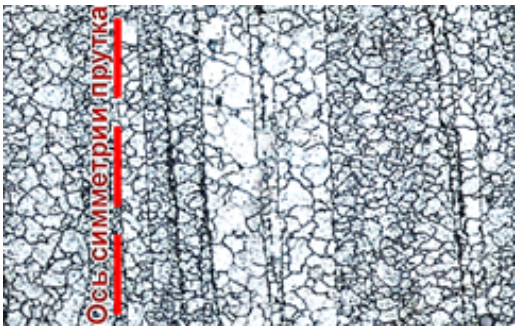


Рис. 13. Микроструктура продольного сечения прутка из сплава МА5.
Вертикальные черные линии – межчастичные границы
Fig. 13. Microstructure of the longitudinal section of a bar made from AZ80 alloy.
The vertical black lines represent the interparticle boundaries

Для устранения дефектов, снижающих механические свойства заготовок, проведен диффузионный отжиг по режимам: нагрев до температуры 300 °С с выдержкой в течение 8 часов и горячая уплотняющая прокатка в калибрах при температуре 350–380°С. При этом предельная относительная деформация за проход не превышала 27% для прутков диаметром свыше 8 мм и 18% для прутков диаметром менее 8 мм соответственно, что было определено на основе предварительного моделирования процесса прокатки в программе DEFORM-3D.

а) б)



Рис. 14. Перпендикулярное сечение прутка: а) макроструктура (остаточная пористость); б) микроструктура
Fig. 14. Perpendicular cross-section of the rod: a) macrostructure (residual porosity) and b) microstructure

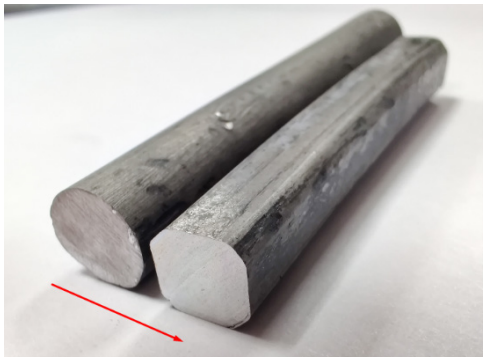


Рис. 15. Внешний вид и форма полученных после прокатки образцов
Fig. 15. Appearance and shape of the samples after rolling

Установлено, что отжиг и горячая уплотняющая прокатка заготовок в калибрах позволили устранить межчастичные границы, максимально снизить остаточную пористость и придать заготовке заданную форму. Внешний вид прокатанных образцов представлен на рис. 15.

На рис. 16 показано устранение межчастичных границ и остаточной пористости в экструдированных образцах после отжига и прокатки в калибрах.

При анализе экспериментальных результатов всего технологического процесса передела стружки магниевых сплавов в компактные заготовки выявлены основные факторы, влияющие на получение заготовок высоких физико-механических свойств.

Установлено, что остаточная пористость экструдированных образцов ниже при более высокой температуре экструзии. Так, пористость прутков, полученных при 300, 350 и 400 °С в среднем равна 2,1, 2,0 и 1,4% соответственно. При этом их относительная деформация при обжатии в фильере в меньшей степени влияет на процесс уплотнения, так как основное уплотнение происходит в контейнере инструмента, где сопротивление деформации материала частиц определяется температурой. Последующие операции обработки прутков при отжиге и уплотняющей прокатки в калибрах позволяют устранить остаточную пористость. При этом рекристаллизационный отжиг ликвидирует межчастичные границы, однако снижает пористость в среднем только на 5%, тогда как прокатка в калибрах уменьшает ее на 34% относительно начальной, полученной в процессе горячей экструзии.

На рис. 17 показаны структуры и представлена гистограмма изменения размера зерна в процессе технологического передела: экструзия (Э) – отжиг (О) – прокатка в калибрах (К).

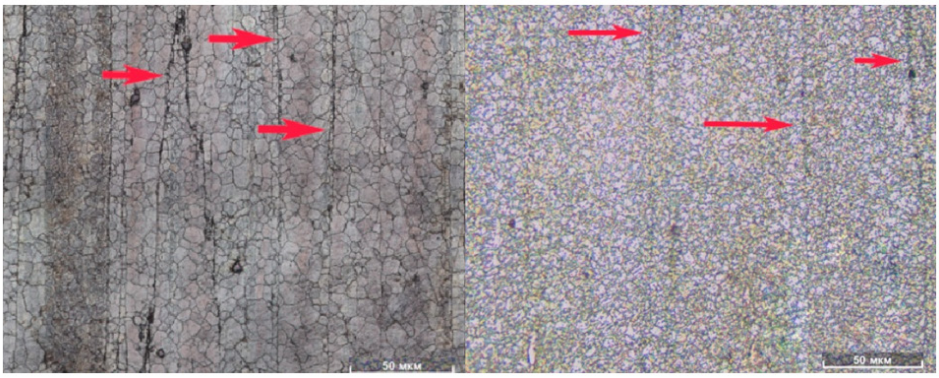


Рис. 16. Устранение межчастичных границ и остаточной пористости
на примерах микроструктур после экструзии (слева), отжига и прокатки в калибрах (справа)
Fig. 16. Elimination of interparticle boundaries and residual porosity using
examples of microstructures after extrusion (left), annealing and rolling in calibers (right)

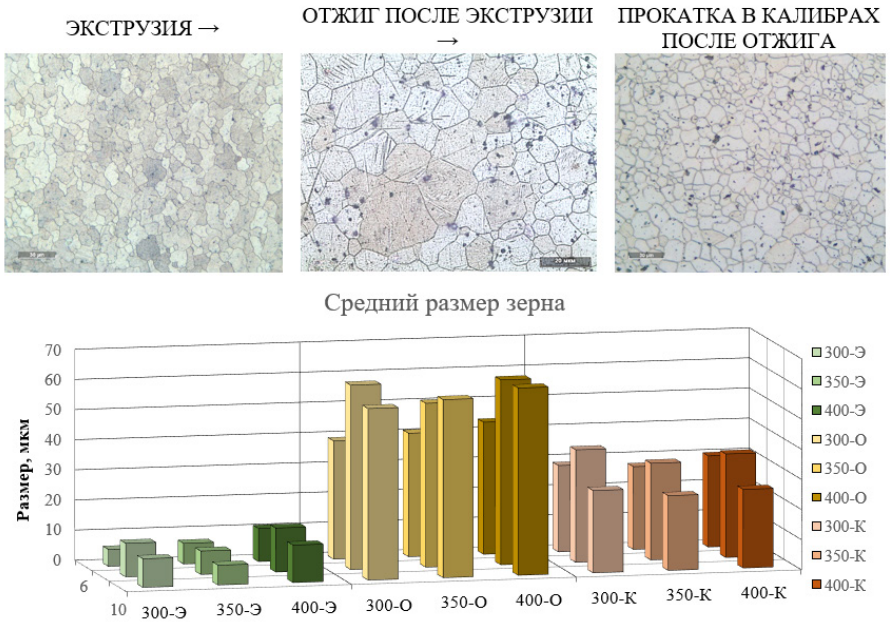


Рис. 17. Гистограмма среднего размера зерна для всех этапов процессов обработки магниевого сплава МА5
Fig. 17. Histogram of the average grain size for all stages of processing of magnesium alloy AZ80

Размер зерна был определен при помощи программы JMicroVision для образцов, полученных при заданных температурах и относительных деформациях.

