

Том 28, №3, 2022



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

Васильев Ю.С., главный редактор, академик РАН, 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;
Зеуровский М.З., ин. Член РАН, академик НАН Украины, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина;

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;

Саркисов А.А., академик РАН, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Российская Федерация;

Федоров М.П., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., главный редактор, д-р техн. наук, академик РАН, научный руководитель Санкт-Петербургского политехнического университета 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;

Башкарев А.Я., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Боровков А.И., к.т.н., проректор по цифровой трансформации, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Гордеев С.К., д-р техн. наук, ст. научн. сотр. Центральный научно-исследовательский институт материалов, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Забонин В.Н., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Каляев И.А., д-р техн. наук, академик РАН, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация;

Колсуи Михал, профессор, Технический университет, Кошице, Словакия;

Коровкин Н.В., д-р техн. наук, профессор, 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;

Сергеев В.В., д-р техн. наук, профессор, чл-корр РАН, первый проректор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

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 «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки») с 1995 года издается под научно-методическим руководством Российской академии наук.

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

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

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

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

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

Редакция журнала

О.А. Матенев – ответственный секретарь;

А.А. Кононова – компьютерная вёрстка; Д.Ю. Алексеева – перевод на английский язык.

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

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

Дата выхода: 13.10.2022

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2022

28 (3) 2022



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

Vasiliev Yu.S. — head of the editorial council, full member of the Russian Academy of Sciences, Scientific director of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

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

Zgurovskiy M.Z. — foreign member of the Russian Academy of Sciences, full member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine;

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;

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

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

EDITORIAL BOARD

Vasiliev Yu.S. — editor-in-chief, full member of the Russian Academy of Sciences, Scientific director of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 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;

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

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

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

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

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

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;

Tolchko 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 St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology) 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; D.Yu. Alekseeva – English translation

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

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

Release date: 13.10.2022

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2022

Содержание

Энергетика. Электротехника

Калимов А.Г., Баган С., Говор В.М. Моделирование критического состояния сверхпроводниковых катушек в индуктивных накопителях энергии.....	7
Бусаров С.С., Вансович К.А. Оценка усталостного разрушения цилиндра малорасходного тихоходного поршневого компрессора.....	18
Гулов А.М., Колычев А.В., Косоруков А.В. Применение ОПН на участках воздушных линий 110 кВ без грозозащитного троса.....	31

Металлургия. Материаловедение

Балахонов Д.И., Николенко С.В., Макаров И.А. Исследование структур боридов вольфрама полученных при плазмохимическом синтезе из минерального вольфрамсодержащего концентрата.....	41
Васильева Е.Д., Иванов А.Н., Стручков Н.Ф., Кычкин А.К. Сравнение смачиваемости стеклопластика этиловым спиртом и керосином для определения открытой пористости.....	53
Гончаренко Д.В., Кирьянов А.А., Кочемировская С.В. Исследование влияния лазерной обработки поверхности алюминиевого сплава на адгезию металл-полимер.....	65
Юнусов Ф.А., Ларионова Т.В., Толочко О.В. Влияния легирующих элементов на структуру и свойства композиционных материалов на основе алюминия с углеродными наночастицами.....	75

Contents

Energetics. Electrical engineering

- Kalimov A.G., Bagan S., Govor V.M.** Modeling of the superconducting coil critical state in the inductive energy storage systems..... 7
- Busarov S.S., Vansovich K.A.** Evaluation of fatigue failure of a cylinder of a low-flows silent-speed reciprocating compressor..... 18
- Gulov A.M., Kolychev A.V., Kosorukov A.V.** The use of surge arresters on sections of 110 kV overhead lines without a ground wire..... 31

Metallurgy. Material Science

- Balakhonov D.I., Nikolenko S.N., Makarov I.A.** Investigation of tungsten boride structures obtained in plasma-chemical synthesis from a mineral tungsten-containing concentrate..... 41
- Vasileva E.D., Ivanov A.N., Struchov N.F., Kychkin A.K.** Comparison of wettability of fiberglass | plastic with ethyl alcohol and kerosene to determine open porosity..... 53
- Goncharenko D.V., Kiryanov A.A., Kochemirovskaja S.V.** Effect of laser treatment of aluminum alloy surface effect on metal-polymer adhesion..... 65
- Yunusov F.A., Larionova T.V., Tolochko O.V.** Influence of alloying elements on the structure and properties of aluminum-based composites with carbon nanoparticles..... 75

Энергетика. Электротехника Energetics. Electrical engineering

Научная статья

УДК 621.3.013.22

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28301>



А.Г. Калимов ✉, С. Баган, В.М. Говор

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

✉ alexanderkalimov@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КАТУШЕК В ИНДУКТИВНЫХ НАКОПИТЕЛЯХ ЭНЕРГИИ

Аннотация. В статье рассматривается новый метод определения критических токов в катушках, выполненных из сверхпроводниковых лент второго поколения, которые предлагается использовать для создания индуктивных накопителей энергии. Предлагаемый подход основан на совместном решении интегрального уравнения электромагнитного поля и уравнения состояния материала сверхпроводника, критическая плотность тока в котором определяется на основе модифицированной анизотропной модели Кима. Дискретизация полученной системы проведена с использованием метода коллокаций. Разработан алгоритм решения сформированной системы уравнений, который был применен для определения критического тока в катушках, входящих в состав индуктивных накопителей энергии. Серия численных экспериментов выявила эффект значительной деградации критического тока в катушках по сравнению с декларируемыми параметрами, полученными для коротких образцов сверхпроводниковой ленты.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, сверхпроводниковые накопители энергии, критический ток, модель критического состояния, сверхпроводники второго поколения.

Для цитирования:

Калимов А.Г., Баган С., Говор В.М. Моделирование критического состояния сверхпроводниковых катушек в индуктивных накопителях энергии // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 3. С. 7–17. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28301>



A.G. Kalimov ✉, S. Bagan, V.M. Govor

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

✉ alexanderkalimov@gmail.com

MODELING OF THE SUPERCONDUCTING COIL CRITICAL STATE IN THE INDUCTIVE ENERGY STORAGE SYSTEMS

Abstract. A new method for determining critical currents in coils made of second-generation superconducting tapes is considered in the paper. The proposed approach is based on the joint solution of the integral equation of the electromagnetic field and the equation of state of the superconductor material, the critical current density in which is determined on the basis of the modified anisotropic Kim–Anderson model. Discretization of the equation system has been done by the collocation method. By means of the developed algorithm for solving the derived equations system, we calculated the critical current in coils used in inductive energy storage systems. A series of numerical experiments revealed the effect of significant degradation of the critical current in the coils compared to the declared parameters obtained for short samples of a superconducting tape.

Keywords: renewable energy sources, superconducting energy storage, critical current, critical state model, second generation superconductors.

Citation:

A.G. Kalimov, S. Bagan, V.M. Govor, Modeling of the superconducting coil critical state in the inductive energy storage systems, *Global Energy*, 28 (03) (2022) 7–17, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28301>

Введение. Значительное негативное влияние традиционных источников энергии [1, 2] на окружающую среду привело к тому, что в последнее время повышенное внимание уделяется развитию и практическому использованию возобновляемых источников энергии. Существенная особенность практического использования этих источников энергии и их интеграции в электрические сети заключается в их нестабильности: изменения скорости ветра для ветровых электростанций и изменения освещенности на солнечных электростанциях создают значительные колебания вырабатываемой электрической мощности, что во многих случаях требует применения специальных решений для сглаживания этих колебаний [3, 4]. С этой целью в общую структуру системы генерации электроэнергии вводятся накопители, использующие различные технические решения. Одним из наиболее перспективных способов решения этой проблемы является использование накопителей энергии магнитного поля в сверхпроводниковых системах [5–13]. Наибольший интерес в настоящее время вызывает применение высокотемпературных сверхпроводниковых лент второго поколения для создания таких установок. Серьезной проблемой, возникающей при решении этой задачи, является сложность определения критического тока обмотки, поскольку распределение плотности тока по сечению сверхпроводниковой ленты существенно неоднородно и зависит от многих факторов.

На практике для решения этой задачи используется целый ряд математических моделей, основанных на совместном решении уравнений электромагнитного поля и уравнений состояния сверхпроводникового материала. В частности, применение нашли модели, основанные на решении системы дифференциальных уравнений состояния: формулировка A-V [14], формулировка

Н [15, 16], формулировка Т-А [17]. Значительным недостатком этих моделей является необходимость моделирования процессов в так называемом пограничном слое – узкой области перехода материала из нормального в сверхпроводящее состояние. Надежная экспериментальная информация о свойствах такого слоя отсутствует, а используемые аппроксимации проводимости сверхпроводника в виде полиномов высокой степени от плотности тока в целом противоречат общим представлениям о свойствах подобных материалов. В настоящей статье представлен новый альтернативный метод моделирования сверхпроводников 2-го поколения, основанный на совместном решении интегральных уравнений электромагнитного поля и уравнения состояния сверхпроводникового объекта.

Математическая модель сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии

Высокотемпературный сверхпроводник 2-го поколения представляет собой тонкую медно-никелевую ленту, на поверхность которой нанесены несколько слоев различных материалов, включая сверхпроводниковую керамику. Ширина сверхпроводниковой ленты составляет обычно величину порядка 4 – 12 мм, в то время, как толщина слоя, по которому протекает ток не превышает нескольких микрометров. В таких условиях возникает существенная неоднородность распределения плотности электрического тока по ширине ленты, что, с одной стороны, вызвано специфическими свойствами сверхпроводниковых материалов, и, с другой стороны, оказывает существенное влияние на максимально возможный (критический) ток, проходящий по проводнику.

Расчет распределения магнитного поля в рамках разработанной математической модели осуществляется на основе закона Био-Савара (1):

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J}(\vec{r}') \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dV. \quad (1)$$

Интегрирование проводится по области, занятой материалом проводника.

Состояние сверхпроводникового материала определяется на основе теории критического состояния Кима-Андерсена [18]. Она построена на предположении о том, что плотность тока в сверхпроводнике может принимать только два значения. Одно из них – нулевое, другое – критическое, то есть максимально возможное при заданном значении индукции магнитного поля. Сама зависимость критического тока от интенсивности магнитного поля определяется выбранной моделью критического состояния. В настоящей работе используется один из вариантов так называемой модели Кима [18–19]. В общем случае она задает зависимость критической плотности тока от напряженности магнитного поля в виде соотношения:

$$J(B) = \frac{J_{c0}}{(1 + |B|/B_0)^\alpha}, \quad (2)$$

где J_{c0} , B_0 и α – параметры, зависящие от свойств материала и определяемые эмпирически. Изначально эта модель была сформирована для изотропных низкотемпературных сверхпроводников. Однако, в сверхпроводниковых лентах 2-го поколения критическая плотность тока существенно зависит не только от величины индукции магнитного поля, но и от ее направления. Экспериментальные исследования показывают, что в первую очередь сверхпроводимость разрушается составляющей магнитного поля, перпендикулярной боковой поверхности сверхпроводниковой ленты [20, 21]. Этот эффект учитывается в модифицированной модели Кима:

$$J(B_{\perp}, B_{\parallel}) = \frac{J_{c0}}{\left(1 + \frac{\sqrt{B_{\perp}^2 + k^2 B_{\parallel}^2}}{B_0}\right)^{\alpha}}. \quad (3)$$

Параметр k обычно намного меньше единицы. Более того, во многих случаях он может быть принят равным нулю без существенной потери точности моделирования состояния сверхпроводниковой системы [20].

Объединение двух вышеуказанных моделей приводит к формированию нелинейного интегрального уравнения с неизвестной плотностью тока. В связи с тем, что ток протекает по тонкому слою, фактически эта величина является скалярной переменной, а направление соответствующего вектора определяется структурой и расположением витков обмотки.

Для численного решения системы уравнений (1) – (3), прежде всего, проводится дискретизация расчетной области. В дальнейшем в качестве объекта исследования будет рассматриваться многослойная цилиндрическая катушка. Такая задача обладает цилиндрической симметрией, соответственно расчетная область может быть сведена к поперечному сечению обмотки. На практике ток в катушке протекает только в тонких сверхпроводниковых слоях, однако при формировании расчетной модели оказывается удобным предположение о его равномерном распределении по толщине всей композитной ленты. Такое преобразование расчетной области практически не влияет на окончательные результаты моделирования [17].

При создании математической модели поперечное сечение каждого витка сверхпроводникового накопителя разбивается на некоторое число прямоугольных элементов, в пределах каждого из которых плотность тока предполагается постоянной и определяется интенсивностью магнитного поля в центре элемента. В результате такого представления уравнения (1) – (3) могут быть заменены системой нелинейных алгебраических уравнений.

Теория критического состояния сверхпроводников 2-го рода показывает, что проникновение магнитного поля (а соответственно и токов) в сверхпроводящие объекты может происходить только через их поверхности. Применительно к используемой процедуре дискретизации обмотки этот принцип приводит к трем возможным состояниям каждого отдельно взятого элемента:

- а) внутри элемента протекает критический ток, величина которого определяется значением индукции магнитного поля в центре этого элемента;
- б) ток внутри элемента равен нулю;
- в) ток в элементе имеет промежуточное значение, не превышающее критическую величину.

Присутствие элементов последнего типа означает, что в некоторой их части протекает ток с критической плотностью, а в оставшемся пространстве ток либо равен нулю, либо направлен в противоположную сторону. Промежуточные элементы могут располагаться только в определенных местах:

1. На границах расчетной области при очень малых значениях транспортного тока в сверхпроводниковых лентах;
2. На стыке групп элементов с критической и нулевой плотностей тока;
3. На стыке групп элементов с противоположными направлениями плотности тока.

Указанные особенности распределения плотности тока в сверхпроводниковых лентах были интегрированы в алгоритм решения системы уравнений (1) – (3). Следствием указанных особенностей является то, что распределение плотности тока в витках обмотки при фиксированном полном токе в общем случае не определено однозначно и зависит от предыстории, от того каким именно образом был индуцирован рассматриваемый транспортный ток. Исключением является состояние обмотки, соответствующее критическому току.

Для определения критического тока в обмотке в рамках предлагаемого метода моделирования производится постепенное наращивание тока в катушке, начиная с нулевого уровня. Критическим считается состояние, при котором все элементы хотя бы одного из витков переходят в критическую группу при дополнительном условии протекания всех токов в одном направлении.

Основные результаты расчета распределения плотности тока в сверхпроводниковой катушке

Рассмотрим цилиндрическую катушку, состоящую из некоторого числа витков, намотанных сверхпроводниковой лентой (см. рис. 1а). Поперечное сечение этой катушки показано на рис. 1б. Основной целью моделирования состояния катушки на рассматриваемом этапе исследования является определение ее критического тока.

При проведении описываемых численных экспериментов мы использовали модифицированную модель Кима с параметрами $\alpha = 1$, $k = 0$, $J_{c0} = 28 \cdot 10^9 \text{ A/m}^2$, $B_0 = 42,65 \text{ мТ}$ [20].

Для пояснения процедуры применения разработанной математической модели рассмотрим отдельный виток сверхпроводниковой катушки. Для формирования системы алгебраических уравнений разобьем ленту по ширине на m конечных элементов (см. рис. 2).

Здесь J_i – усредненная плотность тока в i – ой ячейке. Сумма токов во всех ячейках равна транспортному току:

$$I = \sum_{i=1}^m J_i \cdot S_i,$$

где S_i – площадь соответствующей ячейки. В рассматриваемой здесь математической модели эта площадь одинакова для всех ячеек. На первом итерационном шаге моделирования распределения токов принималось условие тока $J_i = 0$ для всех ячеек, что соответствует нулевому транспортному току. Как только ток в ленте изменяется на малую величину ΔI , он распределяется таким образом, что $J_i = 0$ при $i = 2, 3, \dots, m - 1$. При этом усредненная плотность тока в ячейках с номерами 1 и m определяется соотношением

$$J_1 = J_m = \frac{\Delta I}{2S}.$$

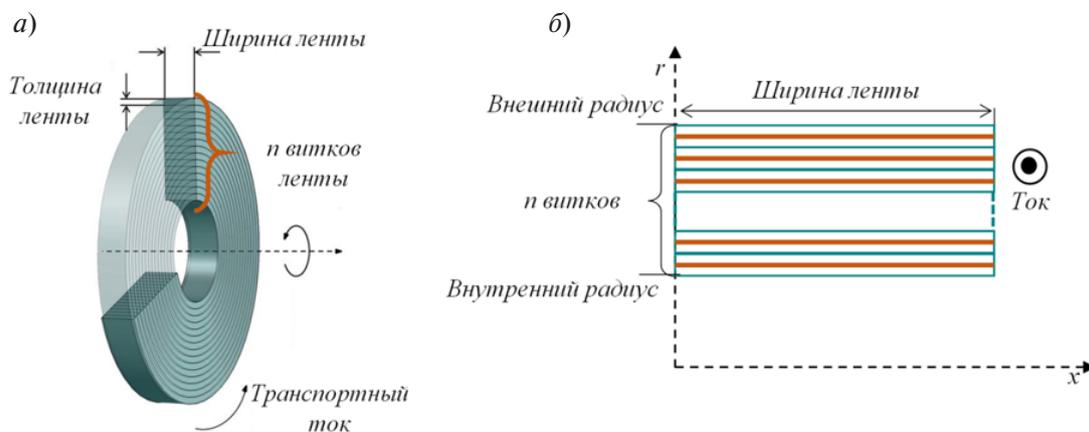


Рис. 1. Структура сверхпроводниковой катушки: а) общий вид, б) поперечное сечение обмотки

Fig. 1. Structure of the superconducting coil: a) general view, b) the cross section of the coil



Рис. 2. Распределение плотности тока по ширине ленты
 Fig. 2. Distribution of the current density over the width of the superconducting bend

При дальнейшем увеличении транспортного тока он достигает критического уровня в приграничных ячейках и проникает в соседние. Причем момент перехода тока из ячеек с номерами i и m может происходить при различном уровне транспортного тока, а также зависит от положения витка в катушке.