Анализ обработки результатов исследований показывает, что после горячей экструзии в процессе динамической рекристаллизации размер зерна заготовок практически находится на уровне среднего размера мелких зерен исходных частиц стружки. Рекристализационные процессы по всему сечению заготовки сдерживают межчастичные границы. Диффузионный отжиг устраняет межчастичные границы, и в процессе статической рекристаллизации наблюдается существенный рост зерен. Горячая уплотняющая прокатка в калибрах при заданной относительной деформации прутков позволяет в процессе динамической рекристаллизации измельчить зерно равномерно по всему сечению заготовки.

Определение механических свойств прутков из сплава МА5 при растяжении после термообработки и прокатки в калибрах показало, что заготовки, полученные из стружки, не уступают регламентированным показателям временного сопротивления прутков соответствующего ГОСТ 18351-73, которые находятся в среднем интервале от 285 до 310 МПа в зависимости от температурных и деформационных режимов получения заготовок.

Таким образом, выполненные исследования позволили разработать и рекомендовать для процессов рациональной переработки стружки магниевых сплавов технологическую схему получения заготовок и температурно-деформационные параметры, определенные на основе физического и компьютерного моделирования, при которых могут быть получены сравнительно высокие физико-механические свойства вторичных материалов.

Выводы

1. Разработаны практические рекомендации для получения заготовок из стружки магниевых сплавов на основе анализа процесса структурообразования при уплотнении и пластической деформации методами физического и математического моделирования технологического процесса. Разработана технологическая схема переработки стружки магниевых сплавов и рекомендации по получению заготовок высоких физико-механических свойств.

2. На основе физического моделирования горячей деформации образцов магниевых сплавов на комплексе Gleeble 3800 исследованы температурные, скоростные и деформационные условия протекания процессов пластической деформации и рекристаллизации сплава. Предложены диапазоны рабочих температур и степеней деформации, комбинация которых обеспечивает получение заданной структуры в процессе практической реализации горячей экструзии заготовок из стружки магниевых сплавов.

3. Рассмотрение процесса горячей экструзии предварительно уплотненной заготовки как пористого тела с помощью программы DEFORM-3D и анализ напряженно-деформированных состояний заготовки позволили установить основные геометрические и технологические параметры рабочего инструмента: угол конусности фильеры и значения редукции.

4. Экспериментально изучен процесс горячей экструзии магниевых сплавов по режимам, позволяющим формировать структуру в процессе уплотнения, рекристаллизации и пластической деформации материала частиц. Дан анализ формирования структуры заготовок в диапазоне температур от 300 до 400 °С, относительной деформации от 33 до 66%. Эти режимы позволяют получить качественные заготовки за счет реализации процесса рекристаллизации и уплотнения до 97% от компактной плотности.

5. Исследование структуры и механических свойств образцов после отжига и горячей уплотняющей прокатки заготовок в калибрах показало, что по сравнению с заготовками, полученными сразу после экструзии, уменьшение пористости составило с 3% до практически беспористого состояния, разнозернистость структуры и межчастичные границы свелись к минимуму. Это способствует повышению механических свойств вторичного магниевого сплава до уровня свойств литого и пластически деформированного сплава.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Shu-Yan Wu, Ze-Sheng Ji, Shou-Fan Rong, Mao-Liang Hu.** Microstructure and mechanical properties of AZ31B magnesium alloy prepared by solid-state recycling process from chips, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 20 (5) (2010) 783–788. DOI: 10.1016/S1003-6326(09)60214-4

[2] **Волкова Е.Ф.** Современные деформируемые сплавы и композиционные материалы на основе магния (обзор) // Металловедение и термическая обработка металлов. 2006. Т. 617, № 11. С. 5–9.

[3] **Сынков Ю.С., Сынков А.С.** Процесс переработки магниевой стружки с использованием метода винтовой экструзии // Обработка материалов давлением. 2013. Т. 35, № 2. С. 173–176.

[4] **Mabuchi M., Kubota K., Higashi K.** New Recycling Process by Extrusion for Machined Chips of AZ91 Magnesium and Mechanical Properties of Extruded Bars, Materials Transactions, 36 (10) (1995) 1249–1254. DOI: 10.2320/matertrans1989.36.1249

[5] **Tianyu Mao, Yu Tao, Yao Cheng, Xuan Luo, Xinde Huang, Yunchang Xin.** Mg–Al–Mn magnesium alloy processability and its extrusion simulation of complex profiles for automotive battery trays, Journal of Materials Research and Technology, 39 (2025) 513–527. DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.09.122

[6] **Joung Sik Suh, Byeong-Chan Suh, Jae Ok Choi, Young Min Kim, Bong Sun You.** Effect of Extrusion Temperature on Mechanical Properties of AZ91 Alloy in Terms of Microstructure and Texture Development, Metals and Materials International, 27 (2021) 2696–2705. DOI: 10.1007/s12540-020-00642-8

[7] **Haibo Wang, Feng Li, Fengyuan Bao, Jiayang Zhang, Shun Luo.** Recrystallization mechanism and anisotropy regulation of AZ31 magnesium alloy curved components by staggered extrusion, Journal of Materials Science & Technology, 249 (2026) 142–152. DOI: 10.1016/j.jmst.2025.07.001

[8] **Komkova D.A., Antonova O.V., Antonov B.D., Volkov A.Yu.** Structure and mechanical properties of pure magnesium after hydrostatic extrusion at room temperature, AIP Conference Series, 2533 (2022) 020014. DOI: 10.1063/5.0098870

[9] **Милюкова А.М., Матяс А.Н., Лях А.А., Толкачева О.А., Линьюнь Ц.** Исследование влияния экструзии и магнитно-импульсного воздействия на магниевый сплав AZ80 // Механическое оборудование металлургических заводов. 2024. Т. 22, № 1. С. 57–64.

[10] **Shuaiju Meng, Hui Yu, Jun Zhou, Haisheng Han, Yongyan Li, Lishan Dong, Xiaolong Nan, Zhongjie Li, Kwang Seon Shin, Weimin Zhao.** Enhancing the Mechanical Properties of AZ80 Alloy by Combining Extrusion and Three Pass Calibre Rolling, Metals, 10 (2) (2020) 249. DOI: 10.3390/met10020249

[11] **Shun Luo, Feng Li, Yuan Qi Li, Hai Bo Wang, Jia Yang Zhang.** Modification of texture in AZ31 magnesium alloy via cold pre-upsetting alternating forward extrusion, Journal of Magnesium and Alloys, 13 (12) (2025) 6183–6194. DOI: 10.1016/j.jma.2025.08.033

[12] **Yoshizumi H., Yuasa M., Miyamoto H., Somekawa H.** Influence of different wrought processes on the microstructure and texture evolution in AZ31 magnesium alloy, Materials Characterization, 217 (2024) 114446. DOI: 10.1016/j.matchar.2024.114446

[13] **Jianglin Liu, Linchao Zhao, Li Zhipeng, Li Xijie, Renhui Zheng, Xiaohui Shi, Jianguo Liang.** Deformation and microstructure radial gradient evolution of AZ31 magnesium alloy bar during three-roll skew rolling, Journal of Alloys and Compounds, 1006 (2024) 176331. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.176331

[14] **Tsemenko V., Ganin S., Zamozdra M., Grigoryev A., Hootack M.** Rheological characteristics of the powder body, Materials Today: Proceedings, 30 (3) (2019) 635–639. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.448

[15] **Цеменко В.Н., Ганин С.В., Замоздра М.Ю.** Механические свойства заготовок, полученных горячей экструзией магниевой стружки // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 4. С. 169–184. DOI: 10.18721/JEST.24417

[16] **Tsemenko V., Ganin S., Zamozdra M., Hootack M.** Structure and properties of magnesium chip blanks, Materials Today: Proceedings, 30 (3) (2020) 645–649. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.450

[17] **Zamozdra M., Ganin S., Tsemenko V.** Physical modeling of hot plastic deformation process of powder high-speed steel on the gleeble 3800 complex, Proceedings 29th International Conference on Metallurgy and Materials, (2020) 464–468. DOI: 10.37904/metal.2020.3504

[18] **Цеменко В.Н., Ганин С.В., Замоздра М.Ю.** Определение реологических характеристик и моделирование процесса экструзии порошковых материалов // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. Т. 18, № 1. С. 35–39.

[19] **Guo Li, Bin Li, Xingyu Bai, Hao Chen, Yuanding Huang, Yan Yang, Guobing Wei, Weidong Xie, Xiaodong Peng, Junwei Liu.** Research advances in multi-scale numerical simulations of forming and microstructures for magnesium alloys, Journal of Magnesium and Alloys, 12 (10) (2024) 3898–3946. DOI: 10.1016/j.jma.2024.06.031

[20] **Zhipeng Li, Liqiang Zhang, Pengcheng Guo, Zhiwen Liu, Yuanzhi Wu, Tuo Ye, Xiao Liu, Biwu Zhu.** Quasi-static tensile and axial crushing behavior of an AZ31 magnesium alloy extrusion in different treated states, Journal of Materials Research and Technology, 41 (2026) 953–968. DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.12.096

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЦЕМЕНКО Валерий Николаевич – *заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.*
E-mail: plast-ftim@mail.ru

ЗАМОЗДРА Максим Юрьевич – *ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.*
E-mail: zamozdra.m@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6238-7018

ГАНИН Сергей Владимирович – *директор Высшей школы физики и технологий материалов, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.*
E-mail: ganin_sv@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2307-9319

REFERENCES

[1] **Shu-Yan Wu, Ze-Sheng Ji, Shou-Fan Rong, Mao-Liang Hu,** Microstructure and mechanical properties of AZ31B magnesium alloy prepared by solid-state recycling process from chips, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 20 (5) (2010) 783–788. DOI: 10.1016/S1003-6326(09)60214-4

[2] **E.F. Volkova,** Modern Mg-based wrought alloys and composites (review), Metal Science and Heat Treatment, 11 (617) (2006) 5–9.

[3] **Iu.S. Synkov, A.S. Synkov,** Protsess pererabotki magnievoi struzhki s ispol'zovaniem metoda vintovoi ekstruzii [Process of recycling magnesium chips using screw extrusion method], Obrabotka materialov davleniem [Material processing by pressure], 2 (35) (2013) 173–176.

[4] **M. Mabuchi, K. Kubota, K. Higashi,** New Recycling Process by Extrusion for Machined Chips of AZ91 Magnesium and Mechanical Properties of Extruded Bars, Materials Transactions, 36 (10) (1995) 1249–1254. DOI: 10.2320/matertrans1989.36.1249

[5] **Tianyu Mao, Yu Tao, Yao Cheng, Xuan Luo, Xinde Huang, Yunchang Xin,** Mg–Al–Mn magnesium alloy processability and its extrusion simulation of complex profiles for automotive battery trays, Journal of Materials Research and Technology, 39 (2025) 513–527. DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.09.122

[6] **Joung Sik Suh, Byeong-Chan Suh, Jae Ok Choi, Young Min Kim, Bong Sun You,** Effect of Extrusion Temperature on Mechanical Properties of AZ91 Alloy in Terms of Microstructure and Texture Development, Metals and Materials International, 27 (2021) 2696–2705. DOI: 10.1007/s12540-020-00642-8

[7] **Haibo Wang, Feng Li, Fengyuan Bao, Jiayang Zhang, Shun Luo,** Recrystallization mechanism and anisotropy regulation of AZ31 magnesium alloy curved components by staggered extrusion, Journal of Materials Science & Technology, 249 (2026) 142–152. DOI: 10.1016/j.jmst.2025.07.001

[8] **D.A. Komkova, O.V. Antonova, B.D. Antonov, A.Yu. Volkov,** Structure and mechanical properties of pure magnesium after hydrostatic extrusion at room temperature, AIP Conference Series, 2533 (2022) 020014. DOI: 10.1063/5.0098870

[9] **A.M. Milyukova, A.N. Matyas, A.A. Lyakh, O.A. Tolkacheva, Q. Linyun,** Study of the influence of extrusion and magnetic-pulse influence on magnesium alloy AZ80, Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov [Mechanical equipment of metallurgical plants], 1 (22) (2024) 57–64.

[10] **Shuaiju Meng, Hui Yu, Jun Zhou, Haisheng Han, Yongyan Li, Lishan Dong, Xiaolong Nan, Zhongjie Li, Kwang Seon Shin, Weimin Zhao,** Enhancing the Mechanical Properties of AZ80 Alloy by Combining Extrusion and Three Pass Calibre Rolling, Metals, 10 (2) (2020) 249. DOI: 10.3390/met10020249

[11] **Shun Luo, Feng Li, Yuan Qi Li, Hai Bo Wang, Jia Yang Zhang,** Modification of texture in AZ31 magnesium alloy via cold pre-upsetting alternating forward extrusion, Journal of Magnesium and Alloys, 13 (12) (2025) 6183–6194. DOI: 10.1016/j.jma.2025.08.033

[12] **H. Yoshizumi, M. Yuasa, H. Miyamoto, H. Somekawa,** Influence of different wrought processes on the microstructure and texture evolution in AZ31 magnesium alloy, Materials Characterization, 217 (2024) 114446. DOI: 10.1016/j.matchar.2024.114446

[13] **Jianglin Liu, Linchao Zhao, Li Zhipeng, Li Xijie, Renhui Zheng, Xiaohui Shi, Jianguo Liang,** Deformation and microstructure radial gradient evolution of AZ31 magnesium alloy bar during three-roll skew rolling, Journal of Alloys and Compounds, 1006 (2024) 176331. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.176331

[14] **V. Tsemenko, S. Ganin, M. Zamozdra, A. Grigoryev, M. Hootack,** Rheological characteristics of the powder body, Materials Today: Proceedings, 30 (3) (2019) 635–639. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.448

[15] **V.N. Tsemenko, S.V. Ganin, M.Yu. Zamozdra,** Mechanical properties of billets produced by hot extrusion of magnesium chips, St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology, 24 (04) (2018) 169–184. DOI: 10.18721/JEST.24417

[16] **V. Tsemenko, S. Ganin, M. Zamozdra, M. Hootack,** Structure and properties of magnesium chip blanks, Materials Today: Proceedings, 30 (3) (2020) 645–649. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.450

[17] **M. Zamozdra, S. Ganin, V. Tsemenko,** Physical modeling of hot plastic deformation process of powder high-speed steel on the gleeble 3800 complex, Proceedings 29th International Conference on Metallurgy and Materials, (2020) 464–468. DOI: 10.37904/metal.2020.3504

[18] **V.N. Tsemenko, S.V. Ganin, M.Yu. Zamozdra,** Determination of rheological characteristics and modeling of powder materials extrusion process, Blanking Productions in Mechanical Engineering, 1 (18) (2020) 35–39.