Рассматриваемая процедура моделирования плотности тока предполагает проведение последовательности итераций, во время которых ток изменяется на некоторую малую величину ΔI , в этот момент производится перерасчет распределения магнитного поля, что в свою очередь приводит к изменению распределения токов по элементам дискретизации. На последнем шаге итерационной процедуры ток протекает во всех элементах хотя бы одного витка катушки. В результате происходит определение критического тока рассматриваемой сверхпроводниковой катушки.

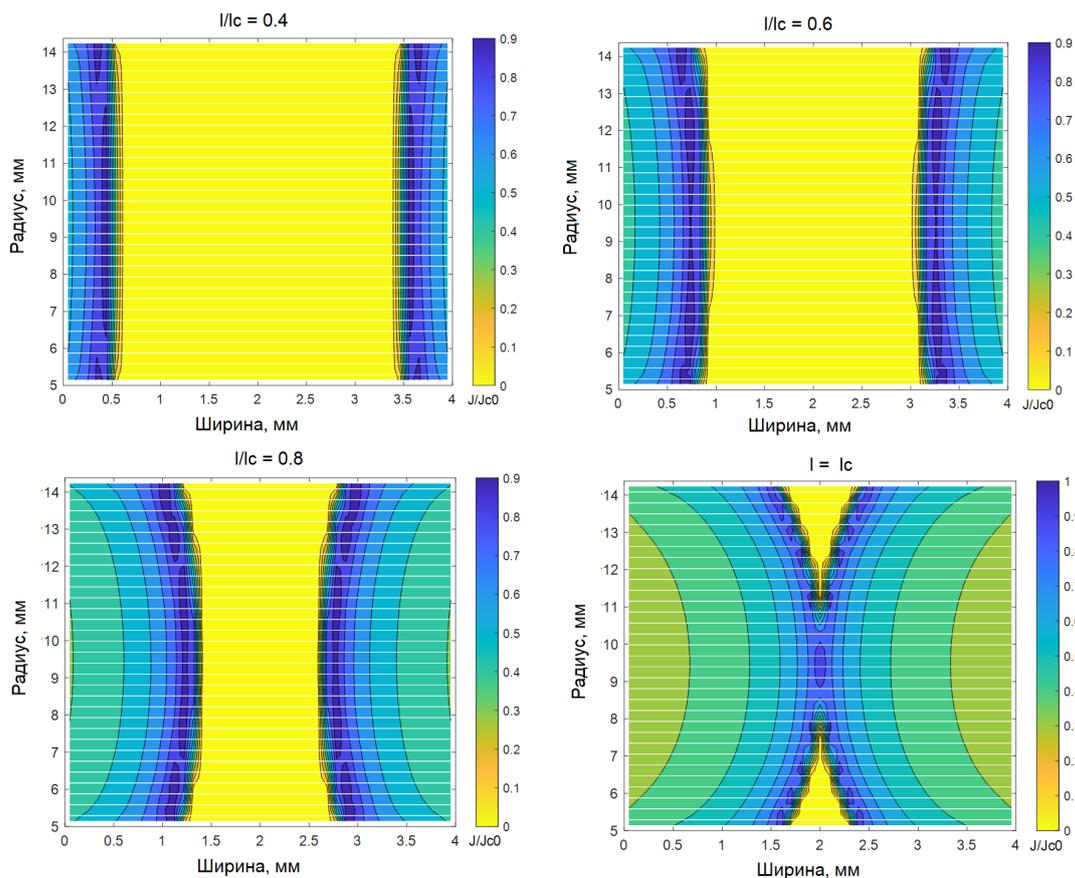


Рис. 3. Распределение плотности тока в сверхпроводниковых лентах.
 Число витков в катушке $N = 32$, внутренний радиус $R = 40$ мм
 Fig. 3. Distribution of the current density inside superconducting bends.
 The number of turns in the coil is $N = 32$, the inner radius is $R = 40$ mm

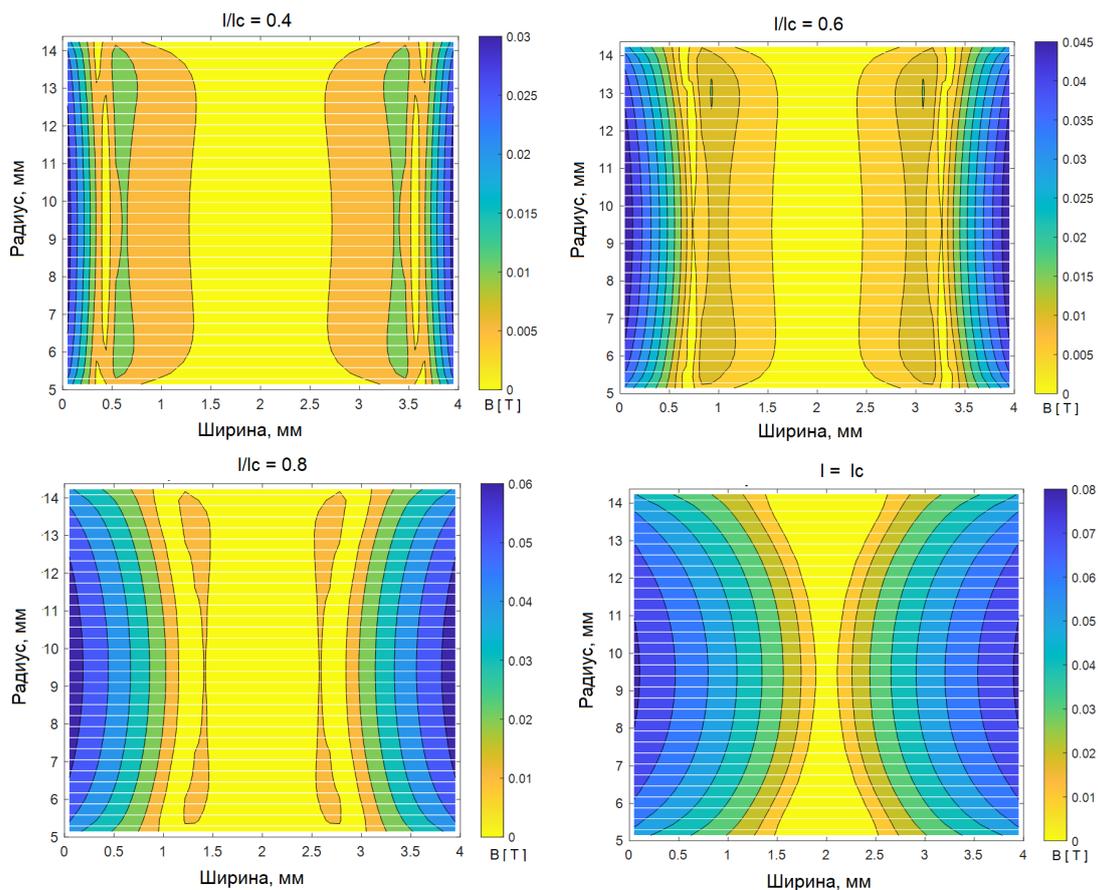


Рис. 4. Распределение нормальной компоненты индукции магнитного поля в сверхпроводниковых лентах.
Число витков в катушке $N = 32$, внутренний радиус $R = 40$ мм

Fig. 4. Distribution of the flux density normal component inside superconducting bends.
The number of turns in the coil is $N = 32$, the inner radius is $R = 40$ mm

В качестве примера применения разработанного метода мы рассмотрели многovitковую катушку, намотанную сверхпроводниковой лентой шириной 4 мм. Толщина ленты вместе со слоем изоляции равно 0.15 мм. Количество витков варьировалось в пределах от 1 до 200. Для иллюстрации итерационной процедуры определения критического тока ниже приведены распределения плотности тока для катушки, состоящей из 32 витков при различных значениях транспортного тока – 40%, 60%, 80%, и 100% от критического уровня (см. рис. 3). Полученный в конечном итоге критический ток составил $I_c = 54,3$ А. Соответствующие распределения нормальной к поверхности лент компоненты индукции магнитного поля приведены на рис. 4.

Как видно из приведенных диаграмм в критическом режиме находится только лента, располагающаяся в центральной части катушки. Именно она полностью находится в токовом состоянии и, таким образом, ограничивает максимально возможный ток в катушке.

Интерес представляет, также, случай одновитковой катушки. Проведенные расчеты показали, что величина критического тока составила в этом случае почти вдвое большее значение $I_c = 96$ А.

Обсуждение результатов расчета критического тока

В результате применения разработанной модели расчета распределения плотности тока в сверхпроводниковых системах второго поколения была исследована зависимость критического тока в катушке от ее структуры. Критический ток в одновитковой катушке практически совпал

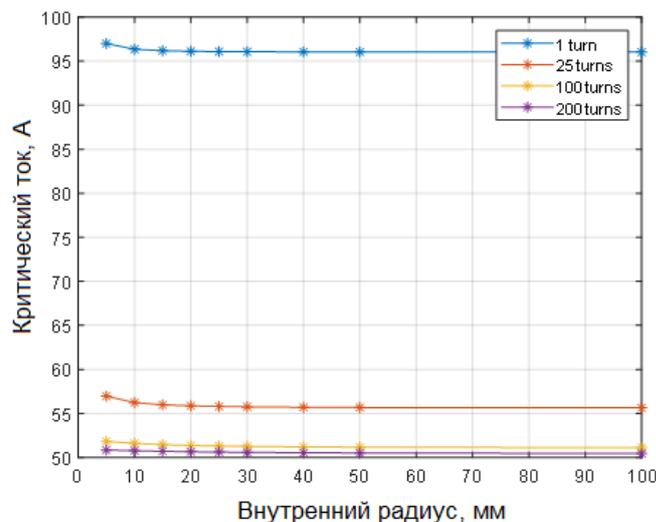


Рис. 5. Критический ток в зависимости от внутреннего радиуса для катушек с различным числом витков
 Fig. 5. Dependence of the critical current on the inner radius for the coils with different number of turns

с паспортным значением ленты, выпускаемой компанией SuperPower [20]: $I_c = 100$ А – экспериментально измеренный ток; $I_c = 96$ А – расчетное значение. Данное обстоятельство подтверждает корректность и достаточную для практического применения точность результатов, получаемых с использованием разработанной математической модели. При исследовании многovitковых систем отмечена значительная деградация критического тока при увеличении числа витков в катушке вплоть до значения $I_c = 50$ А (см. рис. 5). Этот результат показывает особую важность оптимального выбора характеристик индуктивного накопителя на этапе его проектирования.

Исследование зависимости критического тока от внутреннего радиуса катушки показали, что этот параметр не является столь же существенным. Он уменьшается всего лишь на несколько процентов при изменении внутреннего радиуса катушки в пределах от 5 до 100 мм, причем это изменение более существенно для многovitковых катушек.

Заключение

Разработан новый метод расчета распределения плотности тока в высокотемпературных сверхпроводниковых магнитных системах второго поколения. Основной идеей этого метода является объединение уравнений электромагнитного поля в интегральной форме с уравнением критического состояния сверхпроводникового материала. Разработан алгоритм решения получающейся системы нелинейных уравнений. Созданная математическая модель и ее численная реализация применены для исследования свойств сверхпроводниковой катушки. На примере одновитковой катушки подтверждена корректность результатов моделирования критического состояния сверхпроводниковой системы. В результате проведения серии расчетов выявлен эффект значительной деградации критического тока в многovitковых катушках, что представляет собой важный практический результат. Учет этого эффекта окажет существенное влияние на характеристики разрабатываемых сверхпроводниковых накопительных систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Сидоренко В.Ф., Дудников В.В. Улучшение качества городской среды путем использования локальных ветровых источников энергии // Социология города. 2018. №. 2. С. 5–17.

- [2] **Yu M.** Assessment on the Environmental Impact of Conventional Energy Forms, in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 680 (1) (2021). DOI: 10.1088/1755-1315/680/1/012002
- [3] **Watson S.** Quantifying the variability of wind energy, Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ, 3 (4), (2014) 330–342, DOI: 10.1002/wene.95
- [4] **Anvari M., Lohmann G., Wächter M., Milan P., Lorenz E., Heinemann D.** Short term fluctuations of wind and solar power systems, New J. Phys., 18 (063027) (2016). DOI: 10.1088/1367-2630/18/6/063027
- [5] **Rahman O., Muttaqi K.M., Sutanto D.** High temperature superconducting devices and renewable energy resources in future power grids: A case study, IEEE Trans. Appl. Supercond., 29 (2) (2019) 10–13. DOI: 10.1109/TASC.2019.2895677
- [6] **Zhou X., Li S., Shi J., Zhang C., Tang Y.** Capacity-Control Optimization of SMES in Distribution Networks with Renewable Energy, IEEE Trans. Appl. Supercond., 29 (5) (2019). DOI: 10.1109/TASC.2019.2906660
- [7] **Yunus A.M.S., Abu-Siada A., Masoum M.A.S., El-Naggar M.F., Jin J.X.** Enhancement of DFIG LVRT capability during extreme short-wind gust events using SMES technology, IEEE Access, 8 (2020) 47264–47271, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2978909
- [8] **Hoffmann E., Alcorn J., Chen W., Hsu Y.H., Purcell J.** Design of the BPA superconducting 30 MJ energy storage coil, IEEE Trans. Magn., 17 (1) (1981) 521–524. DOI: 10.1109/mc.2020.2974641
- [9] **Nagaya S., Hirano N., Kondo M., Tanaka T., Nakabayashi H.** Development and performance results of 5 MVA SMES for bridging instantaneous voltage dips, IEEE Trans. Appl. Supercond., 14 (2) (2004) 699–704, DOI: 10.1109/TASC.2004.830076
- [10] **Zhu J., Chen P., Qiu M., Liu C., Liu J., Zhang H.** Experimental investigation of a high temperature superconducting pancake consisted of the REBCO composite cable for superconducting magnetic energy storage system, IEEE Trans. Appl. Supercond., 29 (5) (2019) 1–4. DOI: 10.1109/TASC.2019.2897574
- [11] **Xu Y., Li Y., Ren L., Xu C., Tang Y.** Research on the Application of Superconducting Magnetic Energy Storage in the Wind Power Generation System for Smoothing Wind Power Fluctuations, IEEE Trans. Appl. Supercond., 31 (5) (2021) 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2021.3064520
- [12] **Zimmermann A.W., Sharkh S.M.** Design of a 1 MJ/100 kW high temperature superconducting magnet for energy storage, Energy Reports, 6 (5) (2020) 180–188. DOI: 10.1016/j.egy.2020.03.023
- [13] **Al Zaman M.A., Islam M.R., Maruf H.M.A.R.** Study on conceptual designs of superconducting coil for energy storage in SMES, East Eur. J. Phys., 1 (2020) 111–120. DOI: 10.26565/2312-4334-2020-1-10
- [14] **Musso A., Breschi M., Ribani P.L., Grilli F.** Analysis of AC Loss Contributions from Different Layers of HTS Tapes Using the A-V Formulation Model, IEEE Trans. Appl. Supercond., 31 (2) (2021). DOI: 10.1109/TASC.2020.3033587
- [15] **Shen B., Grilli F., Coombs T.I.M., Member S.** Overview of H-Formulation: A Versatile Tool for Modeling Electromagnetics in High-Temperature Superconductor Applications, IEEE Access, 8 (2020) 100403–100414. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2996177
- [16] **Sotelo G.G., Carrera M., Lopez-Lopez J., Granados X.** H-Formulation FEM Modeling of the Current Distribution in 2G HTS Tapes and Its Experimental Validation Using Hall Probe Mapping, IEEE Trans. Appl. Supercond., 26 (8) (2016) 1–10. DOI: 10.1109/TASC.2016.2591825
- [17] **Xu X., Huang Z., Li W., Huang X., Wang M.** 3D finite element modelling on racetrack coils using the homogeneous T-A formulation, Cryogenics, 119 (2021). DOI: 10.1016/j.cryogenics.2021.103366
- [18] **Уилсон М.** Сверхпроводящие магниты: М.: Мир, 1985. 405 с.
- [19] **Robert B.C., Fareed M.U., Ruiz H.S.** How to choose the superconducting material law for the modelling of 2G-HTS coils, Materials, 12 (7) (2019) 1–19. DOI: 10.3390/ma12172679
- [20] **Yuan W.** Second-Generation High-Temperature Superconducting Coils and Their Applications for Energy Storage, University of Cambridge, 2011.
- [21] **Pan V.M., Kasatkin A.L., Svetchnikov V.L., Komashko V.A., Popov A.G.** Critical current density in highly biaxially-oriented YBCO films: Can we control $J_C(77K)$ and optimize up to more than 10^6 Amp/cm²?, IEEE Trans. Appl. Supercond., 9 (2) (1999) 1535–1538. DOI: 10.1109/77.784686

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КАЛИМОВ Александр Гелиевич – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: alexanderkalimov@gmail.com

БАГАН Стив – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: bagan307@yahoo.fr

ГОВОР Владислав Михайлович – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: pwnway@gmail.com

REFERENCES

- [1] **V.F. Sidorenko, V.V. Dudnikov**, Uluchsheniye kachestva gorodskoy sredy putem ispolzovaniya lokalnykh vetrovykh istochnikov energii // Sotsiologiya goroda. 2018. №. 2. s. 5–17. V.F. Sidorenko, V.V. Dudnikov. Improving the quality of the urban environment through the use of local wind energy sources // Sotsiologiya goroda. 2018. №. 2. p. 5–17.
- [2] **M. Yu**, Assessment on the Environmental Impact of Conventional Energy Forms, in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 680 (1) (2021). DOI: 10.1088/1755-1315/680/1/012002
- [3] **S. Watson**, Quantifying the variability of wind energy, Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ, 3 (4) (2014) 330–342. DOI: 10.1002/wene.95
- [4] **M. Anvari, G. Lohmann, M. Wächter, P. Milan, E. Lorenz, D. Heinemann**, Short term fluctuations of wind and solar power systems, New J. Phys., 18 (063027) (2016). DOI: 10.1088/1367-2630/18/6/063027
- [5] **O. Rahman, K.M. Muttaqi, D. Sutanto**, High temperature superconducting devices and renewable energy resources in future power grids: A case study, IEEE Trans. Appl. Supercond., 29 (2) (2019) 10–13. DOI: 10.1109/TASC.2019.2895677
- [6] **X. Zhou, S. Li, J. Shi, C. Zhang, Y. Tang**, Capacity-Control Optimization of SMES in Distribution Networks with Renewable Energy, IEEE Trans. Appl. Supercond., 29 (5) (2019). DOI: 10.1109/TASC.2019.2906660
- [7] **A.M.S. Yunus, A. Abu-Siada, M.A.S. Masoum, M.F. El-Naggar, J.X. Jin**, Enhancement of DFIG LVRT capability during extreme short-wind gust events using SMES technology, IEEE Access, 8 (2020) 47264–47271. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2978909
- [8] **E. Hoffmann, J. Alcorn, W. Chen, Y.H. Hsu, J. Purcell**, Design of the BPA superconducting 30 MJ energy storage coil, IEEE Trans. Magn., 17 (1) (1981) 521–524. DOI: 10.1109/mc.2020.2974641
- [9] **S. Nagaya, N. Hirano, M. Kondo, T. Tanaka, H. Nakabayashi**, Development and performance results of 5 MVA SMES for bridging instantaneous voltage dips, IEEE Trans. Appl. Supercond., 14 (2) (2004) 699–704. DOI: 10.1109/TASC.2004.830076
- [10] **J. Zhu, P. Chen, M. Qiu, C. Liu, J. Liu, H. Zhang**, Experimental investigation of a high temperature superconducting pancake consisted of the REBCO composite cable for superconducting magnetic energy storage system, IEEE Trans. Appl. Supercond., 29 (5), (2019) 1–4. DOI: 10.1109/TASC.2019.2897574
- [11] **Y. Xu, Y. Li, L. Ren, C. Xu, Y. Tang**, Research on the Application of Superconducting Magnetic Energy Storage in the Wind Power Generation System for Smoothing Wind Power Fluctuations, IEEE Trans. Appl. Supercond., 31 (5) (2021) 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2021.3064520
- [12] **A.W. Zimmermann, S.M. Sharkh**, Design of a 1 MJ/100 kW high temperature superconducting magnet for energy storage, Energy Reports, 6 (5) (2020) 180–188. DOI: 10.1016/j.egy.2020.03.023

- [13] **M.A. Al Zaman, M.R. Islam, H.M.A.R. Maruf**, Study on conceptual designs of superconducting coil for energy storage in SMES, *East Eur. J. Phys.*, 1 (2020) 111–120. DOI: 10.26565/2312-4334-2020-1-10
- [14] **A. Musso, M. Breschi, P.L. Ribani, F. Grilli**, Analysis of AC Loss Contributions from Different Layers of HTS Tapes Using the A-V Formulation Model, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 31 (2) (2021). DOI: 10.1109/TASC.2020.3033587
- [15] **B. Shen, F. Grilli, T.I.M. Coombs, S. Member**, Overview of H-Formulation: A Versatile Tool for Modeling Electromagnetics in High-Temperature Superconductor Applications, *IEEE Access*, 8 (2020) 100403–100414. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2996177
- [16] **G.G. Sotelo, M. Carrera, J. Lopez-Lopez, X. Granados**, H-Formulation FEM Modeling of the Current Distribution in 2G HTS Tapes and Its Experimental Validation Using Hall Probe Mapping, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 26 (8) (2016) 1–10. DOI: 10.1109/TASC.2016.2591825
- [17] **X. Xu, Z. Huang, W. Li, X. Huang, M. Wang**, 3D finite element modelling on racetrack coils using the homogeneous T-A formulation, *Cryogenics*, 119 (2021). DOI: 10.1016/j.cryogenics.2021.103366
- [18] **M. Wilson**, *Sverkhprovodyastchie magnity: M.: Mir*, 1985. 405 s. M. Wilson. Superconducting magnets: M.: Mir, 1985. 405 p.
- [19] **B.C. Robert, M.U. Fareed, H.S. Ruiz**, How to choose the superconducting material law for the modeling of 2G-HTS coils, *Materials*, 12 (7) (2019) 1–19. DOI: 10.3390/ma12172679
- [20] **W. Yuan**, *Second-Generation High-Temperature Superconducting Coils and Their Applications for Energy Storage*, University of Cambridge, 2011.
- [21] **V.M. Pan, A.L. Kasatkin, V.L. Svetchnikov, V.A. Komashko, A.G. Popov**, Critical current density in highly biaxially-oriented YBCO films: Can we control $J_C(77K)$ and optimize up to more than 10^6 Amp/cm²?, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 9 (2) (1999) 1535–1538. DOI: 10.1109/77.784686

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Alexander G. KALIMOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: alexanderkalimov@gmail.com

Steve BAGAN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: bagan307@yahoo.fr

Vladislav M. GOVOR – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: pwnway@gmail.com

Поступила: 21.07.2022; Одобрена: 05.09.2022; Принята: 21.09.2022.
Submitted: 21.07.2022; Approved: 05.09.2022; Accepted: 21.09.2022.

Научная статья

УДК 621.512.2

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28302>



С.С. Бусаров¹ ✉, К.А. Вансович¹

Омский государственный технический университет,
г. Омск, Россия

✉ bssi1980@mail.ru

ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ЦИЛИНДРА МАЛОРАСХОДНОГО ТИХОХОДНОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА

Аннотация. В статье выполнена оценка ресурса усталостного нагружения цилиндра тихоходной ступени длинноходового поршневого агрегата при нагружении внутренним давлением рабочей среды в зоне нагнетания. Для тихоходных компрессорных ступеней актуальной задачей является изучение поведения конструкций при длительной эксплуатации, поскольку данная машина недостаточно изучена и цель её создания – повышенный ресурс по сравнению с существующими многоступенчатым аналогами. Результаты анализа работы компрессорного агрегата, полученные в программе ANSYS Workbench, позволяют оценить влияние свойств материала и конструкции цилиндра, а также характеристик его нагружения на усталостную прочность. Проведённые исследования позволили создать общий подход к проектированию поршневых ступеней агрегатов в условиях эксплуатационных нагрузок, позволяющий создавать поршневые ступени с заданным ресурсом работы.

Ключевые слова: тихоходный поршневой агрегат; напряженно-деформированное состояние; предел выносливости материала; усталостная прочность; остаточный ресурс.

Для цитирования:

Бусаров С.С., Вансович К.А. Оценка усталостного разрушения цилиндра малорасходного тихоходного поршневого компрессора // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 3. С. 18–30. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28302>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28302>*S.S. Busarov*¹ ✉, *K.A. Vansovich*¹Omsk State Technical University,
Omsk, Russia✉ bssi1980@mail.ru

EVALUATION OF FATIGUE FAILURE OF A CYLINDER OF A LOW-FLOWS SILENT-SPEED RECIPROCATING COMPRESSOR

Abstract. The article evaluates the fatigue loading resource of the low-speed stage cylinder of a long-stroke piston unit when loaded by the internal pressure of the working medium in the injection zone. For low-speed compressor stages, an urgent task is to study the behavior of structures during long-term operation, since this machine has not been sufficiently studied and the purpose of its creation is an increased resource compared to existing multi-stage analogues. The results of the analysis of the operation of the compressor unit, obtained in the ANSYS Workbench program, make it possible to evaluate the influence of the properties of the material and design of the cylinder, as well as the characteristics of its loading on fatigue strength. The conducted research allowed us to create a general approach to the design of piston stages of units under the conditions of operational loads, which makes it possible to create piston stages with a given service life.

Keywords: low-speed piston unit; stress-strain state; endurance limit of the material; fatigue strength; residual resource.

Citation:

S.S. Busarov, K.A. Vansovich, Evaluation of fatigue failure of a cylinder of a low-flows silent-speed reciprocating compressor, *Global Energy*, 28 (03) (2022) 18–30, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28302>

Введение. Развитие нефтегазовой, космической, пищевой и химической отраслей, медицины и других отраслей техники и промышленности, стратегическое освоение Мирового океана, космоса, Арктики и Антарктики привело к необходимости создания технологического и специального оборудования, способного длительно и надёжно работать в удалённых условиях эксплуатации, в том числе в автономном режиме.

Особую группу представляют собой малорасходные компрессорные агрегаты среднего и высокого давления, к которым в числе прочих предъявляются требования надёжной непрерывной работы в течение длительного срока эксплуатации, возможность функционирования в широком диапазоне атмосферных температур, в том числе в полевых условиях, возможность обеспечения требуемого уровня чистоты и температуры сжатого газа [1–5].

Например, срок наработки без обслуживания для существующих поршневых и мембранных компрессоров среднего и высокого давления составляет не более 5000 – 10000 часов [6], тогда как при работе систем жизнеобеспечения в космосе требуемый ресурс может превышать 80 000 часов [7]. В других случаях автономных условий эксплуатации этот срок значительно меньше, но и там нередко превышает 30 000 часов [8, 9]. Ограниченный ресурс существующих компрессоров в первую очередь связан с ресурсом цилиндропоршневого уплотнения. Как и в любых типах поршневых компрессоров, в компрессорах без смазки проточной части важной задачей является также и обеспечение требуемого ресурса работы клапанов (вторая из основных причин, влияющих на надёжность поршневого компрессора). Статистические данные показывают, что третьей основной причиной выхода из строя компрессора является поломка подшипников [9]. Ресурс современных подшипников достигает 60 000 часов и более [9].

Дальнейшее повышение ресурса несмазываемых малорасходных поршневых компрессоров среднего и высокого давления актуально и возможно за счёт совершенствования рабочего процесса, а также режимов работы и конструкций основных функциональных элементов несмазываемых поршневых компрессорных ступеней. Поскольку подшипниковые узлы по величине ресурса существенно превосходят клапаны и цилиндропоршневые уплотнения, то из условий обеспечения равномерного износа всех конструктивных элементов обеспечить повышение ресурса клапанов и уплотнений, приняв за ориентир (цель) существующий уровень наработки подшипников (не менее 60 000 часов), а в качестве перспективной задачи рассматривать достижение ресурса не менее 100 000 часов.

В настоящее время, если говорить о машинах малой производительности (не более 1 л/с), одним из вариантов применяемых компрессорных ступеней при жёстких требованиях к вибро-шумовым характеристикам, чистоте сжимаемого газа (применение сухих ступеней сжатия) и экономичности могут являться исследуемые в данной работе квазиизотермические тихоходные длинноходовые поршневые ступени. Особенностью тихоходных длинноходовых ступеней является пониженная скорость движения поршня (0,25...0,5 м/с) и вытянутая длина цилиндра (отношение хода поршня к диаметру цилиндра более 10). Данные конструктивные и режимные особенности позволяют максимально приблизить процесс сжатия к изотермическому и снизить влияние мёртвого объёма на производительность, что в свою очередь позволило достичь давления нагнетаемого газа в 10 МПа в одной ступени сжатия [10, 11].

Исследованию ресурса и способам его повышения за счёт применения перспективных материалов, оптимизации режимов работы вышеобозначенных узлов посвящены другие работы авторов данной статьи.

В данной работе уделено внимание исследованию возможного достижимого ресурса работы цилиндра поршневой ступени, поскольку проведен ряд исследований по уменьшению массогабаритных параметров за счёт уменьшения толщины стенки цилиндра. Так в работах [12, 13] предложена конструкция компрессорной ступени с давлением нагнетания до 10 МПа и конструкцией цилиндра с толщиной стенки 1,5 мм. Данное решение, по мнению авторов, безусловно, верное и подтверждено как теоретическими расчётами, так и экспериментально [13]. Однако совершенно не гарантирована работа поршневой ступени продолжительное время, поскольку исследования на ресурс работы цилиндра тихоходных длинноходовых поршневых ступеней до настоящего времени не проводились. Поскольку цилиндр является одним из основных элементов поршневой ступени его ресурс, как элемента общей системы должен обеспечить требуемый ресурс в 100 000 ч. В связи с особенностями функционирования тихоходных поршневых ступеней [14–16] цилиндр компрессора подвергается циклическим нагрузкам с периодом цикла от 2 до 4 секунд, частотой цикла $f = 0,25 - 0,5$ Гц. Долговечность цилиндра при работе в штатном режиме не должна быть ниже 100 000 часов, т.е. $9 \cdot 10^7 \dots 18 \cdot 10^7$ циклов. Таким образом, возможный вариант разрушения можно отнести к многоцикловой усталости (High-cycle fatigue). В случае такого нагруженного состояния значения возникающих напряжений имеют меньшее значение, чем предел текучести.

В связи с требованиями по минимизации массовых характеристик поршневой ступени наряду с обеспечением требуемого ресурса становится актуальной задача определения значения минимальной толщины цилиндра при обеспечении ресурса работы в 100 000 ч.

Объект исследования

Поршневая ступень: с давлением всасывания – 0,1 МПа, давлением нагнетания 12 МПа, время цикла 2...4 с, температура всасывания 293 К; : диаметр цилиндра 0,05 м; ход поршня 0,5 м; длина цилиндра – 0,55 м; толщина стенки цилиндра принималась 1,5, 2 и 3 мм.

Методика численных исследований

Разрушение материалов если рассматривать усталостный аспект, происходит при накоплении микроразрушений в исследуемом материале при нагружении повторяющейся циклической нагрузкой. При этом надо отметить, что максимальные допустимые напряжения, возникающие в материале, значительно должны быть ниже напряжений при постоянной нагрузке растяжения.

Таким образом задачу определения ресурса испытываемых деталей при циклически повторяющейся нагрузке можно решить либо способом определения коэффициента запаса усталостной прочности для детали без трещины, либо оценкой несущей способности конструкции при наличии трещины с известными формой и размерами [17, 18].

Суть способа определения коэффициента запаса усталостной прочности для детали без трещины основан на экспериментальном определении предела выносливости материалов σ_{-1} на стандартных гладких образцах без трещины и вычислении коэффициента запаса усталостной прочности n для заданного цикла (рис. 1) [18]:

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_{\sigma}}{\beta \varepsilon} \sigma_a + \psi_{\sigma} \sigma_m}, \quad (1)$$

где K_{σ} – эффективный коэффициент концентрации напряжений; β и ε – коэффициенты влияния поверхности и масштабного фактора; ψ_{σ} – коэффициент постоянных напряжений.

Пределом выносливости материала является амплитуда напряжений, при которой материал, не разрушаясь, выдерживает определенное число циклов N_{σ} (база испытаний), устанавливаемое опытным путем. Предел выносливости металла σ_{-1} возможно получить при использовании специальных машин [19–21]. Часто проводят испытания на изгиб имитируя симметричный цикл нагружения. На рис. 2 представлен пример схемы для реализации чистого изгиба.

Последовательно задавая значения напряжений σ_{\max} , получают соответствующее число циклов N , при которых произойдет разрушение испытываемого образца. Соответственно по этим данным можно построить некую кривую, характеризующую долговечность материала при определенном значении напряжения, которая называется кривой усталости (рис. 3).

Из полученного графика кривой видно, что уменьшение σ_{\max} приводит к росту числа циклов до разрушения N , при этом кривая асимптотически приближается к горизонтали с базовым числом циклов нагружения и конкретным напряжением при этом. В точке кривой выносливости, совпадающей с горизонтальной асимптотой, определяется предел выносливости σ_{-1} и базовое

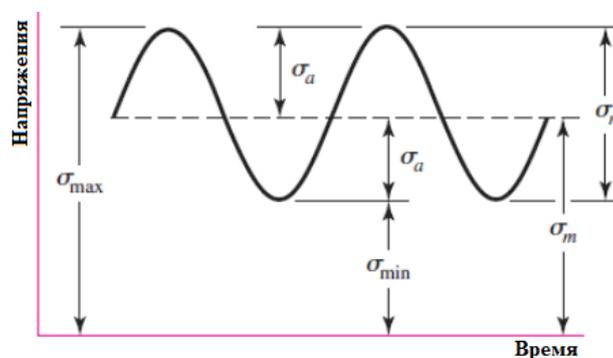


Рис. 1. Асимметричный цикл нагружения

Fig. 1. Asymmetric loading cycle

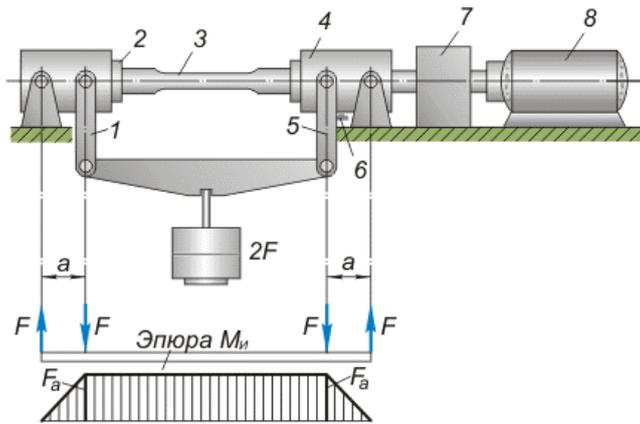


Рис. 2. Схема машины для испытания образцов при чистом изгибе: 1, 5 – серьги; 2, 4 – вращающиеся цанги; 3 – образец; 6 – контакт, фиксирующий разрушение; 7 – счетчик числа оборотов; 8 – двигатель

Fig. 2. Scheme of a machine for testing samples in pure bending: 1, 5 – earrings; 2, 4 – rotating collets; 3 – sample; 6 – contact, fixing the destruction; 7 – counter of the number of revolutions; 8 – engine

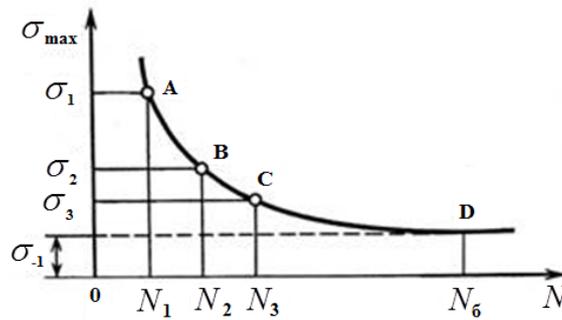


Рис. 3. Кривая усталости

Fig. 3. Fatigue curve

число циклов N_{σ} . Для различных материалов приняты различные базы испытаний; так, для стальных образцов $N_{\sigma} = 10^7$ циклов, а для цветных металлов 10^8 циклов и т. д.