[19] **Guo Li, Bin Li, Xingyu Bai, Hao Chen, Yuanding Huang, Yan Yang, Guobing Wei, Weidong Xie, Xiaodong Peng, Junwei Liu,** Research advances in multi-scale numerical simulations of forming and microstructures for magnesium alloys, Journal of Magnesium and Alloys, 12 (10) (2024) 3898–3946. DOI: 10.1016/j.jma.2024.06.031

[20] **Zhipeng Li, Liqiang Zhang, Pengcheng Guo, Zhiwen Liu, Yuanzhi Wu, Tuo Ye, Xiao Liu, Biwu Zhu,** Quasi-static tensile and axial crushing behavior of an AZ31 magnesium alloy extrusion in different treated states, Journal of Materials Research and Technology, 41 (2026) 953–968. DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.12.096

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Valery N. TSEMENKO – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: plast-ftim@mail.ru

Maksim Yu. ZAMOZDRA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: zamozdra.m@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6238-7018

Sergei V. GANIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: ganin_sv@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2307-9319

Поступила: 27.02.2026; Одобрена: 26.04.2026; Принята: 16.07.2026.
Submitted: 27.02.2026; Approved: 26.04.2026; Accepted: 16.07.2026.

Глобальная энергия. Том 32, № 3, 2026. С. 100–111.
Global Energy, 2026, 32 (3); 100–111.

Научная статья
УДК 621.763
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32308

А.Э. Абдрахманова ✉ , *А.В. Сотов*,
А.И. Зайцев, *М.В. Иванчура*, *А.А. Попович*

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

✉ abdrahmanova.an@yandex.ru

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ С НЕПРЕРЫВНЫМ УГЛЕРОДНЫМ И БАЗАЛЬТОВЫМ АРМИРОВАНИЕМ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ FDM-CFC

Аннотация. Непрерывное армирование является одним из наиболее эффективных способов повышения механических характеристик полимерных композитов, изготовленных методом 3D-печати на основе FDM-технологии с коэкструзией непрерывных волокон (FDM-CFC). При этом применение непрерывных базальтовых волокон в качестве армирующего компонента изучено значительно меньше по сравнению с углеродными, несмотря на их более низкую стоимость и высокий эксплуатационный потенциал. Целью работы является сравнительная оценка механических характеристик композитов, армированных непрерывными углеродными и базальтовыми волокнами, изготовленных методом FDM-CFC при одинаковом объемном содержании волокна. На первом этапе исследования определены коэффициенты подачи связующего полимера, отвечающего за адгезию на границе «волокно-матрица». Проведены испытания на растяжение с непрерывным армированием при сплошном заполнении слоя. Установлено, что композиты, армированные углеродными волокнами, обладают более высокими механическими характеристиками (предел прочности 176 МПа, модуль упругости 24 ГПа) по сравнению с базальтовыми (152 МПа и 11 ГПа соответственно). Вместе с тем базальтовые волокна также обеспечивают существенное повышение механических свойств термопластичных полимеров и представляют практический интерес как более экономичная альтернатива углеродным волокнам. Полученные результаты могут быть использованы при выборе армирующего материала для технологии изготовления непрерывно армированных полимерных композитов методом FDM-CFC.

Ключевые слова: аддитивное производство, непрерывное армирование, углеродное волокно, базальтовое волокно, Continuous Fiber Reinforced Composite (CFRP), адгезия, механические свойства.

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

Для цитирования:

Абдрахманова А.Э., Сотов А.В., Зайцев А.И. и др. Сравнительная оценка механических характеристик полимерных композитов с непрерывным углеродным и базальтовым армированием, изготовленных методом FDM-CFC // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 3. С. 100–111. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32308

© Абдрахманова А.Э., Сотов А.В., Зайцев А.И. и др., 2026. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research article
DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32308

A.E. Abdrakhmanova ✉ , *A.V. Sotov,*
A.I. Zaytsev, M.V. Ivanchura, A.A. Popovich

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

✉ abdrahmanova.an@yandex.ru

COMPARATIVE EVALUATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF CONTINUOUS FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITE WITH CARBON AND BASALT REINFORCEMENT MADE BY FDM-CFC

Abstract. Continuous reinforcement is one of the most effective ways to improve the mechanical characteristics of polymer composites made by FDM-based 3D printing with co-extrusion of continuous fibers (FDM-CFC). At the same time, the use of continuous basalt fibers as a reinforcing component has been studied significantly less than carbon fibers, despite their lower cost and high operational potential. The aim of this work is to compare the mechanical characteristics of composites reinforced with continuous carbon and basalt fibers produced by FDM-CFC printing with the same fiber volume content. At the first stage of the study, the feed rates of the adhesive polymer responsible for adhesion at the fiber-matrix interface were determined. Tensile tests with continuous reinforcement were carried out with continuous filling of the layer. It has been established that carbon fiber reinforced composites have higher mechanical characteristics (tensile strength 176 MPa, modulus of elasticity 24 GPa) compared with basalt (152 MPa and 11 GPa, respectively). At the same time, basalt fibers also provide a significant increase in the mechanical properties of thermoplastic polymers and are of practical interest as a more economical alternative to carbon fibers. The results obtained can be used in the selection of a reinforcing material for the technology of manufacturing continuously fiber reinforced polymer composites by the FDM-CFC.

Keywords: additive manufacturing, continuous reinforcement, carbon fiber, basalt fiber, Continuous Fiber Reinforced Composite (CFRP), adhesion, mechanical properties.

Acknowledgements: The research was financially supported by the Russian Science Foundation, project "Development of new functional materials, intelligent structures, and technologies for their creation via additive manufacturing, based on advanced approaches to modeling and predicting properties" (Agreement No. 23-79-30004; available online: https://rscf.ru/project/23-79-30004/).

Citation:

Abdrakhmanova A.E., Sotov A.V., Zaytsev A.I. et al., Comparative evaluation of the mechanical properties of continuous fiber reinforced polymer composite with carbon and basalt reinforcement made by FDM-CFC, Global Energy, 32 (03) (2026) 100–111, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.32308

Введение. Одной из новых тенденций в развитии аддитивного производства (АП) является 3D-печать деталей из непрерывно армированных полимерных композитов (Continuous Fiber Reinforced Polymer, CFRP). Среди широкого многообразия армирующих наполнителей термопластичной матрицы наиболее высокоэффективны с точки зрения механических характеристик непрерывные волокна [1–3]. Объединением технологий 3D-печати и непрерывных армирующих волокон достигаются высокая степень свободы для криволинейной укладки и оптимизация распределения нагрузок с целью повышения жесткости наиболее нагруженных зон изделия.

© Abdrakhmanova A.E., Sotov A.V., Zaytsev A.I. et al., 2026. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Основным способом изготовления неоднородной структуры является 3D-печать на основе FDM-технологии с коэкструзией непрерывных волокон (Fused Deposition Modeling with Continuous Fiber Co-extrusion, FDM-CFC). Данный способ позволяет создавать изделия с программируемыми градиентами свойств, а именно локальное укрепление зоны с повышенными нагрузками, изменение жесткости, эластичности и демпфирующих характеристик за счет добавления непрерывных волокон [4].

Несмотря на интенсивное развитие технологий АП CFRP, большинство исследований посвящено применению непрерывных углеродных волокон (Composite Carbon Fiber, CCF). CCF имеет широкое распространение за соотношение жесткости к весу, в виду чего наиболее часто используется в целях снижения веса конструкций без потери жесткости [6 –8].

Вместе с тем использование непрерывных базальтовых волокон (Composite Basalt Fiber, CBF) в технологии FDM-CFC остается недостаточно изученным. Армирование CBF представляют собой эффективный и широко распространенный способ в гражданском строительстве, относительно новый по сравнению с более устоявшимися волокнами углерода, стекла и арамидов. Данный тип волокон изготавливается из вулканической породы, их производство похоже на производство стеклянных волокон, но требует меньше сырья и энергии, что приводит к уменьшению стоимости [9]. CBF характеризуются высокой прочностью на растяжение, коррозионной стойкостью и устойчивостью к высоким температурам, что делает их выгодной заменой другим типам волокон в аэрокосмической и иных отраслях [10–13].

В существующих работах сравнительная оценка механических свойств композитов, армированных CCF и CBF, как правило, проводится при различных условиях изготовления, что затрудняет объективную оценку эффективности каждого типа армирования и ограничивает возможности выбора материала для практического применения [14].

Новизна настоящего исследования заключается в комплексной сравнительной оценке армирования CCF и CBF в условиях единого технологического процесса FDM-CFC с предварительной отработкой режимов печати для каждого типа волокна. Такой подход позволяет минимизировать влияние технологических факторов на результаты испытаний и провести объективное сопоставление механических характеристик композитов при рациональных параметрах их изготовления. Полученные результаты позволяют не только оценить потенциал CCF, традиционно рассматриваемых как наиболее эффективный армирующий материал, но и определить перспективность применения CBF как экономически более доступной альтернативы, обеспечивающей существенное повышение механических характеристик изделий, изготовленных методом 3D-печати.

Целью исследования являются сравнительная оценка механических характеристик полимерных композитов, армированных CCF и CBF, изготовленных методом FDM-CFC при рационально выбранных режимах печати, а также определение эффективности применения каждого типа армирующего материала с учетом его эксплуатационного потенциала.

Материалы и методы исследования

Материалы

В качестве армирующих волокон в данном исследовании были выбраны два композитных тоупрега – CCF (содержание углеродных волокон ~ 60% об.) диаметром поперечного сечения 0,35±0,02 мм и линейной плотностью 149 текс и CBF (содержание базальтовых волокон ~ 55% об.) диаметром поперечного сечения 0,28±0,01 мм и линейной плотностью 130 текс (Anisoprint, Китай). Структура исходных тоупрегов исследована методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе SUPRA 55VP (Carl Zeiss, Германия). На рис. 1а представлена микроструктура жгута CBF: моноволокна имеют цилиндрическую форму с гладкой поверхностью диаметром 10–12 мкм. Межволоконное пространство заполнено термореактивным связующим,

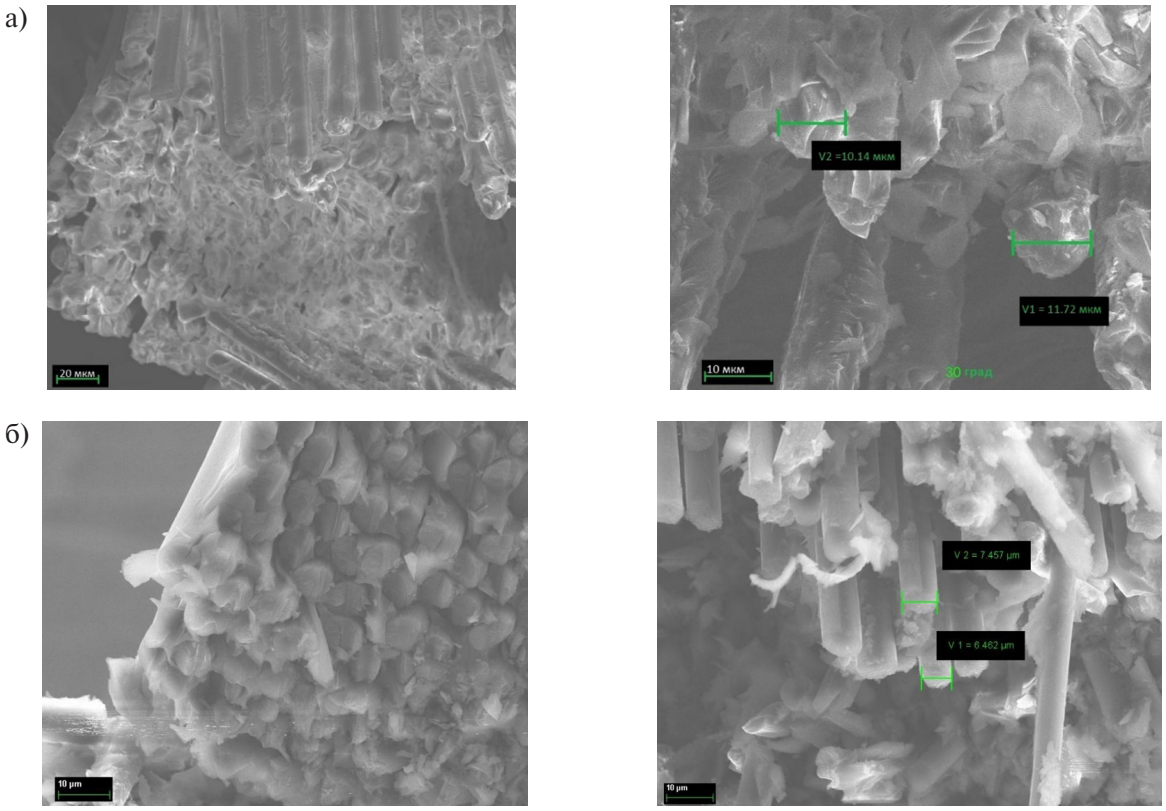


Рис. 1. СЭМ-изображение исходных тоупрегов: а – CBF; б – CCF
Fig. 1. SEM image of the original towpregs: a – CBF; b – CCF

обеспечивающим связность жгута и адгезию к матрице в процессе печати. На рис. 1б изображена аналогичная микроструктура поперечного сечения жгута CCF с диаметром моноволокон 6–8 мкм.

В качестве матричного полимера использовался эластичный термополиуретан ТПУ А95 с твердостью 92 по Шор А (BASF, Германия). Угленаполненный дискретными волокнами полиамид 12 (ПА12) (BestFilament, Россия) использовался в печати как связующий полимер, отвечающий за адгезию волокна к матрице. Все образцы были подготовлены в программном обеспечении (ПО) Aura с помощью функции «Маски» и изготовлены на 3D-принтере Composer A4 с двухсопельной экструзионной головой (рис. 2). Скорость печати соплом для укладки волокон составляла 10 мм/с.