На кривых усталости в общем случае можно выделить два участка (рис. 4). На первом участке уравнение кривой усталости имеет следующий вид

$$\sigma^m N = C, \quad (2)$$

где m, C – параметры материала.

На втором участке выполняется условие

$$\sigma_{-1}^m N_{\sigma} = \sigma^m N. \quad (3)$$

Уравнение (3) позволяет определить число циклов до разрушения для циклических напряжений превышающих предел выносливости.

В данной работе для анализа возможности усталостного разрушения (Stress-Life Approach) цилиндра компрессора применяется модуль расчета усталостной долговечности ANSYS Fatigue Module [21].

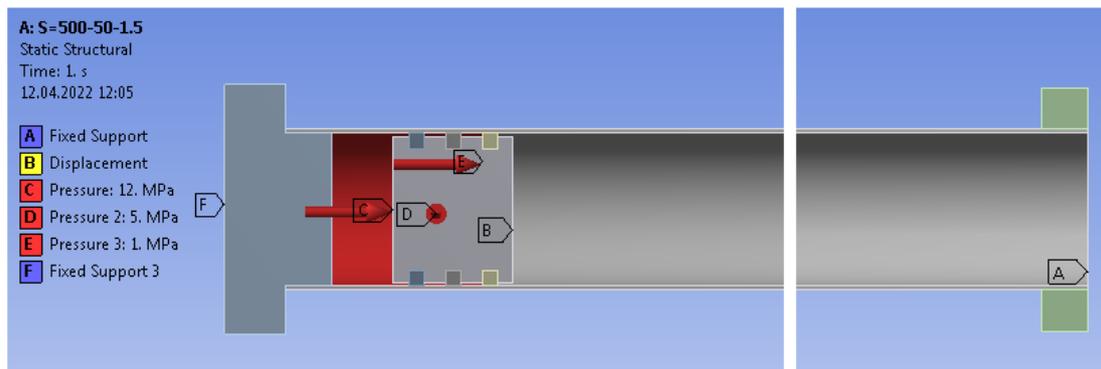


Рис. 4. Расчетная схема цилиндра компрессора в ANSYS Workbench
 Fig. 4. Calculation scheme of the compressor cylinder in ANSYS Workbench

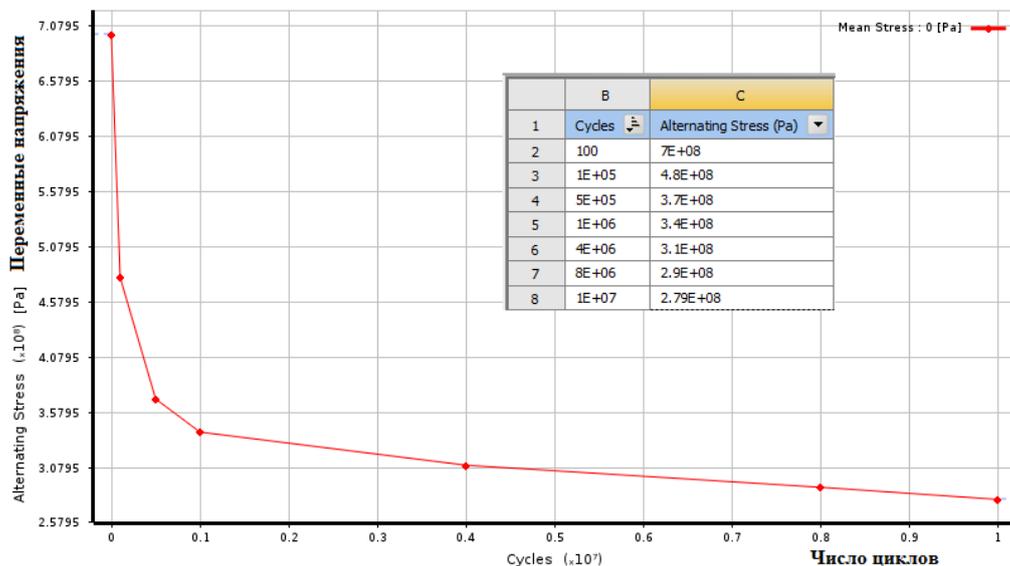


Рис. 5. Кривая усталости для стали 12X18H10T
 Fig. 5. Fatigue curve for steel 12Cr18Ni10Ti

Методика создания модели, задания нагружения и условий закрепления подробно представлены в работах [21].

На рис. 4 приведена расчетная схема цилиндра компрессора длиной 500 мм, диаметром 50 мм и толщиной стенки 1,5 мм. Наибольшее давление в зоне нагнетания 12 МПа.

Цилиндрическая оболочка компрессора изготовлена из стали 12X18H10T (легирующие элементы хром, никель, титан). Характеристики данного материала характеризующие его механические свойства следующие: $\sigma_{0,2} = 196$ МПа; $\sigma_g = 510$ МПа; $\delta = 40\%$.

Механические характеристики стали заданы в модуле Engineering Data. Усталостная кривая $\sigma-N$ задана как Property – S-N Curve по табличным данным (Tabular) на рис. 5.

Результаты

Исследовалось влияние толщины стенки цилиндра на его прочностные свойства. Для варианта толщины стенки 1,5 мм на рис. 6 показаны эквивалентные напряжения по Мизесу.

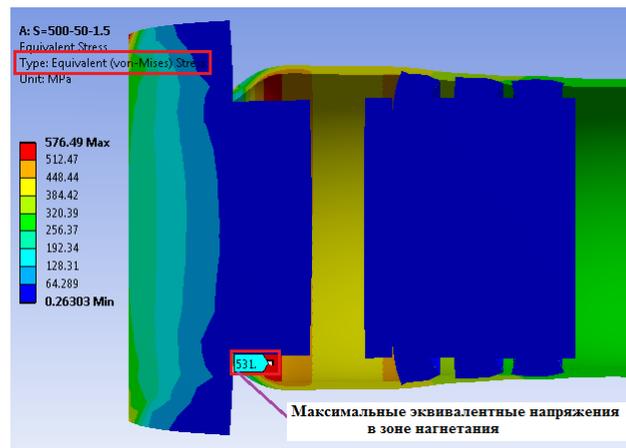


Рис. 6. Эквивалентные напряжения по Мизесу (von-Mises) при толщине 1,5 мм
Fig. 6. Equivalent stresses according to Mises (von-Mises) at a thickness of 1.5 mm

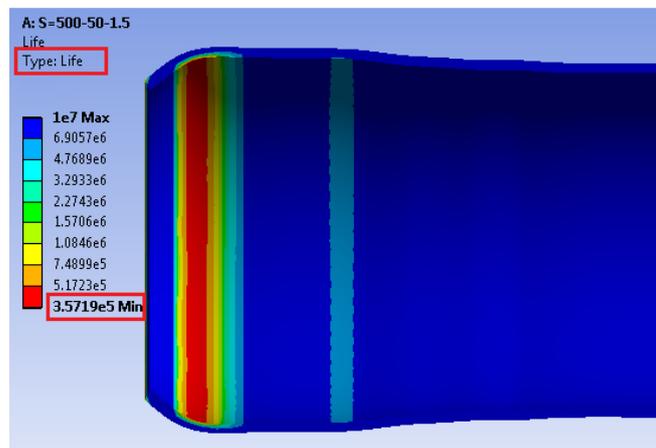


Рис. 7. Число циклов нагружения при толщине 1,5 мм
Fig. 7. Number of loading cycles with a thickness of 1.5 mm

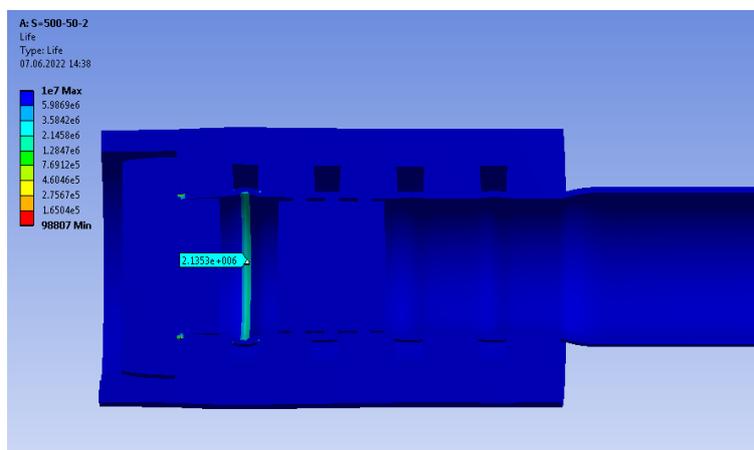


Рис. 8. Число циклов нагружения при толщине 2,0 мм
Fig. 8. Number of loading cycles at a thickness of 2.0 mm

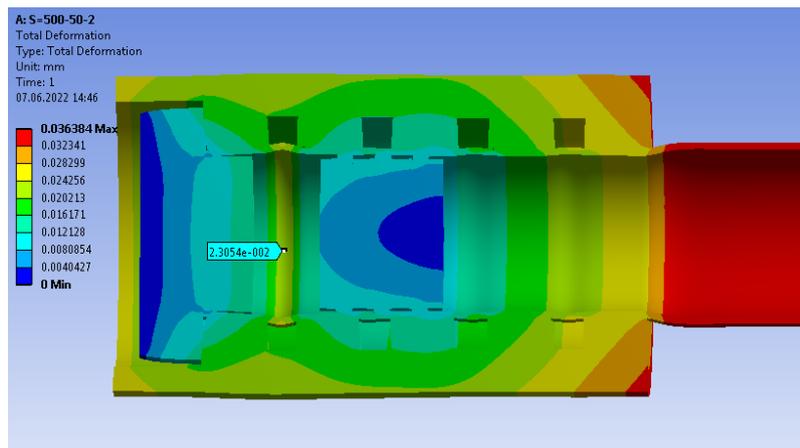


Рис. 9. Деформация цилиндра при толщине 2,0 мм

Fig. 9. Cylinder deformation at 2.0 mm thickness

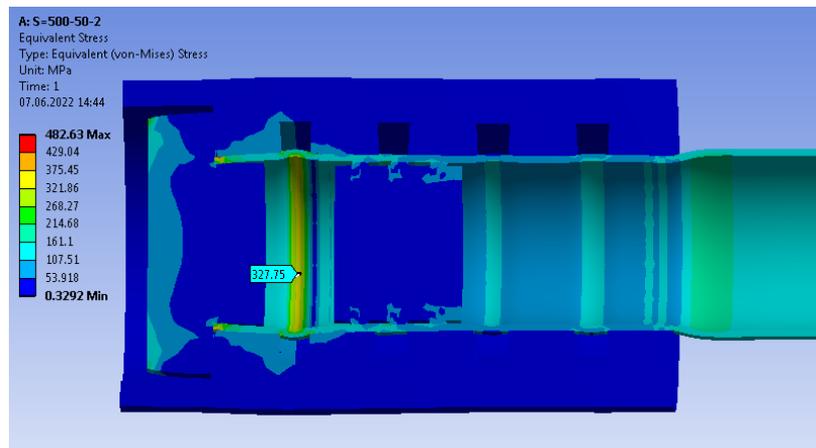


Рис. 10. Эквивалентные напряжения при толщине 2,0 мм

Fig. 10. Equivalent stresses at 2.0 mm thickness

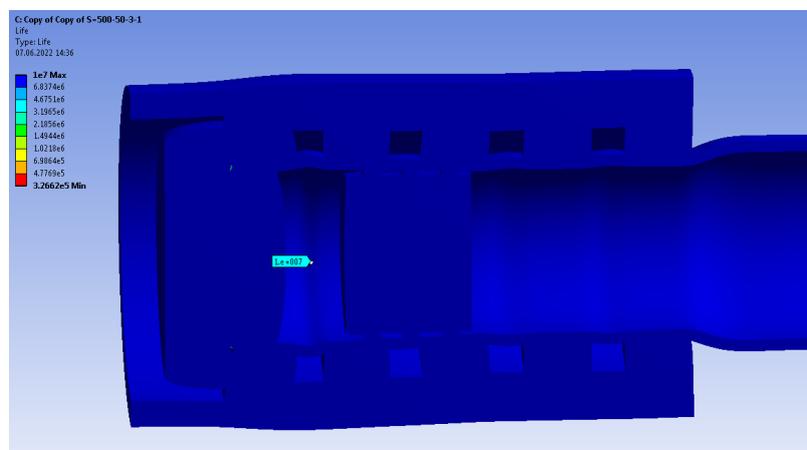


Рис. 11. Число циклов нагружения при толщине 3,0 мм

Fig. 11. Number of loading cycles at a thickness of 3.0 mm

Представленные на рис. 6,7 результаты показывают, что при толщине цилиндра 1,5 мм число циклов нагружения составляет ориентировочно 350 000, что соответствует времени непрерывной работы порядка 400 ч.

Представленные на рис. 8-10 результаты показывают, что при толщине цилиндра 2,0 мм число циклов нагружения составляет ориентировочно 2 130 000, что соответствует времени непрерывной работы порядка 2400 ч.

Представленные на рис. 11-13 результаты показывают, что при толщине цилиндра 3,0 мм число циклов нагружения достигает критического уровня в 10 000 000, что соответствует “бесконечному” времени непрерывной работы, что может быть проиллюстрировано графиком, изображённым на рис. 14.

На рис. 14 видно, что для конкретных условий работы ступени есть толщина стенки, в данном случае около 3 мм, превышать которую не имеет смысла, поскольку это не даст прибавление в ресурсе, а лишь утяжелит ступень. Это показывает линия 1. Также линия 2 показывает изменение относительной массы цилиндра m_0 (отношение массы цилиндра при произвольной толщине

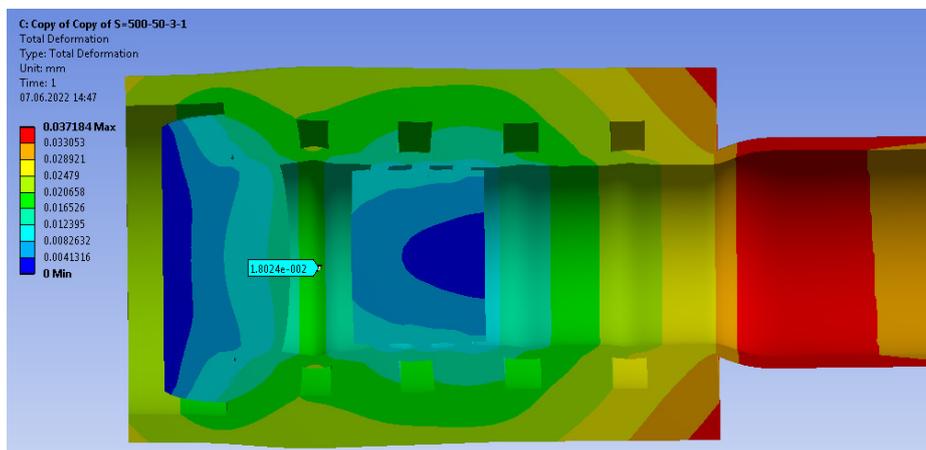


Рис. 12. Деформация цилиндра при толщине 3,0 мм

Fig. 12. Cylinder deformation at 3.0 mm thickness

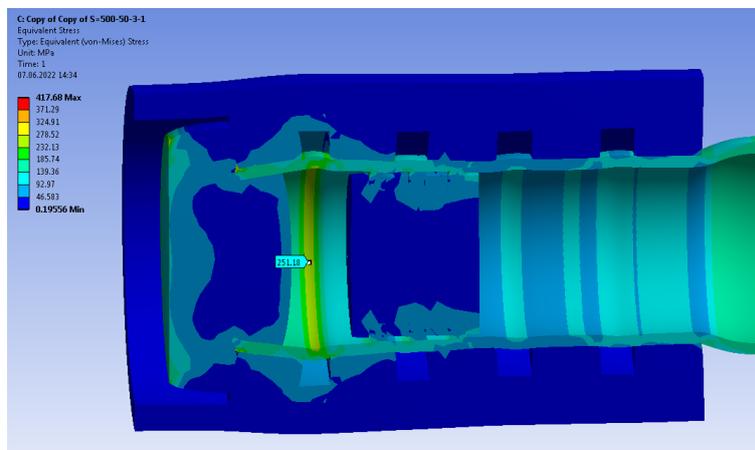


Рис. 13. Эквивалентные напряжения при толщине 3,0 мм

Fig. 13. Equivalent stresses at 3.0 mm thickness

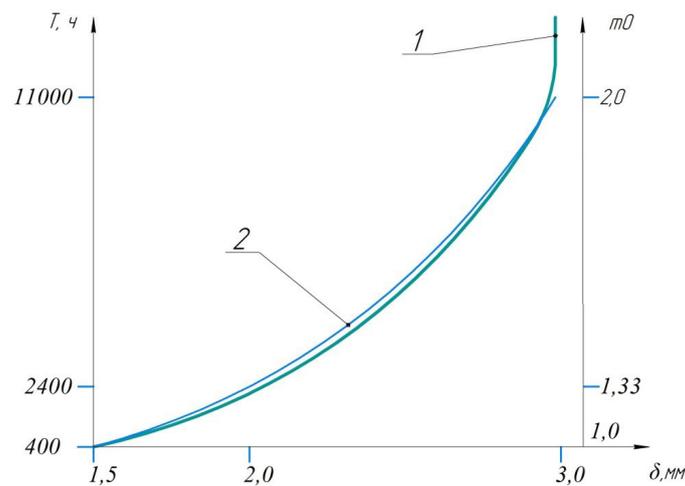


Рис. 14. Зависимость ресурса ступени (1) и относительной массы (2) от толщины стенки

Fig. 14. Dependence of the step resource (1) and relative mass (2) on the wall thickness

стенке к массе при толщине стенки равной 1,5 мм). Таким образом, в зависимости от требуемого ресурса при данных условиях работы экономия массы может составлять до двух раз.

Выводы

Проведённые исследования на основе экспериментально полученной кривой усталости для стали 12Х18Н10Т позволили дать рекомендации по проектной толщине цилиндра малорасходной поршневой тихоходной ступени в зависимости от требуемого ресурса при давлении нагнетания 12 МПа. При поставленной цели с достижением ресурса в 100 000 ч толщина цилиндра должна быть 3 мм, это также позволит создать машину с минимальными массогабаритными параметрами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Kotlov A.A.** Calculation and Selection of Parameters of the Ring Valve of Reciprocating Compressors // AIP Conference Proceeding. 2019. Vol. 2141. 030020. DOI: 10.1063/1.5122070
- [2] **Mistry H., Bhakta A., Dhar S. [et al.]**. Capturing valve dynamics in reciprocating compressors through computational fluid dynamics // In 21st International Compressors Engineering Conference at Purdue. 2017. 1210
- [3] **Никищенко С.Л.** Насосы и компрессоры для нефтегазовой отрасли [Текст] / С.Л. Никищенко, С. Киреев, М. Корчаргина. – Германия: LAP (Lambert Academic Publishing), 2020. – С. 240.
- [4] **Страус В.** Промышленная очистка газов / В. Страус. – М.: Химия, 1981. – С. 616.
- [5] Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе, Санкт Петербург: Гидрометеоздат, 2018. – 23 с.
- [6] **Байков И.Р.** Диагностирование технического состояния поршневых компрессоров / И.Р. Байков, С.В. Китаев, Ш.З. Файрушин // Журнал энергобезопасность и энергосбережение – Московский институт энергобезопасности и энергосбережения, 2015. – № 3 (63). – С. 28–30.
- [7] Космонавтике необходима свобода [Электронный ресурс]: ведомости/ – Электрон. газета. – 30.10.2015. – режим доступа: <https://www.vedomosti.ru/opinion/articles/2015/12/01/619005-kosmonavtike-svoboda> (дата обращения: 24.06.2022).

[8] Инновационное решение [Электронный ресурс]: Технический журнал / – Технический журнал SKF «Evolution» – 4.01.2017. – режим доступа: <https://evolution.skf.com/ru/%D0%B8%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B5-%D1%80%D0%B5%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5/> (дата обращения: 22.06.2022).

[9] Долговечность подшипников [Электронный ресурс]: Подшипники России / сайт. – Электронные данные. – 07.08.2013. – режим доступа: <http://samir.ru/2013/08/dolgovechnost-podshipnikov> (дата обращения: 25.06.2022).

[10] **Бусаров С.С., Юша В.Л.** Перспективы создания малорасходных компрессорных агрегатов среднего и высокого давления на базе унифицированных тихоходных длинноходовых ступеней // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2018. – Т. 24, № 4. – С. 80–89.

[11] **Недовенчаный А.В.** Теоретическая оценка влияния интенсивности внешнего охлаждения цилиндра на рабочий процесс холодильного малорасходного длинноходового компрессора / А.В. Недовенчаный, Н.Ю. Федосеева, Е.В. Постовой; ОмГТУ // Техника и технология современного нефтехимического и нефтегазового производства : материалы 4-й Междунар. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов, студентов, творч. молодежи профил. предприятий и орг., учащихся ст. кл. – Омск, 2014. – С. 105–107.

[12] **Titov D.S., Busarov S.S., Busarov I.S.** Analysis of temperature effect on deformation of low-speed compressor unitstage cylinder // AIP Conference Proceedings . – 2019. – p. 030002-1–030002-7. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1063/1.5122052>

[13] **Титов Д.С.** Улучшение массогабаритных характеристик поршневых тихоходных длинноходовых компрессорных ступеней за счёт рациональной организации системы охлаждения // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф. – 2021. – С. 53.

[14] **Busarov S.S., Yusha V.L., Den'gin V.G., Karagusov V.I.** Theoretical analysis of the working process of the superlow rotary low expense piston compressor with the increased piston stroke, 8th International Conference on Compressors and Coolants, 2013, Papiernicka, Slovakia. Book of abstracts. – p. 22.

[15] **Кобыльский Р.Э.** Применение комбинированного уплотнения для снижения нагрузки, действующей на цилиндропоршневое уплотнение // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 117–125. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-117-125

[16] **Busarov S.S., Yusha V.L., Gromov A.Yu.** Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure Single-Stage Piston Compressor Units // Chemical and petroleum engineering. 2017. Vol. 53 (7–8). P. 453–458. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0362-2>

[17] **Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М.** Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. М.: Машиностроение, 1975, с. 488.

[18] **Вансович К.А., Аистов И.П., Зеньков Е.В.** Применение упругопластической модели роста усталостных трещин для расчета остаточного ресурса ступенчатых валов // В сборнике: Проблемы машиноведения. Материалы III Международной научно-технической конференции. 2019. С. 62–69.

[19] **Гарпов Т.Т., Golobokov M.G.** Structural analysis and classification of a device for converting rotary motion into reciprocating and vice versa // News of the State Agrarian University. 2013. No. 502. p. 186–189.

[20] **Balakin P.D., Belkov V.N., Zgonnik I.P.** Analog of crosshead drive of piston machines // Dynamics of systems, mechanisms and machines. 2018. Vol. 6, No. 1. Pp. 7–10.

[21] **Аистов И.П., Вансович К.А.** Оценка нагруженного состояния цилиндра ступени тихоходного поршневого агрегата с учетом температурного воздействия / В сборнике: Проблемы машиноведения. Материалы III Международной научно-технической конференции. 2019. С. 8–14.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БУСАРОВ Сергей Сергеевич – доцент, Омский государственный технический университет, канд. техн. наук.
E-mail: bssi1980@mail.ru

ВАНСОВИЧ Константин Александрович – доцент, Омский государственный технический университет, без степени.
E-mail: vansovichka@mail.ru

REFERENCES

- [1] **A.A. Kotlov**, Calculation and Selection of Parameters of the Ring Valve of Reciprocating Compressors // AIP Conference Proceeding. 2019. Vol. 2141. 030020. DOI: 10.1063/1.5122070
- [2] **H. Mistry, A. Bhakta, S. Dhar [et al.]**, Capturing valve dynamics in reciprocating compressors through computational fluid dynamics // In 21st International Compressors Engineering Conference at Purdue. 2017. 1210
- [3] **S.L. Nikishenko**, Nasosy i kompressory dlya neftegazovoy otrasli [Tekst] / S.L. Nikishenko, S. Kireyev, M. Korchagina. – Germaniya: LAP (Lambert Academic Publishing), 2020. – S. 240.
- [4] **V. Straus**, Promyshlennaya ochestka gazov / V. Straus. – M.: Khimiya, 1981. – С. 616.
- [5] Metody raschetov rasseivaniya vybrosov vrednykh (zagryaznyayushchikh) veshchestv v atmosfernom vozdukh, Sankt Peterburg : Gidrometeoizdat, 2018. – 23 s.
- [6] **I.R. Baykov**, Diagnostirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya porshnevykh kompressorov / I.R. Baykov, C.B. Kitayev, Sh.Z. Fayrushin // Zhurnal energobezopasnost i energosberezheniye – Moskovskiy institut energobezopasnosti i energosberezheniya, 2015. – № 3 (63). – S. 28–30.
- [7] Kosmonavtike neobkhodima svoboda [Elektronnyy resurs]: vedomosti/ – Elektron. gazeta. – 30.10.2015. – rezhim dostupa: <https://www.vedomosti.ru/opinion/articles/2015/12/01/619005-kosmonavtike-svoboda> (data obrashcheniya: 24.06.2022).
- [8] Innovatsionnoye resheniye [Elektronnyy resurs]: Tekhnicheskii zhurnal/ – Tekhnicheskii zhurnal SKF «Evolution» – 4.01.2017. – rezhim dostupa: <https://evolution.skf.com/ru/%D0%B8%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B5-%D1%80%D0%B5%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5/> (data obrashcheniya: 22.06.2022).
- [9] Dolgovechnost podshipnikov [Elektronnyy resurs]: Podshipniki Rossii / sayt. – Elektronnyye dannyye. – 07.08.2013. – rezhim dostupa: <http://samip.ru/2013/08/dolgovechnost-podshipnikov> (data obrashcheniya: 25.06.2022).
- [10] **S.S. Busarov, V.L. Yusha**, Perspektivy sozdaniya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov srednego i vysokogo davleniya na baze unifitsirovannykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh stupeney // Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. – 2018. – T. 24, № 4. – S.80–89.
- [11] **A.V. Nedovenchanyy**, Teoreticheskaya otsenka vliyaniya intensivnosti vneshnego okhlazhdeniya tsilindra na rabochiy protsess kholodilnogo maloraskhodnogo dlinnokhodovogo kompressora / A.V. Nedovenchanyy, N.Yu. Fedoseyeva, Ye.V. Postovoy; OmGTU// Tekhnika i tekhnologiya sovremennogo neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva : materialy 4-y Mezhdunar. nauch.–tekhn. konf. aspirantov, magistrantov, studentov, tvorch. molodezhi profil. predpriyatii i org., uchashchikhsya st. kl. – Omsk, 2014. – S. 105–107.
- [12] **D.S. Titov, S.S. Busarov, I.S. Busarov**, Analysis of temperature effect on deformation of low-speed compressor unitstage cylinder // AIP Conference Proceedings . – 2019. – p. 030002-1–030002-7. – Rezhim dostupa: <https://doi.org/10.1063/1.5122052>

- [13] **D.S. Titov**, Uluchsheniye massogabaritnykh kharakteristik porshnevykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh kompressornykh stupeney za schet ratsionalnoy organizatsii sistemy okhlazhdeniya // *Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva: materialy 11-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* – 2021. – S. 53.
- [14] **S.S. Busarov, V.L. Yusha, V.G. Den'gin, V.I. Karagusov**, Theoretical analysis of the working process of the superlow rotary low expense piston compressor with the increased piston stroke, 8th International Conference on Compressors and Coolants, 2013, Papiernicka, Slovakia. Book of abstracts. – p. 22.
- [15] **R.E. Kobylskiy**, Primeneniye kombinirovannogo uplotneniya dlya snizheniya nagruzki, deystvuyushchey na tsilindroporshnevoye uplotneniye // *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2022. № 7. S. 117–125. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-117-125
- [16] **S.S. Busarov, V.L. Yusha, A.Yu. Gromov**, Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure Single-Stage Piston Compressor Units // *Chemical and petroleum engineering*. 2017. Vol. 53(7–8). P. 453–458. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0362-2>
- [17] **S.V. Serensen, V.P. Kogayev, R.M. Shneyderovich**, Nesushchaya sposobnost i raschety detaley mashin na prochnost. M.: Mashinostroyeniye, 1975, s. 488.
- [18] **K.A. Vansovich, I.P. Aistov, Ye.V. Zenkov**, Primeneniye uprugoplasticheskoy modeli rosta ustalostnykh treshchin dlya rascheta ostatochnogo resursa stupenchatykh valov // *V sbornike: Problemy mashinovedeniya. Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. 2019. S. 62–69.
- [19] **T.T. Gappoev, M.G. Golobokov**, Structural analysis and classification of a device for converting rotary motion into reciprocating and vice versa // *News of the State Agrarian University*. 2013. No. 502. p. 186–189.
- [20] **P.D. Balakin, V.N. Belkov, I.P. Zgonnik**, Analog of crosshead drive of piston machines // *Dynamics of systems, mechanisms and machines*. 2018. Vol. 6, No. 1. p. 7–10.
- [21] **I.P. Aistov, K.A. Vansovich**, Otsenka nagruzhennogo sostoyaniya tsilindra stupeni tikhokhodnogo porshnevoogo agregata s uchetom temperaturnogo vozdeystviya / *V sbornike: Problemy mashinovedeniya. Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. 2019. S. 8–14.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sergey S. BUSAROV – *Omsk State Technical University*.
E-mail: bssi1980@mail.ru

Konstantin A. VANSOVICH – *Omsk State Technical University*.
E-mail: vansovichka@mail.ru

Поступила: 21.07.2022; Одобрена: 04.08.2022; Принята: 09.08.2022.
Submitted: 21.07.2022; Approved: 04.08.2022; Accepted: 09.08.2022.

Научная статья

УДК 621.315.1

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28303>



*А.М. Гулов*¹ ✉, *А.В. Колычев*¹, *А.В. Косоруков*²

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

² АО «Ленгидропроект», Санкт-Петербург, Россия

✉ algu1ov@yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ОПН НА УЧАСТКАХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 110 КВ БЕЗ ГРОЗОЗАЩИТНОГО ТРОСА

Аннотация. Применение ОПН на воздушных линиях вместо грозозащитного троса является распространенной практикой. Опыт эксплуатации показывает, что на таких линиях увеличивается количество повреждений защитных аппаратов. Для предотвращения выхода ОПН из строя вследствие прямого удара молнии важно верно выбрать класс пропускной способности. Поэтому актуальным остается изучение энергетических характеристик ОПН. В статье рассматривается частный случай пересечения двух воздушных линий, когда с нижней линии снимается трос в пролете пересечения. На верхних фазах опор по краям пролета пересечения устанавливаются ОПН. В ходе исследования определены зависимости величины энергии, рассеиваемой ОПН, от параметров импульса тока молнии (фронт, амплитуда) и параметров ВЛ (сопротивление заземления опор, количество изоляторов в гирлянде).

Ключевые слова: воздушная линия, ОПН, молниезащита, АТР, энергоемкость.

Для цитирования:

Гулов А.М., Колычев А.В., Косоруков А.В. Влияния легирующих элементов на структуру и свойства композиционных материалов на основе алюминия с углеродными наночастицами // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 3. С. 31–40. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28303>



A.M. Gulov¹ ✉, A.V. Kolychev¹, A.V. Kosorukov²

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

² JSC «Lenhydroproject», St. Petersburg, Russia

✉ algu1ov@yandex.ru

THE USE OF SURGE ARRESTERS ON SECTIONS OF 110 KV OVERHEAD LINES WITHOUT A GROUND WIRE

Abstract. The use of surge arresters on overhead lines instead of ground wire is a common practice. Operational experience shows that the number of damaged protective devices increases on such lines. It's important to choose the right energy discharge capability to prevent the failure of surge arresters due to a lightning strike. Therefore, the study of the energy characteristics of surge arresters remains relevant. The article considers a special case of the intersection of two overhead lines. In that situation ground wire is removed from the lower line in the intersection span. Surge arresters are installed on the upper phases in that span. The amount of surge arrester discharge energy was determined as a function of the parameters of the lightning current pulse and the parameters of the overhead line. The following values were varied: the front and amplitude of the lightning current pulse, the tower footing resistance, the number of insulators in the string.

Keywords: transmission line, surge arrester, lightning protection, ATP, discharge energy.

Citation:

A.M. Gulov, A.V. Kolychev, A.V. Kosorukov, The use of surge arresters on sections of 110 kV overhead lines without a ground wire, *Global Energy*, 28 (03) (2022) 31–40, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28303>

Введение. Проблемы молниезащиты воздушных линий и обеспечения бесперебойной подачи электроэнергии остаются актуальными и сегодня. Одним из особенно важных вопросов является защита участка пересечения воздушных линий. Необходимо предотвратить тяжелые аварии в случае грозового перекрытия с верхней линии на нижнюю линию электропередачи. Такие перекрытия могут вызвать ложную работу релейной защиты и системные аварии, а также повреждение электрооборудования линий более низкого напряжения. Наибольшую опасность представляет удар молнии в пролет пересечения. Расстояние между проводами пересекающихся линий в этом пролете должно быть достаточно большим. Поэтому в пролете пересечения целесообразно снять грозозащитный трос с нижней линии и выбрать точку пересечения дальше от середины пролета верхней линии [1].