Методы

Коэффициент подачи связующего полимера является одним из основных параметров печати, влияющих на межслойную адгезию волокна к матрице. В связи с этим была проведена экспериментальная оценка влияния данного параметра на межслойную прочность соединения с целью определения его рационального значения для композитных образцов с углеродными (C-CFRP) и базальтовыми (B-CFRP) волокнами. Для этого была подготовлена серия образцов для испытаний на вытягивание с коэффициентом подачи 0,9, 1,0 и 1,1 с единичным тоупрегом, погруженным в полимерную матрицу на глубину 10 мм. На каждом исследуемом параметре было изготовлено по три образца, внешний вид которых представлен на рис. 3.

Суть метода заключалась в вытягивании единичного тоупрега и фиксации значения предельного усилия. Затем были вычислены значения межфазной прочности путем нахождения

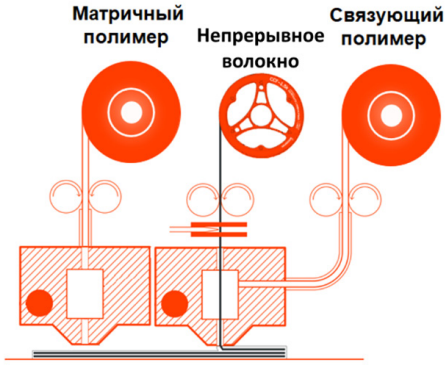


Рис. 2. Схематичное изображение двухсопельной экструзионной печатающей головы принтера Composer A4
Fig. 2. Schematic representation of a two-nozzles extrusion printhead of a Composer A4 printer

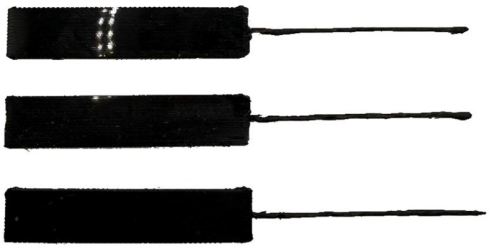


Рис. 3. Внешний вид образцов на вытягивание единичного тоупрега для определения межслойной адгезии
Fig. 3. Appearance of the specimens for single towpull-out tests used to determine interlaminar adhesion

отношения максимальной нагрузки к площади контакта волокна [14]. Значения межфазной прочности на границе раздела между матрицей и волокном при испытании на вытягивание были вычислены с использованием уравнения Келли–Тайсона [15]:

$$\tau_d = \frac{F_d}{\pi D_f L}, \quad (1)$$

где τ_d – межфазная прочность на сдвиг, МПа; F_d – сила отделения волокна от матрицы, Н; D_f – диаметр поперечного сечения тоупрега, мм; L – длина тоупрега, погруженного в матрицу, мм.

Вытягивание единичного тоупрега, погруженного в полимерную матрицу, производилось на испытательной машине Zwick/Roell Z050. Скорость перемещения траверсы составляла 5 мм/мин.

На основании полученных результатов был установлен рациональный коэффициент подачи связующего для изготовления последующих серий испытательных образцов. Для сравнения прочностных характеристик образцов C-CFRP и B-CFRP, изготовленных 3D-печатью, проводились типовые испытания на разрыв в соответствии с ГОСТ 56800-2015. Среди доступных вариантов укладки волокна, предлагаемое в ПО Aura, было выбрано однонаправленное сплошное заполнение “Solid” с максимальным заполнением слоя непрерывным волокном (рис. 4).

В связи с различием объемного содержания моноволокон в углеродном и базальтовом тоупрегах для проведения корректного сравнительного анализа механических характеристик

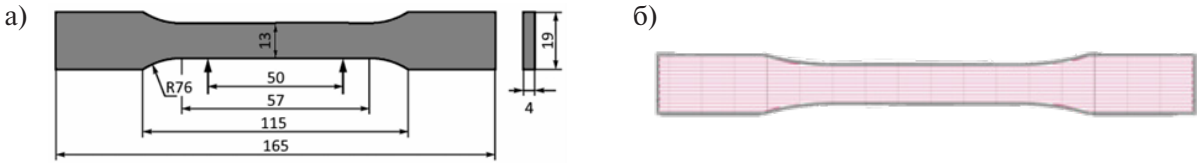


Рис. 4. Внешний вид образца на растяжение: а – геометрические размеры;
б – схема «Solid» сплошной укладки непрерывного волокна

Fig. 4. Tensile appearance of the sample: a – geometric dimensions; b – “Solid” scheme of continuous fiber laying

было обеспечено одинаковое объемное содержание армирующего наполнителя в исследуемых образцах. Расчет выполнялся с использованием данных ПО Aura, с учетом длины траектории укладки непрерывного волокна, а также геометрических параметров тоупрега и объемной доли волокон в его составе. Для образцов C-CFRP была определена объемная доля армирующего наполнителя, после чего параметры печати B-CFRP были скорректированы (табл. 1). В частности, уменьшение высоты композитного слоя с 0,36 до 0,32 мм позволило компенсировать различия в геометрии тоупрегов и обеспечить сопоставимое объемное содержание непрерывных волокон в образцах обоих типов.

Таблица 1

Расчет объемного содержания волокон

Table 1

Calculation of the fiber volume content

	C-CFRP (8 слоев)	**B-CFRP (11 слоев)**
Длина укладываемого тоупрега, мм	18400	25200
Диаметр поперечного сечения тоугпрега, мм	0,36	0,28
Содержание волокон в тоупреге, % об.	60	55
Содержание волокон в образце, % об.	16,38	16,61

Механические испытания на одноосное растяжение проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 56800–2015 с применением универсальной испытательной двухколонной машины Zwick/Roell Z100 для двух серий образцов. Первая серия состояла из трех образцов C-CFRP, матричного полимера ТПУ А95 и связующего полимера ПА12. Вторая серия также состояла из трех образцов B-CFRP с аналогичной матрицей и связкой. Суть испытания заключалась в растяжении образца с постоянной скоростью 5 мм/с до момента разрыва армирующего волокна при комнатной температуре. При испытаниях определены модуль упругости и прочность при растяжении.

Результаты и обсуждение

В процессе FDM-CFC связующий полимер смачивает поверхность CCF. Единичный тоупрег CCF имеет гладкую поверхность и представляет собой композит, пропитанный реактопластом на основе эпоксидной смолы. Одной из возможностей увеличения межфазной прочности при изготовлении CFRP методом FDM-CFC является определение значения коэффициента подачи связующего полимера. При увеличении коэффициента повышается объемная доля подаваемого связующего в зону контакта армирующего и матричного компонентов. По результатам исследований было установлено, что коэффициент подачи связующего полимера оказывает следующее влияние на межфазную адгезию в C-CFRP, а именно при увеличении коэффициента

подачи наблюдается уменьшение среднего значения межфазной прочности (табл. 2). При увеличении коэффициента с 0,9 до 1,0 межфазная прочность понизилась на 7,9%, а при увеличении с 0,9 до 1,1 понизилась на 3,2%. Однако в B-CFRP наибольшая межфазная прочность достигается при коэффициенте подачи 1,1, что можно объяснить большим количеством связующего при меньшем диаметре тоупрега. В целом прослеживается тенденция более высокой средней межфазной прочности у C-CFRP, чем у B-CFRP. Исходя из полученных данных исследования для C-CFRP принят коэффициент подачи связующего 0,9, а для B-CFRP – 1,1.