Чтобы компенсировать отсутствие троса в пролете пересечения на верхних фазах крайних опор пролета устанавливаются ограничители перенапряжения нелинейные (ОПН). Применение ОПН в качестве альтернативного средства молниезащиты ВЛ рассматривается в ряде работ отечественных и зарубежных авторов [2–7]. Возникает вопрос является ли установка ОПН на верхних фазах достаточной для обеспечения надежной работы линии. Важно выбрать ОПН достаточной энергоемкости, так как наибольшие энергетические воздействия на ОПН возникают при ударах молнии в фазные провода [8, 9]. Отсутствие грозозащитного троса на нижней линии в пролете пересечения увеличивает вероятность попадания молнии в верхний фазный провод данной ВЛ.

Наиболее тяжелым случаем с точки зрения энергетических нагрузок на ОПН будет удар молнии в фазный провод на близком расстоянии от опоры. В этом случае ток молнии будет распределяться неравномерно между ограничителями, установленными по краям пролета.

Целью исследования является определение зависимости величины энергии, рассеиваемой ОПН, от параметров импульса тока молнии и параметров ВЛ. Прежде всего будут варьироваться следующие величины: фронт и амплитуда импульса тока молнии, сопротивление заземления опор.

Метод исследования

Расчеты энергии проводились при помощи программного комплекса АТР, в котором была составлена модель участка двухцепной ВЛ. На рис. 1 изображена схема исследуемой двухцепной ВЛ 110 кВ. Рассматривается участок линии из 4 металлических опор с пролетом длиной 300 м. Грозозащитный трос отсутствует в пролете между опорами О2 и О3. Пораженным ударом молнии считается верхний фазный провод ближе к опоре О2. В расчетах используется ОПН 3-го класса пропускной способности с удельной энергией 5,75 кДж/кВ, так как рассматривается случай, когда на ОПН оказываются наибольшие энергетические воздействия.

Результаты

С точки зрения исследования энергоемкости ОПН наибольший интерес представляет случай прямого удара молнии в фазный провод. Величина волнового сопротивления провода значительно превосходит сопротивление заземляющего устройства опоры, поэтому при ударе молнии в фазный провод через ОПН установленный на соседней цепи ВЛ ток молнии практически не протекает. Т.е. отсутствует эффект распределения энергии между ограничителями первой и второй цепей ВЛ. На энергию, выделяемую в ОПН, прямое влияние оказывает перекрытие изоляции незащищенных фаз [10]. С точки зрения перекрытия изоляции в наибольшей опасности находятся гирлянды верхних фаз на соседних с бестросовым пролетом опорах (О1 и О4 на рис. 2). Необходимо проследить влияние электрической прочности изоляции ВЛ, поэтому расчеты проводятся для поддерживающей гирлянды из 6 изоляторов, а затем для гирлянды из 9 изоляторов.

Важным параметром при исследовании молниезащиты ВЛ является сопротивление заземления опор, чему уделено внимание в работах [11–13]. Для более наглядного сравнения влияния

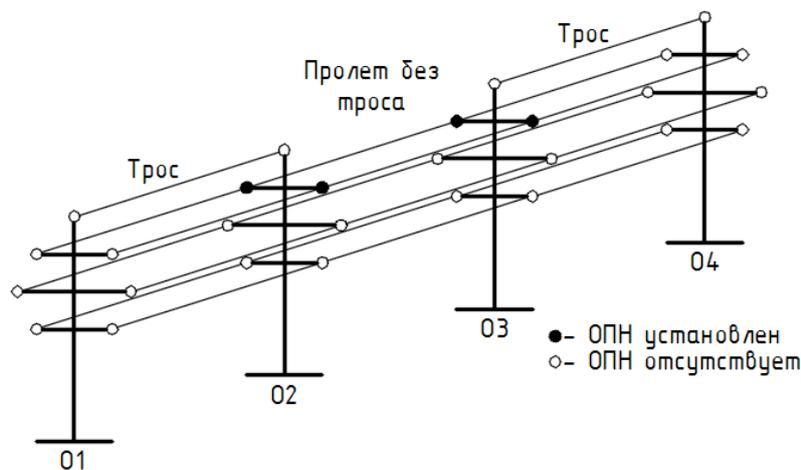
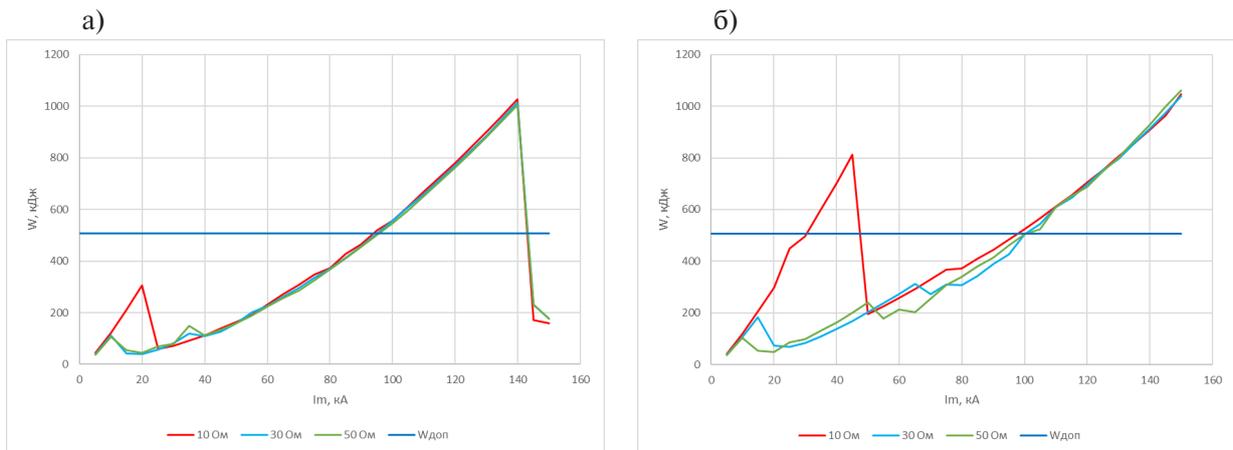


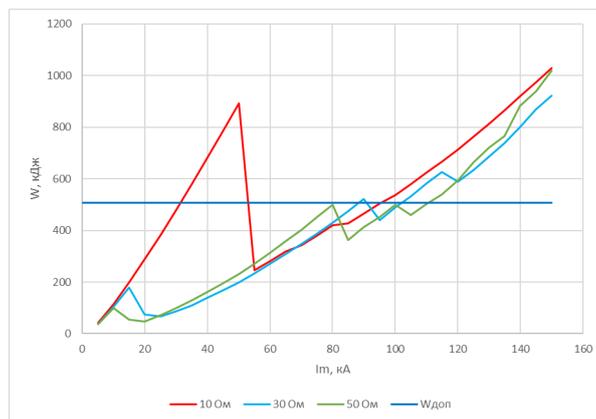
Рис. 1. Схема исследуемой ВЛ 110 кВ

Fig. 1. Model of 110 kV transmission line



Энергия через ОПН
на опоре О2 для фронта 1/100 мкс

Энергия через ОПН
на опоре О2 для фронта 5/100 мкс



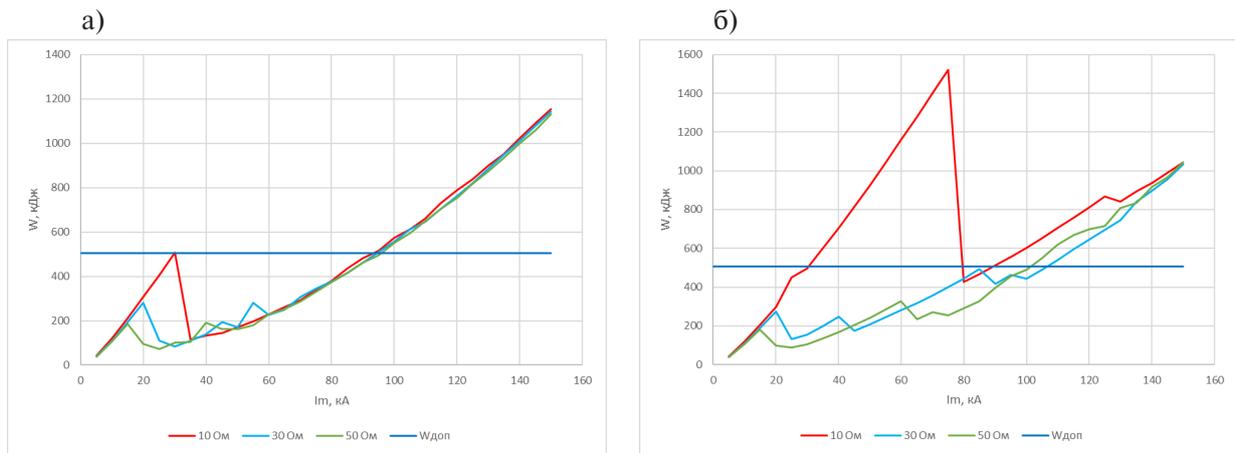
Энергия через ОПН на опоре О2 для фронта 10/100 мкс

Рис. 2. Зависимость энергии, выделяемой в ОПН на пораженной цепи, от амплитуды тока молнии
Fig. 2. Surge arrester discharge energy as a function of the lightning current magnitude for the struck circuit

сопротивления ЗУ опор на рис. 2 представлены зависимости энергии, рассеиваемой в ОПН, для одинаковых фронтов, но разных сопротивлений ЗУ опор.

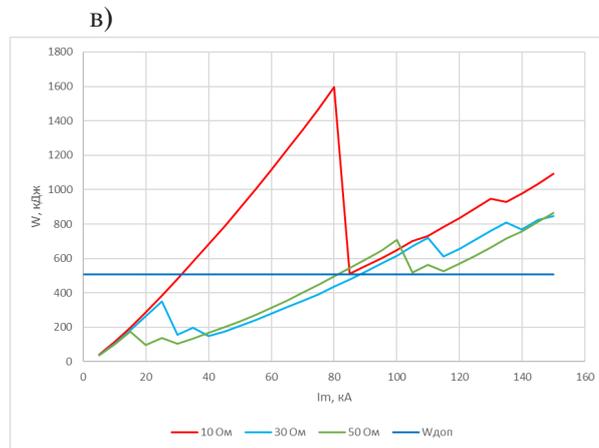
С увеличением амплитуды импульса тока молнии растет и энергия, выделяемая в ОПН. Как видно из рис. 2 для малого сопротивления заземления опор 10 Ом рост энергии имеет выраженно «зубчатый» характер, при некотором токе молнии величина энергии начинает уменьшаться. Это связано с перекрытиями изоляции ВЛ и соответствующим уменьшением энергии, выделяемой в ограничителях. При пологих фронтах (более 5 мкс) перекрытие изоляции ВЛ происходит позже, поэтому энергия успевает превысить допустимую для ОПН 3-го класса пропускной способности.

При расположении пересечения ВЛ на территориях с плохо проводящим грунтом (высокое удельное сопротивление грунта и сопротивление заземления опор) – характер роста энергии, выделяемой в ОПН, менее резкий. Это связано с перекрытиями изоляции незащищенных фаз ВЛ, которые происходят при меньших значениях амплитуды импульса тока молнии вследствие повышенного сопротивления грунта.



Энергия через ОПН
на опоре О2 для фронта 1/100 мкс

Энергия через ОПН
на опоре О2 для фронта 5/100 мкс



Энергия через ОПН на опоре О2 для фронта 10/100 мкс

Рис. 3. Зависимость энергии, выделяемой в ОПН на пораженной цепи, от амплитуды тока молнии (для ВЛ с 9 изоляторами в гирлянде)

Fig. 3. Surge arrester discharge energy as a function of the lightning current magnitude for the struck circuit (for 9 insulators in the string)

Таким образом, влияние величины фронта на энергию наиболее выражено для малых значений удельного сопротивления грунта и сопротивления ЗУ опор. После перекрытия изоляции ВЛ влияние величины сопротивления ЗУ минимально.

Аналогичные расчеты были проведены для ВЛ 110 кВ с девятью изоляторами в гирлянде. Увеличение электрической прочности линейной изоляции напрямую способствует снижению количества перекрытий, вызванных ударом молнии. Это в свою очередь приводит к увеличению энергетических нагрузок на ОПН. Таким образом расширяется диапазон опасных сочетаний фронт/амплитуда импульса тока молнии при которых может произойти повреждение ограничителя.

На рис. 3 представлены зависимости энергии для одинаковых фронтов, но разных сопротивлений.

Таким образом при благоприятном сочетании условий эксплуатации ВЛ (малое удельное сопротивление грунта) и характеристик импульса тока молнии наблюдается превышение допусти-

мой энергии для ОПН 3-го класса пропускной способности. Чем выше электрическая прочность линейной изоляции, тем больше вероятность появления такого сочетания характеристик импульса и сопротивления ЗУ опор, при котором будет поврежден ОПН.

При тяжелых условиях эксплуатации ВЛ (высокое удельное сопротивление грунта), повреждение рассматриваемого ОПН вследствие превышения допустимой энергии возможно только при высоких значениях амплитуды импульса тока молнии (значение варьируется в зависимости от характеристик импульса, электрической прочности изоляции и сопротивления ЗУ опор).

Установка дополнительных ОПН

Общий подход к выбору схемы защиты основывается на технико-экономическом сравнении различных вариантов. В конечном счете, выбор той или иной схемы защиты представляет собой компромисс между надежностью защиты, с одной стороны, и затратами на ее реализацию, с другой стороны [14].

Для защиты ВЛ от обратных перекрытий в случае высокого сопротивления ЗУ опор наиболее распространенной является установка дополнительных ОПН на нижних фазах [15, 16]. Рассмотрим такой вариант схемы расстановки применительно к нашему случаю (рис. 4).

Так как с точки зрения энергоемкости ОПН наиболее тяжелые условия наблюдаются на ВЛ с усиленной изоляцией, то в дальнейшем будем рассматривать линию с гирляндами из 9 изоляторов.

В качестве примера на рис. 5 представлены результаты расчетов с двумя схемами расстановки ОПН для импульсов тока молнии с фронтами 1 и 10 мкс и сопротивлением ЗУ опор 30 Ом.

Таким образом установка дополнительных ОПН на нижние фазы не вносит существенного влияния на энергетическую нагрузку ОПН на верхних фазах при ударе молнии в провод. Во-первых, защита нижних фаз опор по краям пролета без троса не влияет на защищенность верхних фаз соседних опор, в следствии перекрытия которых уменьшается энергия, рассеиваемая ОПН. Во-вторых, участие ОПН нижних фаз в распределении энергии между аппаратами незначительно из-за большого волнового сопротивления провода, как и в случае ОПН на соседней цепи, описанном выше. Эти условия приводят к слабому влиянию данной расстановки ОПН на энергетическую нагрузку ОПН верхних фаз.

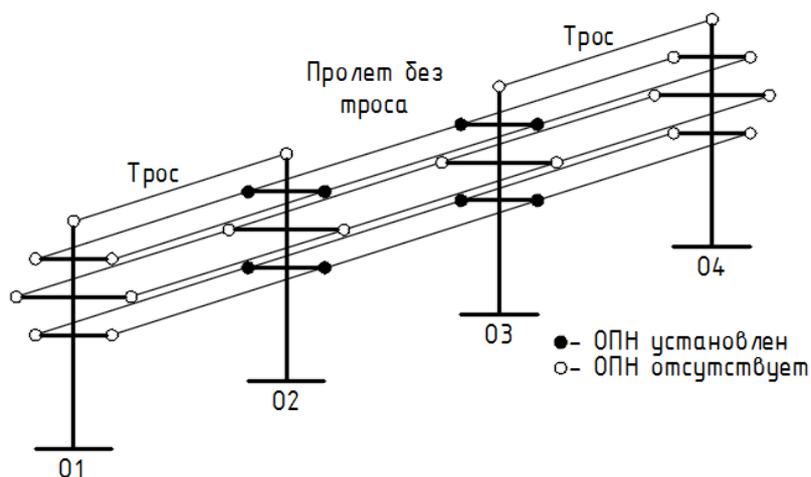
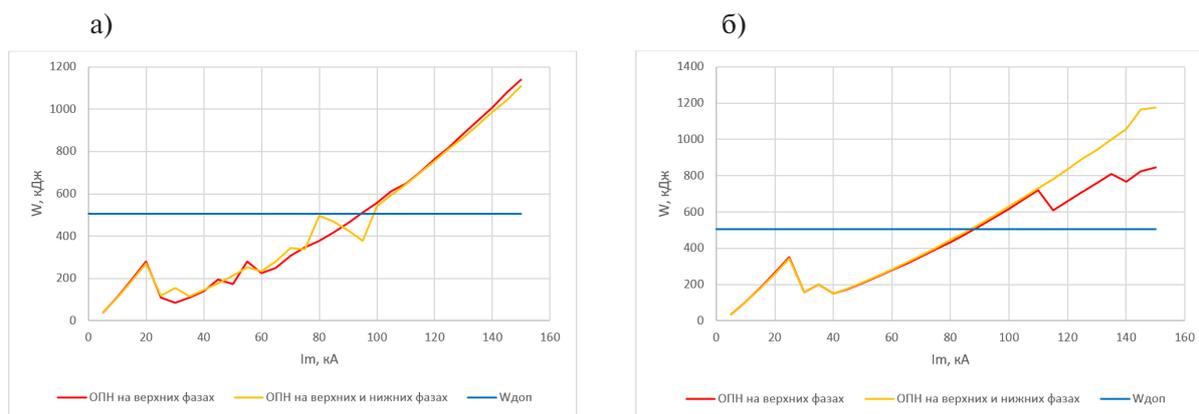


Рис. 4. Схема исследуемой ВЛ 110 кВ с ОПН на верхних и нижних фазах
 Fig. 4. Model of 110 kV transmission line with additional surge arresters



Энергия через ОПН верхней фазы на опоре O2 для фронта 1/100 мкс

Энергия через ОПН верхней фазы на опоре O2 для фронта 10/100 мкс

Рис. 5. Зависимость энергии, выделяемой в ОПН на пораженной цепи, от амплитуды тока молнии (9 изоляторов). ОПН на верхних и нижних фазах

Fig. 5. Surge arrester discharge energy as a function of the lightning current magnitude for the struck circuit (for 9 insulators in the string). Surge arresters in the upper and lower phases

При использовании данной схемы расстановки для ВЛ с малым сопротивлением ЗУ опор «зубчатый» характер роста энергии сохраняется и не имеет значительных расхождений по форме с результатами, полученными ранее.

Выводы

С точки зрения энергетических характеристик удар молнии в фазный провод является тяжелым случаем для ОПН.

Установка ОПН на верхних фазах крайних опор пролета не способна обеспечить надежную эксплуатацию ВЛ в случае удара молнии в бестросовый пролет.

Влияние величины фронта на энергию наиболее выражено для малых значений удельного сопротивления грунта и сопротивления ЗУ опор.

Выявлена возможность повреждения ОПН 3-го класса пропускной способности вследствие превышения допустимой энергии, особенно при малом удельном сопротивлении грунта, когда перекрытие изоляции происходит только при больших токах молнии. Чем выше электрическая прочность линейной изоляции, тем больше вероятность появления такого сочетания характеристик импульса тока молнии и сопротивления ЗУ опор, при котором будет поврежден ОПН.

При высоком удельном сопротивлении грунта, повреждение рассматриваемого ОПН вследствие превышения допустимой энергии возможно только при высоких значениях амплитуды импульса тока молнии.

Установка дополнительных ОПН на нижние фазы не вносит существенного влияния на энергетическую нагрузку ОПН на верхних фазах при ударе молнии в провод.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Гумерова Н.И., Колычев А.В., Халилов Ф.Х. Молниезащита электрических сетей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения. СПб: Издательство Политехнического университета, 2011. 369 с.

- [2] **Халилов Ф.Х., Котляров Э.Р.** Отказ от тросовых молниеотводов и трубчатых разрядников на воздушных линиях 35-150 кВ в районах Крайнего Севера // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2015. № 2(219). С. 41–47.
- [3] **Nor Hassan N.H., Abu Bakar A.H., Ilias H.A., Abd Halim S., Mokhlis H., Terzija V.** Analysis of discharge energy on surge arrester configurations in 132 kV double circuit transmission lines // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 2019. (139). P. 103–111.
- [4] **Banjanin M.** Line arresters and underbuilt wire application in lightning protection of 110 kV and 220 kV overhead transmission lines // 2019 18th International Symposium INFOTEN-JAHORINA, INFOTEN 2019 – Proceedings. 2019. P. 20–22.
- [5] **Visacro S., Silveira F.H., Vale M.H.M., Pomar G.D.** Improvement of the lightning performance of transmission lines by combining conventional and non-conventional measures // Electric Power Systems Research. 2021. № 195. P. 1–6.
- [6] **Banjanin M.S.** Application possibilities of special lightning protection systems of overhead distribution and transmission lines // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2018. № 100. P. 482–488.
- [7] **Visacro S., Silveira F.H., Pereira B., Gomes R.M.** Constraints on the use of surge arresters for improving the backflashover rate of transmission lines // Electric Power Systems Research. 2020. № 180. P. 1–7.
- [8] **Гилязов М.З., Матвеев Д.А.** Методические аспекты оценки эффективности применения ОПН для повышения грозоупорности ВЛ // III Российская конференция по молниезащите. 2012. С. 1–12.
- [9] **Механошин Б.И., Богданова О.И., Гилязов М.З., Матвеев Д.А.** Комплексный подход к обеспечению грозоупорности ВЛ // III Российская конференция по молниезащите. 2012. С. 1–6.
- [10] **Кемпонен М.Э., Панов А.В., Колычев А.В., Гулов А.М., Лопатин В.** Опыт применения линейных ОПН — разрядников для защиты линейной изоляции ВЛ 110 кВ. Исследование энергетических характеристик разрядников // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 4 (67). С. 42–46.
- [11] **Hayashi T., Mizuno Y., Naito K.** Study on transmission-line arresters for tower with high footing resistance // IEEE Transactions on Power Delivery. 2008. № 4(23). С. 2456–2460.
- [12] **Косоруков А.В., Колычев А.В., Гумерова Н.И., Хохлов Г.Г.** Расчет грозоупорности воздушных линий электропередачи 110 кВ и выше // III Российская конференция по молниезащите. 2012. С. 1–8.
- [13] **Xia Q., Karady G.** An efficient surge arrester placement strategy to improve the lightning performance of long transmission line // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2020. P. 1–5.
- [14] **Гайворонский А.С.** Новые технологии грозозащиты ВЛ 220-500 кВ с применением линейных разрядников // Современное состояние эксплуатации проектирования и строительства ВЛ. 2010. С. 176–190.
- [15] **Матвеев Д.А., Гилязов М.З.** Расчетное определение оптимальных схем расстановки ограничителей перенапряжений на одно- и двухцепных воздушных линиях электропередачи 110 кВ // Энергетик. 2012. № 6. С. 15–19.
- [16] **Zhou L., Wu T., Wang D., Hu C., Chen S.** Research on Optimal Configuration of Line Lightning Arrester Considering Terrain and Flashover Cost // 2021 IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering, CIYCEE 2021. 2021. P. 1–5.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГУЛОВ Александр Михайлович — аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: algu1ov@yandex.ru

КОЛЫЧЕВ Александр Валерьевич – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: alkoly4ev@yandex.ru

КОСОРУКОВ Антон Владимирович – нач. электролаборатории, АО «Ленгидропроект», канд. техн. наук.

E-mail: kosorukovav@lhp.ru

REFERENCES

- [1] **N.I. Gumerova, A.V. Kolychev, F.Kh. Khalilov**, Molniyezashchita elektricheskikh setey srednego, vysokogo i sverkhvysokogo napryazheniya (Lightning protection of electrical networks of medium, high and ultra-high voltage). SPb: Izdatelstvo Politekhnicheskogo universiteta, 2011. 369 с.
- [2] **F.Kh. Khalilov, E.R. Kotlyarov**, Otkaz ot trosovykh molniyeotvodov i trubchatykh razryadnikov na vozduzhnykh liniyakh 35-150 kV v rayonakh Kraynego Severa (Avoiding the use of protection wire and tubular rods of 35-150 kV for lightning protection of overhead power lines and substations in conditions of Far North) // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2015. № 2(219). S. 41–47.
- [3] **N.H. Nor Hassan, A.H. Abu Bakar, H.A. Illias, S. Abd Halim, H. Mokhlis, V. Terzija**, Analysis of discharge energy on surge arrester configurations in 132 kV double circuit transmission lines // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 2019. (139). P. 103–111.
- [4] **M. Banjanin**, Line arresters and underbuilt wire application in lightning protection of 110 kV and 220 kV overhead transmission lines // 2019 18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA, INFOTEH 2019 – Proceedings. 2019. P. 20–22.
- [5] **S. Visacro, F.H. Silveira, M.H.M. Vale, G.D. Pomar**, Improvement of the lightning performance of transmission lines by combining conventional and non-conventional measures // Electric Power Systems Research. 2021. № 195. P. 1–6.
- [6] **M.S. Banjanin**, Application possibilities of special lightning protection systems of overhead distribution and transmission lines // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2018. № 100. P. 482–488.
- [7] **S. Visacro, F.H. Silveira, B. Pereira, R.M. Gomes**, Constraints on the use of surge arresters for improving the backflashover rate of transmission lines // Electric Power Systems Research. 2020. № 180. P. 1–7.
- [8] **M.Z. Gilyazov, D.A. Matveyev**, Metodicheskiye aspekty otsenki effektivnosti primeneniya OPN dlya povysheniya grozoupornosti VL (Methodological aspects of assessing the effectiveness of the use of surge arresters to increase the lightning resistance of overhead lines) // III Rossiyskaya konferentsiya po molniyezashchite. 2012. S. 1–12.
- [9] **B.I. Mekhanoshin, O.I. Bogdanova, M.Z. Gilyazov, D.A. Matveyev**, Kompleksnyy podkhod k obespecheniyu grozoupornosti VL (An integrated approach to ensuring lightning resistance of overhead lines) // III Rossiyskaya konferentsiya po molniyezashchite. 2012. S. 1–6.
- [10] **M.E. Kemponen, A.V. Panov, A.V. Kolychev, A.M. Gulov, V. Lopatin**, Opyt primeneniya lineynykh OPN – razryadnikov dlya zashchity lineynoy izolyatsii VL 110 kV. Issledovaniye energeticheskikh kharakteristik razryadnikov (Experience in the use of linear surge arresters to protect the linear insulation of 110 kV overhead lines. Research on energy characteristics of surge arresters) // Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye. 2021. № 4 (67). S. 42–46.
- [11] **T. Hayashi, Y. Mizuno, K. Naito**, Study on transmission-line arresters for tower with high footing resistance // IEEE Transactions on Power Delivery. 2008. № 4 (23). S. 2456–2460.
- [12] **A.V. Kosorukov, A.V. Kolychev, N.I. Gumerova, G.G. Khokhlov**, Raschet grozoupornosti vozduzhnykh liniy elektroperedachi 110 kV i vyshe (Calculation of lightning resistance of overhead power transmission lines 110 kV and above) // III Rossiyskaya konferentsiya po molniyezashchite. 2012. S. 1–8.

[13] **Q. Xia, G. Karady**, An efficient surge arrester placement strategy to improve the lightning performance of long transmission line // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2020. P. 1–5.

[14] **A.S. Gayvoronskiy**, Novyye tekhnologii grozozashchity VL 220-500 kV s primeneniym lineynykh razryadnikov (New technologies of lightning protection of 220-500 kV overhead lines with the use of surge arresters) // Sovremennoye sostoyaniye ekspluatatsii proyektirovaniya i stroitelstva VL. 2010. S. 176–190.

[15] **D.A. Matveyev, M.Z. Gilyazov**, Raschetnoye opredeleniye optimalnykh skhem rasstanovki ogranichiteley perenapryazheniy na odno- i dvukhtsepykh vozdushnykh liniyakh elektroperedachi 110 kV (Calculated determination of optimal schemes for placement of surge arresters on single- and double-circuit overhead power lines of 110 kV) // Energetik. 2012. № 6. S. 15–19.

[16] **L. Zhou, T. Wu, D. Wang, C. Hu, S. Chen**, Research on Optimal Configuration of Line Lightning Arrester Considering Terrain and Flashover Cost // 2021 IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering, CIYCEE 2021. 2021. P. 1–5.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Alexander M. GULOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: algu1ov@yandex.ru

Alexander V. KOLYCHEV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: alkoly4ev@yandex.ru

Anton V. KOSORUKOV – *JSC «Lenhydroproject»*.
E-mail: kosorukovav@lhp.ru

Поступила: 30.07.2022; Одобрена: 05.09.2022; Принята: 20.09.2022.
Submitted: 30.07.2022; Approved: 05.09.2022; Accepted: 20.09.2022.

Металлургия. Материаловедение Metallurgy. Material Science

Научная статья

УДК 621.762.2+661.878

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28304>



Д.И. Балахонов^{1,2}, С.В. Николенко¹, И.А. Макаров ✉ ²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Хабаровский Федеральный исследовательский центр Институт Материаловедения
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
г. Хабаровск, Россия;

² Дальневосточный государственный университет путей сообщения,
г. Хабаровск, Россия

✉ i.a.makarov@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУР БОРИДОВ ВОЛЬФРАМА ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ ИЗ МИНЕРАЛЬНОГО ВОЛЬФРАМСОДЕРЖАЩЕГО КОНЦЕНТРАТА

Аннотация. В статье приведён анализ результатов экспериментов, полученных в процессе плазмохимического синтеза, в потоке высокочастотной плазмы, боридов вольфрама системы W-B. Описан способ получения смеси на основе многокомпонентного минерального оксидосодержащего концентрата Дальневосточного региона и борной кислоты (H₃BO₃). Представлена схема прототипа плазменного реактора для формирования зародышевой фазы боридов вольфрама в защитной среде аргона. Представлены результаты анализа химико-физических свойств боридов вольфрама системы W-B, полученных при локальном высокоэнергетическом воздействии потоком плазмы 10–100 кВт/см². Формирование боридов вольфрама из многокомпонентного оксид содержащего минерального сырья протекало в один технологический цикл. Определен химический и фазовый состав продуктов синтеза, включающих в себя соединения системы W-B. Для идентификации использованы методы рентгенофазового и спектрального микроанализа, а также сканирующая электронная микроскопия. Рассмотрены некоторые вопросы природы процессов и свойств получаемых материалов в ходе высокотемпературного плазменного синтеза, морфология образования и формирования кристаллов боридов. В ходе лабораторных испытания проб полученного материала, подтверждено наличие боридов вольфрама системы W-B и установлено наличие соединений фаз – WB, WB₂ и W₂B. Подтверждена перспективность применения плазменных технологий для формирования тугоплавких и износостойких соединений на основе бора и вольфрама.

Ключевые слова: шеелитовый концентрат, борид вольфрама, плазма, плазмохимический синтез, энергия высокой плотности.

Благодарности: Коллектив авторов выражает глубокую благодарность заведующему лабораторией физико-химических методов исследования канд. геол.-минерал. наук Бердникову Николаю Викторовичу и младшим научным сотрудникам Крутиковой Валерии Олеговне и Коноваловой Наталье Сергеевне Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина Дальневосточного отделения Российской академии наук за помощь в проведении спектрального и рентгенофазового анализов образцов.

Для цитирования:

Балахонов Д.И., Николенко С.В., Макаров И.А. Исследование структур боридов вольфрама полученных при плазмохимическом синтезе из минерального вольфрамсодержащего концентрата // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 3. С. 41–52. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28304>



D.I. Balakhonov^{1,2}, S.N. Nikolenko¹, I.A. Makarov ✉ ²

¹ Khabarovsk Federal Research Center Institute of materials science
of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Khabarovsk, Russia;

² Far Eastern State Transport University,
Khabarovsk, Russia

✉ i.a.makarov@mail.ru

INVESTIGATION OF TUNGSTEN BORIDE STRUCTURES OBTAINED IN PLASMA-CHEMICAL SYNTHESIS FROM A MINERAL TUNGSTEN-CONTAINING CONCENTRATE

Abstract. The article presents an analysis of the results of experiments obtained in the process of plasma-chemical synthesis, in a high-frequency plasma flow, of tungsten borides of the W-B system. A method for producing a mixture based on a multicomponent mineral oxide-containing concentrate of the Far East region and boric acid (H_3BO_3) is described. A schematic diagram of a prototype plasma reactor for the formation of the tungsten boride seed phase in a protective argon medium is presented. The results of the analysis of the chemical and physical properties of tungsten borides of the W-B system obtained under local high-energy exposure to a plasma flow of 10–100 kW/cm² are presented. Tungsten borides were forming from a multicomponent oxide-containing mineral raw material in one technological cycle. The chemical and phase composition of the synthesis products, including compounds of the W-B system, was determined. The methods of X-ray phase and spectral microanalysis, as well as scanning electron microscopy, were used for identification. Some issues of the nature of the processes and properties of the materials obtained during high-temperature plasma synthesis, the morphology of genesis and formation of boride crystals are considered. During laboratory testing of the obtained material samples, the presence of tungsten borides of the W-B system was confirmed and the presence of phase compounds – WB, WB₂ and W₂B was established. The prospects of using plasma technologies for the formation of refractory and wear-resistant compounds based on boron and tungsten have been confirmed.

Keywords: scheelite concentrate, tungsten boride, plasma, plasma-chemical synthesis, high-density energy.

Acknowledgements: The authors express their deep gratitude to the Head of the Laboratory of Physicochemical Research Methods, Ph.D. in Geology and Minerology Berdnikov Nikolay Viktorovich and junior researchers Krutikova Valeriya Olegovna and Konovalova Natalya Sergeevna of the Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences for their help in spectral and X-ray phase analysis of the samples.

Citation:

D.I. Balakhonov, S.N. Nikolenko, I.A. Makarov, Investigation of tungsten boride structures obtained in plasma-chemical synthesis from a mineral tungsten-containing concentrate, *Global Energy*, 28 (03) (2022) 41–52, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28304>

Введение. Одним из направлений материаловедения является разработка современных методов получения жаропрочных, коррозионноустойчивых и износостойких соединений, в том числе на основе вольфрама, титана, циркония и других тугоплавких металлов в соединении с бором, углеродом или азотом. Такое направление продиктовано зависимостью машиностроительной, горно-обогатительной, химической и др. отраслей, от продукции, получаемой из твёрдых сплавов, например карбидов, боридов или нитридов, без которых невозможно представить современное

производство и металлообработку. С целью повышения экологической безопасности региона или месторождения, снижению цены и повышению качества продукции, важным является переход от традиционных методов гидрометаллургического производства компонентов вышеупомянутых соединений из первичного сырья, руд или концентратов к менее энерго- и ресурсозатратным методам. Переработка первичного сырья, содержащего в себе необходимые металлы с применением в циклах переработки кислот или щёлочи влечёт за собой формирование остаточных «хвостов» – отвалов, дальнейшая судьба которых остаётся нерешённой задачей и по сей день.

Важным является поиск решения по взаимодействию и развитию отраслей, производящих и использующих тугоплавкие и износостойкие материалы. Например, для некоторых групп деталей автомобильной или железнодорожной строительной техники (буры, отвалы, коронки и др.) технология получения износостойких и твёрдых покрытий целесообразна из местного сырья по причине возможного дефицита экспортируемых материалов. Особенно остро этот вопрос стоит в последнее десятилетие.