Таблица 2

Результаты исследования адгезии тоупрега к матрице в зависимости от коэффициента подачи связующего полимера

Table 2

Results of the study of towpreg-to-matrix adhesion as a function of the binding polymer feed rate

	C-CFRP			B-CFRP		
	0,9	**1,0**	**1,1**	**0,9**	**1,0**	**1,1**
Среднее значение предельной нагрузки, Н	76,4	70,8	74,0	53,6	52,0	59,1
Среднее значение межфазной прочности, МПа	6,8	6,3	6,6	6,1	5,9	6,7

После определения коэффициента подачи связующего полимера были изготовлены образцы методом FDM-CFC для испытаний на растяжение (рис. 5). Образцы были изготовлены из матричного полимера ТПУ А95 и связующего полимера ПА12 с дискретными волокнами. Для образцов C-CFRP количество слоев CCF составило 8 при высоте композитного слоя 0,36 мм. Для образцов B-CFRP количество слоев CBF составило 11 при высоте композитного слоя 0,32 мм в одном образце со сплошным заполнением CBF.

В результате испытаний на разрыв получены диаграммы растяжения «стандартное усилие – деформация» для образцов C-CFRP и B-CFRP. Стоит отметить, что разрушение происходит вне рабочей области в обоих типах композиций и демонстрирует расслоение в месте зажима. В данном случае такой характер вероятнее всего вызван неравномерностью распределения напряжений, которое, в свою очередь, вызвано неоднородной внутренней структурой образца и дефектами 3D-печати. Также в области, предшествующей разрушению на отдельных диаграммах, наблюдаются локальные отклонения от линейного хода кривых и незначительные колебания напряжений. Данный эффект может быть обусловлен постепенным развитием внутренних повреждений, включая локальное расслоение композиционной структуры, нарушение межфазного взаимодействия между волокном и матрицей, а также последовательное разрушение отдельных пучков непрерывных волокон. При этом отсутствие существенного снижения жесткости до момента разрушения свидетельствует о сохранении работоспособности основной части армирующего каркаса на протяжении практически всего процесса нагружения.

В отличие от образцов C-CFRP, образцы B-CFRP характеризуются значительно большей деформационной способностью. Разрушение происходит при относительной деформации порядка 1,5–2,0%, что более чем в два раза превышает соответствующие значения для углеродного армирования. Более высокая деформация до разрушения свидетельствует о большей способности воспринимать деформационные нагрузки без мгновенной потери несущей способности. Напротив, образцы C-CFRP обладают значительно более высокой жесткостью и прочностью, однако характеризуются меньшим удлинением до разрушения. Таким образом, выбор типа непрерывного армирующего наполнителя определяется требованиями к эксплуатационным свойствам изделия: CCF обеспечивают максимальные прочность и жесткость, тогда как CBF

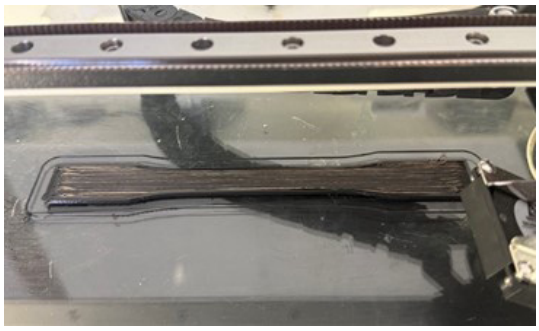


Рис. 5. Процесс изготовления непрерывно армированных образцов по технологии FDM-CFC
Fig. 5. Manufacturing of continuously reinforced samples using FDM-CFC

– значительный прирост механических свойств термопластичной матрицы с более высокой деформационной способностью при меньшей стоимости, что делает их перспективными для широкого круга инженерных применений.

Полученные механические характеристики, такие как предел прочности и модуль упругости, сведены в табл. 3.

Таблица 3

Полученные механические характеристики непрерывно армированных композитов в результате испытаний на растяжение

Table 3

Mechanical characteristics of continuously reinforced composites obtained from tensile tests

	C-CFRP	B-CFRP
Предел прочности, МПа	176	152
Модуль упругости, ГПа	24	11

Из данных, представленных выше, можно сделать вывод о том, что при равном объемном содержании волокна в непрерывно армированных композитах растягивающие характеристики CCF превышают характеристики CBF на 16% по пределу прочности и более чем в два раза по модулю упругости.

Заключение

По результатам проведенного исследования установлено, что коэффициент подачи связующего полимера является одним из технологических параметров процесса FDM-CFC, оказывающим влияние на межфазную адгезию между непрерывным армирующим наполнителем и термопластичной матрицей. Для композита, армированного CCF, оптимальным является коэффициент подачи 0,9, тогда как для композита с CBF наибольшая межфазная прочность достигается при коэффициенте 1,1. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости индивидуального подбора технологических параметров в зависимости от типа армирующего материала.

Испытания на растяжение показали, что применение непрерывного армирования обеспечивает значительное повышение механических характеристик термопластов, изготовленных методом 3D-печати на основе FDM-технологии, по сравнению с неармированными матричными материалами. При этом композиты, армированные CCF, продемонстрировали более высокие значения предела прочности и модуля упругости по сравнению с армированными CBF, что обусловлено

более высокими собственными механическими характеристиками CCF. Вместе с тем результаты исследования подтверждают, что CBF также являются перспективным армирующим материалом, обеспечивающим существенный прирост механических свойств полимерных композитов при меньшей стоимости материала. Это делает базальтовое армирование привлекательной альтернативой углеродному в случаях, когда наряду с повышением эксплуатационных характеристик важное значение имеют экономическая эффективность и снижение себестоимости изделий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Cheng P., Peng Y., Li S., Rao Y., Le Duigou A., Wang K., Ahzi S.** 3D printed continuous fiber reinforced composite lightweight structures: A review and outlook, Composites Part B: Engineering, 250 (2023) 110450. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.110450

[2] **Hou Z., Tian X., Zheng Z., Zhang J., Zhe L., Li D., Malakhov A.V., Polilov A.N.** A constitutive model for 3D printed continuous fiber reinforced composite structures with variable fiber content, Composites Part B: Engineering, 189 (2020) 107893. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107893

[3] **Ma T., Zhang Y., Ruan K., Guo H., He M., Shi X., Gu J., Kong J., Gu J.** Advances in 3D printing for polymer composites: A review, InfoMat, 6 (6) (2024) e12568. DOI: 10.1002/inf2.12568

[4] **Malik M., Saxena P.** 3D-Printed Continuous Basalt Fiber-Reinforced Polylactic Acid Composites: Effect of Printing Parameters on Impact and Interlaminar Shear Strength, Journal of Materials Engineering and Performance, 34 (18) (2025) 20879–20891. DOI: 10.1007/s11665-025-10767-9

[5] **Sotov A., Abdrakhmanova A., Zaytsev A., Popovich A.** Additive manufacturing of functional gradient thermoplastic composite using fused deposition modelling and coextrusion continuous fibres, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 137 (7) (2025) 3587–3601. DOI: 10.1007/s00170-025-15376-3

[6] **Fedulov B., Fedorenko A., Khaziev A., Antonov F.** Optimization of parts manufactured using continuous fiber three-dimensional printing technology, Composites Part B: Engineering, 227 (2021) 109406. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109406

[7] **Azarov A.V., Antonov F.K., Golubev M.V., Khaziev A.R., Ushanov S.A.** Composite 3D printing for the small size unmanned aerial vehicle structure, Composites Part B: Engineering, 169 (2019) 157–163. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.03.073

[8] **Adumitroaie A., Antonov F., Khaziev A., Azarov A., Golubev M., Vasiliev V.V.** Novel Continuous Fiber Bi-Matrix Composite 3-D Printing Technology, Materials, 12 (18) (2019) 3011. DOI: 10.3390/ma12183011

[9] **Abdel-Jaber M.T., Al-Nsour R., Almahameed A., Ashteyat A.** Comparative analysis of shear behavior in continuous low-strength RC beams strengthened with BFRP and CFRP: An experimental and numerical investigation, Composites Part C: Open Access, 16 (2025) 100575. DOI: 10.1016/j.jcomc.2025.100575

[10] **Zotti A., Zuppolini S., Tábi T., Grasso M., Ren G., Borriello A., Zarrelli M.** Effects of 1D and 2D nanofillers in basalt/poly(lactic acid) composites for additive manufacturing, Composites Part B: Engineering, 153 (2018) 364–375. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.08.128

[11] **Rout S., Nayak R.K., Patnaik S.C., Nezhad H.Y.** Development of Improved Flexural and Impact Performance of Kevlar/Carbon/Glass Fibers Reinforced Polymer Hybrid Composites, Journal of Composites Science, 6 (9) (2022) 245. DOI: 10.3390/jcs6090245

[12] **Dhand V., Mittal G., Rhee K.Y., Park S.-J., Hui D.** A short review on basalt fiber reinforced polymer composites, Composites Part B: Engineering, 73 (2015) 166–180. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.12.011

[13] **Zhou J., Wang X., Liu X., Tao J., Wu Z.** Investigation on the shear behavior of RC beams strengthened with BFRP grids and PCM, Engineering Structures, 322 (2025) 119173. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.119173

[14] **Qu P., Kong H., Li X., Lei Y., Guo A., Wang S., Wang H., Hu Y., Wan Y., Takahashi J.** Additive manufacturing of hybrid continuous carbon/basalt fiber reinforced composites based on bi-matrix co-extrusion, Journal of Materials Research and Technology, 30 (2024) 8683–8704. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.05.241

[15] **Гуляев А.И.** Измерение адгезионной прочности «волокно-матрица» с применением наноиндентирования (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). С. 68–78. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-68-78

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АБДРАХМАНОВА Анна Эдуардовна – *инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*
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, без степени.*
E-mail: zaytsev.alexander2011@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3138-8365

ИВАНЧУРА Мария Владимировна – *инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*
E-mail: ivanchura_mv@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5288-727X

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич – *директор ИММиТ, 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] **P. Cheng, Y. Peng, S. Li, Y. Rao, A. Le Duigou, K. Wang, S. Ahzi,** 3D printed continuous fiber reinforced composite lightweight structures: A review and outlook, Composites Part B: Engineering, 250 (2023) 110450. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.110450

[2] **Z. Hou, X. Tian, Z. Zheng, J. Zhang, L. Zhe, D. Li, A.V. Malakhov, A.N. Polilov,** A constitutive model for 3D printed continuous fiber reinforced composite structures with variable fiber content, Composites Part B: Engineering, 189 (2020) 107893. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107893

[3] **T. Ma, Y. Zhang, K. Ruan, H. Guo, M. He, X. Shi, J. Gu, J. Kong, J. Gu,** Advances in 3D printing for polymer composites: A review, InfoMat, 6 (6) (2024) e12568. DOI: 10.1002/inf2.12568

[4] **M. Malik, P. Saxena,** 3D-Printed Continuous Basalt Fiber-Reinforced Polylactic Acid Composites: Effect of Printing Parameters on Impact and Interlaminar Shear Strength, Journal of Materials Engineering and Performance, 34 (18) (2025) 20879–20891. DOI: 10.1007/s11665-025-10767-9

[5] **A. Sotov, A. Abdrakhmanova, A. Zaytsev, A. Popovich,** Additive manufacturing of functional gradient thermoplastic composite using fused deposition modelling and coextrusion continuous fibres, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 137 (7) (2025) 3587–3601. DOI: 10.1007/s00170-025-15376-3

[6] **B. Fedulov, A. Fedorenko, A. Khaziev, F. Antonov,** Optimization of parts manufactured using continuous fiber three-dimensional printing technology, Composites Part B: Engineering, 227 (2021) 109406. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109406

[7] **A.V. Azarov, F.K. Antonov, M.V. Golubev, A.R. Khaziev, S.A. Ushanov,** Composite 3D printing for the small size unmanned aerial vehicle structure, Composites Part B: Engineering, 169 (2019) 157–163. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.03.073

[8] **A. Adumitroaie, F. Antonov, A. Khaziev, A. Azarov, M. Golubev, V.V. Vasiliev,** Novel Continuous Fiber Bi-Matrix Composite 3-D Printing Technology, Materials, 12 (18) (2019) 3011. DOI: 10.3390/ma12-183011

[9] **M.T. Abdel-Jaber, R. Al-Nsour, A. Almahameed, A. Ashteyat,** Comparative analysis of shear behavior in continuous low-strength RC beams strengthened with BFRP and CFRP: An experimental and numerical investigation, Composites Part C: Open Access, 16 (2025) 100575. DOI: 10.1016/j.jcomc.2025.100575

[10] **A. Zotti, S. Zuppolini, T. Tábi, M. Grasso, G. Ren, A. Borriello, M. Zarrelli,** Effects of 1D and 2D nanofillers in basalt/poly(lactic acid) composites for additive manufacturing, Composites Part B: Engineering, 153 (2018) 364–375. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.08.128

[11] **S. Rout, R.K. Nayak, S.C. Patnaik, H.Y. Nezhad,** Development of Improved Flexural and Impact Performance of Kevlar/Carbon/Glass Fibers Reinforced Polymer Hybrid Composites, Journal of Composites Science, 6 (9) (2022) 245. DOI: 10.3390/jcs6090245

[12] **V. Dhand, G. Mittal, K.Y. Rhee, S.-J. Park, D. Hui,** A short review on basalt fiber reinforced polymer composites, Composites Part B: Engineering, 73 (2015) 166–180. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.12.011

[13] **J. Zhou, X. Wang, X. Liu, J. Tao, Z. Wu,** Investigation on the shear behavior of RC beams strengthened with BFRP grids and PCM, Engineering Structures, 322 (2025) 119173. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.119173

[14] **P. Qu, H. Kong, X. Li, Y. Lei, A. Guo, S. Wang, H. Wang, Y. Hu, Y. Wan, J. Takahashi,** Additive manufacturing of hybrid continuous carbon/basalt fiber reinforced composites based on bi-matrix co-extrusion, Journal of Materials Research and Technology, 30 (2024) 8683–8704. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.05.241

[15] **A.I. Gulyaev,** Fiber-matrix adhesion strength measurement using nanoindentation (review), Proceedings of VIAM, 75 (3) (2019) 68–78. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-68-78

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

Mariia V. IVANCHURA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: ivanchura_mv@spbstu.ru
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5288-727X

Anatoliy A. POPOVICH – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: popovicha@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5974-6654

Поступила: 03.07.2026; Одобрена: 23.07.2026; Принята: 14.09.2026.
Submitted: 03.07.2026; Approved: 23.07.2026; Accepted: 14.09.2026.