Решением, позволяющим избежать дефицита материалов на основе тугоплавких соединений, является их производство из минерального сырья методами экстрактивной металлургии [1] с применением высокотемпературного синтеза. Инструментом в таком производстве может служить высокочастотная или дуговая плазма, позволяющая при высоких температурах разлагать сложные соединения до более простых. В основе большинства технологий лежит низкотемпературная плазма, генерируемая плазмотроном при ионизации газа [1].

В ранних исследованиях [2, 3] выявлено, что физико-химические свойства материалов, получаемых при высокотемпературном синтезе с использованием плазмы, значительно отличаются и могут регулироваться условиями, задаваемыми на этапе производства. Например, можно регулировать размеры карбидов вольфрама от 1...150 мкм [2], или стехиометрический состав в системе W-C, что очень важно в производстве твёрдых сплавов.

Однако, методы получения боридов тугоплавких металлов, в частности боридов вольфрама, в работах отечественных и зарубежных учёных [4–8] основаны преимущественно на печном синтезе в среде защитного газа или вакуума. Известны способы применения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в вакууме [9, 10], где результатом является получение смеси чистого восстановленного металла W и различных фазовых состояний системы W-B. Такую смесь уже не так просто разделить даже с применением химических реагентов.

Контролируемыми параметрами по окончании процесса синтеза тугоплавких соединений на основе вольфрама, являются: размер фракции получаемых частиц (процесс формирования частиц и зародышевой фазы при различной скорости охлаждения), фазовый состав соединений системы W-B, морфологическая структура кристаллов, и химико-физические свойства.

Целью исследований является изучение процессов получения боридов вольфрама системы W-B методом высокотемпературного синтеза в среде электродуговой плазмы из смеси многокомпонентного минерального вольфрамсодержащего концентрата и борсодержащего материала.

Проводимые исследования затрагивают важную проблему производства тугоплавких материалов при эффективном и рациональном использовании рудных концентратов Дальневосточного региона [11, 12].

Методика и материалы

В работе подробно рассмотрен способ получения тугоплавких соединений на основе боридов вольфрама системы W-B, получаемых из шеелитового концентрата с использованием высокотемпературной плазмы в среде инертного газа удельной мощностью плазменного потока 104–105 Вт/см².

При воздействии высокой температуры плазменного потока смесь, состоящая из концентрата и борсодержащего материала претерпевает следующие структурные изменения: быстрый

нагрев, плавление, деструктуризацию на более простые составляющие и возгонку. Смесь в камере реактора синтеза подаётся порционно, с периодичностью 10–15 с.

Источник плазмы состоит из высокочастотного магнетрона и плазмотрона косвенного действия, питающегося от высокочастотного инвертора мощностью 4,5 кВт.

После плавления и возгонки компонентов смеси, воздействие высокой температуры плазмы ослабевает, материал покидает поток плазмы, вследствие чего происходит охлаждение и синтез соединений. В результате последнего структурного преобразования протекают химические реакции с образованием зародышевых фаз боридов вольфрама, вдали от равновесия термодинамической и физической системы. Важно отметить, что все указанные процессы протекают в один технологический цикл в закрытой камере с обратным клапаном для удаления попутных газов из системы.

Температура плазменного потока неоднородна и при удалении от источника плазмы (плазмотрона) резко понижается, с ~9 тыс. К до ~3 тыс. К, и далее до среднего значения температуры в камере синтеза 753...933 К. Средняя температура камеры в присопловой области плазмотрона составляет 1750...2400 К.

Основной гипотезой исследований является предположение о возможности получения соединений системы W-B методом плазмохимического синтеза в потоке низкотемпературной плазмы из минерального оксидосодержащего многокомпонентного концентрата Дальневосточного региона (Лермонтовский ГОК) – шеелита. Таким образом, весь процесс синтеза осложнён наличием попутных химических элементов, входящих в минерал.

Перед проведением эксперимента важно исследовать фазовый и химический состав концентрата, т.к. образцы, полученные с одного месторождения, не однородны и могут отличаться [3]. При этом среднее содержание триоксида вольфрама (WO_3) может варьироваться от 10...80 %. В данных исследованиях использовался шеелитовый концентрат с низким содержанием триоксида вольфрама (табл. 1).

Таблица 1

Состав применяемого шеелитового концентрата

Table 1

The composition of the applied scheelite concentrate

Фазовый состав								
WO_3	CaO	SiO_2	FeO	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	K_2O	MnO
42,34	24,8	12,34	3,72	2,21	9,2	0,78	0,12	0,02
As	P_2O_5	Na_2O	TiO_2	CO_2	SO_3	H_2O^-	H_2O^+	–
0,13	1,9	0,14	0,18	0,11	0,1	0,54	1,37	–

Смесь из минерального концентрата (табл. 1) и борсодержащего материала, например борной кислоты H_3BO_3 , в соотношении 50...90 % Ш (концентрат), 10...50 % В (H_3BO_3), для усреднения состава смешивалась в планетарной мельнице. Получаемая смесь также претерпевала процесс частичной механоактивации. Соотношение компонентов предварительно рассчитывалось исходя из фазового состава концентрата и содержания химических элементов в концентрате и борной кислоте. Изменение концентрации H_3BO_3 в интервале от 10 до 50 процентов в составе смеси выбрано не случайно, и требовалось для оптимизации процесса синтеза. Для формирования смеси на основе вольфрамсодержащего концентрата также можно использовать тетрабората натрия $Na_2B_4O_7$, но пересчёт содержания компонентов необходимо делать с учётом содержания кислоро-

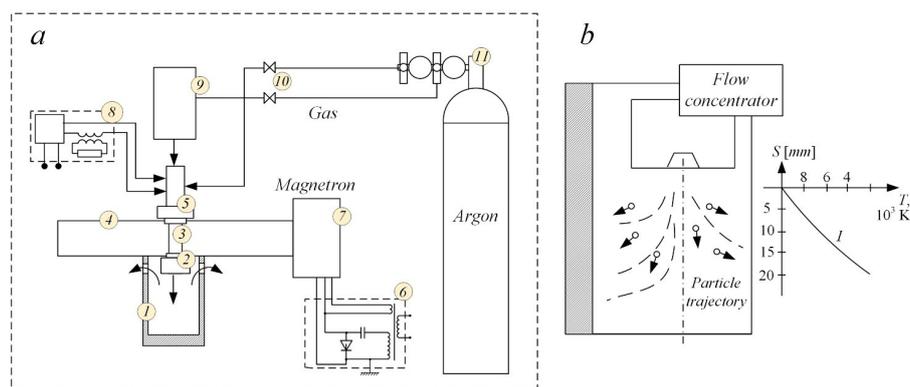


Рис. 1. Схема системы плазмохимического синтеза (а) и зависимость температуры плазменного потока при отдалении от концентратора (b): 1 – камера синтеза и сбора материала; 2 – концентратор; 3 – огнеупорная колба; 4 – волновод; 5 – плазмотрон; 6 – схема инвертора магнетрона; 7 – магнетрон; 8 – схема ВЧ-инвертора; 9 – устройство подачи смеси; 10 – вентиль подачи; 11 – газовое оборудование

Fig. 1. Scheme of the plasma-chemical synthesis system (a) and the dependence of the plasma flow temperature at a distance from the concentrator (b): 1 – chamber for synthesis and collection of material; 2 – concentrator; 3 – refractory flask; 4 – waveguide; 5 – plasma torch; 6 – magnetron inverter circuit; 7 – magnetron; 8 – scheme of the RF inverter; 9 – mixture supply device; 10 – supply valve; 11 – gas equipment

да и натрия в составе. Полученная смесь после перемешивания просушивалась при температуре 90...280 °С (смесь с борной кислотой), или при 90 °С (смесь с тетраборатом натрия).

Способ доставки смеси – напорный (рис. 1). В ёмкость для хранения смеси по отдельному рукаву, сообщённому с газовым редуктором баллона 11, подаётся газ (аргон). Рукав подачи газа в ёмкость со смесью сообщён с системой подачи и дозирования 9 (так же в этой позиции находится ёмкость со смесью). Далее смесь с газом подаётся в плазмотрон 5. Концентратор 2, расположенный после огнеупорной трубки 3, позволяет сконцентрировать разогретую смесь на выходе в присопловой области. Это обусловлено необходимостью фокусировать поток на входе в реактор так, чтобы вся смесь проходила через наиболее разогретую область плазменного потока.

Для фазового и элементного анализа образцов применялся электронный энергодисперсионный спектрометр, входящий в состав сканирующего электронного микроскопа «VEGA 3 LMH», а также рентгеновский дифрактометр.

Результаты и их обсуждение

Общеизвестно, что термическое разложение борной кислоты H_3BO_3 протекает в две основные стадии: при медленном нагревании до температур 107,5 °С с образованием метаборной кислоты HBO_2 и воды и при температуре 150 °С с образованием борного ангидрида B_2O_3 и воды [8]. В свою очередь, в процессе резкого нагрева в потоке плазмы до 3500...5000 К, борная кислота претерпевает такие же изменения, как и при медленном нагреве, но промежуточные преобразования протекают значительно быстрее. Из-за большого объема выделяемого водорода, переходящего в соединение с кислородом, возможны реакции с образованием полимера B_2O_2 и B_2O . При значительном избытке B_2O_3 в среде защитного газа возможно образование элементарного бора и последующего перехода его в B_2O . Вышеупомянутые преобразования также в некоторой степени протекают ещё на стадии сушки и механоактивации смеси Ш+В (при применении H_3BO_3) с образованием борного ангидрида. Подаваемая транспортирующим газом из устройства 9 в плазмотрон 5, а затем в огнеупорную колбу 3 смесь, претерпевает все вышеуказанные преобразования, вплоть до возгонки большей части основного материала смеси.

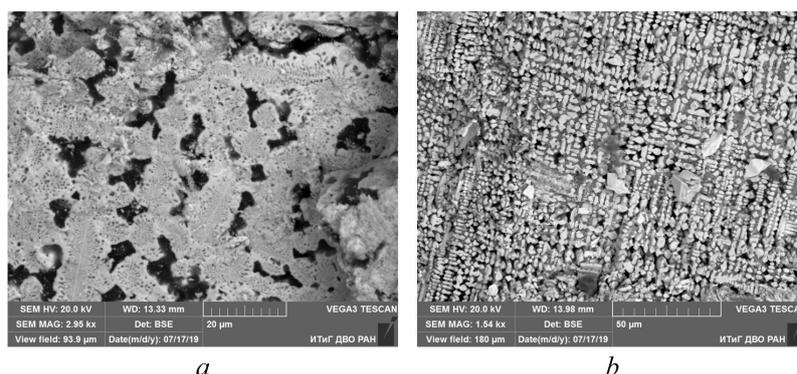


Рис. 2. Результат спектрального анализа образцов, полученных в ходе плазмохимического синтеза на стенках камеры 1 (рис. 1), где: *a* – образец, полученный ближе к концентратору; *b* – образец, полученный дальше от концентратора

Fig. 2. The result of the spectral analysis of the samples obtained during plasma-chemical synthesis on the walls of chamber 1 (Fig. 1), where: *a* – the sample obtained closer to the concentrator; *b* – sample obtained farther from the concentrator

Разогретая до температуры 4...6 тыс. К. в атмосфере инертного газа смесь, подаваемая из блока 9, полностью теряет водород и значительную часть кислорода. Попутные химические элементы, например, Al, Mn, Mg, Ca, P и др., являющиеся по отношению к вольфраму менее тугоплавкими, возгоняются в колбе 3 и под давлением транспортирующего газа выводятся в камеру синтеза 1. Важно отметить, что для ряда соединений процесс синтеза возможен в колбе 3 и концентраторе 2. Однако при длительном воздействии СВЧ излучения от магнетрона 7, температура плазмы в огнеупорной трубке возрастает до ~9 тыс. К, что приводит к частым случаям её разрушения.

В итоге порядка 40 % материала, подаваемого в зону нагрева, теряется в процессе диспергирования и возгонки в виде смеси мелкодисперсных капель и газа.

По окончании термодинамических процессов, в реакторе синтеза формировались наноразмерные и мелкодисперсные частицы, в последующем охлаждённые до температуры окружающей среды (22...28 °С). Полученные образцы представляли из себя легко дробящиеся твёрдые частицы серого цвета. Отдельно были отобраны образцы мелкодисперсных частиц, частично осевших на внутренних поверхностях камеры и наружной поверхности концентратора 2.

Дальнейший анализ продуктов синтеза проводился на основе общепринятых методик, с использованием стандартизированного оборудования (ИТиГ ДВО РАН, г. Хабаровск). Так, в результате спектрального анализа образцов получены контрастные изображения (рис. 2, *a* и *b*), по результатам которого выявлены твёрдые частицы системы W-B (светлая область), и частицы соединений бора и попутных химических элементов Fe, Si, Ca и др., или их сплавов, входящих преимущественно в состав шлака (тёмная область). При этом соединения системы W-B преобладают над остальными соединениями, входящими в состав шлака. Важно отметить, что материал не претерпевал физических или химических процессов обработки кроме постепенного остывания в камере синтеза.

Результаты спектрального анализа химического состава испытуемых образцов (рис. 2, *a*), полученных из смеси на основе вольфрамсодержащего концентрата с борной кислотой H_3BO_3 , сведены в табл. 2. Химический состав образцов, указанных на рис. 2, *b*, указан в табл. 3.

Из результатов химического анализа образцов, полученных при разной скорости охлаждения, видно, что состав частиц, полученных в отдалении от концентратора (рис. 2, *b*), имеет значительно меньше примесей и остатка в виде шлака. Размер частиц, полученных ближе к концентратору,

достигает 250–1000 нм. В свою очередь частицы, сформированные на значительном отдалении от концентратора, сформировали своего рода скелетную структуру.

Таблица 2

Химический состав образца (рис. 2, а)

Table 2

The chemical composition of the sample (fig. 2, a)

№ спект.	Элементный состав масс. %							
	W	B	Si	Ca	Fe	Mn	Na	Прочие
1	92,99	6,19	0,56	0,23	0,01	–	0,01	0,01
2	91,07	7,44	1,22	0,23	0,02	–	0,01	0,01
3	54,1	14,46	3,32	18,41	6,75	0,18	0,02	2,76
4	92,84	6,13	0,87	0,11	0,01	–	0,02	0,02
5	93,48	5,78	0,56	0,14	0,01	–	0,02	0,01
6	29,7	16,56	2,69	24,34	15,35	0,87	7,34	3,15

Таблица 3

Химический состав образца (рис. 2, б)

Table 3

The chemical composition of the sample (fig. 2, b)

№ спект.	Элементный состав масс. %							
	W	B	Si	Ca	Fe	Mn	Na	Прочие
1	92,66	5,98	1,12	0,21	0,01	–	0,01	0,01
2	93,44	5,89	0,22	0,41	0,02	–	0,01	0,01
3	92,17	7,23	0,32	0,18	0,02	–	0,02	0,06
4	93,9	4,97	0,87	0,21	0,01	–	0,02	0,02
5	92,94	6,21	0,56	0,25	0,01	–	0,02	0,01
6	91,66	6,98	0,69	0,56	0,05	–	0,01	0,05

В результате проведённого химического анализа образцов (рис. 2, б) выявлено содержание вольфрама W до 92,66 масс.% (до 50 ат.%), бора B до 5,98 масс.% (до 50 ат.%). Фазовый состав образца преимущественно представлен боридом WB. Спектрограмма образцов (рис. 2, б) боридов вольфрама системы W-B отдельных спектров представлена на рис. 3. Структура частиц представлена преимущественно дендритной формой кристаллов, формирование лучей происходит от центра (основания) кристалла в противоположных направлениях. В результате высокой скорости охлаждения рост кристаллов от формирования зародышевой фазы быстро замедляется, размер кристаллов варьируется в интервале 250...1000 нм.

Фазовый анализ продуктов синтеза (рис. 2, а) преимущественно представлен фазами WB, W₂B и WB₂. Так в соединении W₂B содержание W до 92,99 масс.% (до 70 ат.%), B до 6,19 масс.% (до 30 ат.%), WB₂ с содержанием W до 91,07 масс.% (до 30 ат.%), B до 7,44 масс.% (до 70 ат.%).

Среднее содержание вольфрама и бора в обоих образцах (рис. 2, а и б) схоже, а фазовый состав отличается. Содержание бора в структурах (рис. 2, а) неравномерно, так как охлаждение материала в присопловой области происходит медленнее, рост кристаллов дендритной структуры протекает дольше, а средний размер структур составляет 5...20 мкм в поперечном сечении.

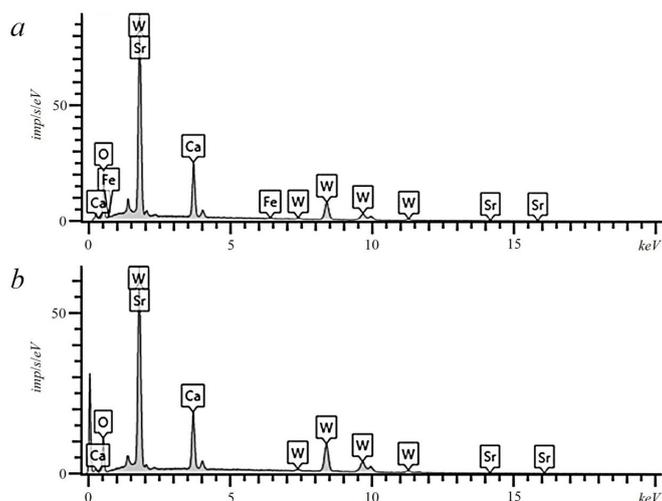


Рис. 3. Спектрограммы образцов системы W-B в продуктах синтеза, где:
a – образец рис. 2, *a*; *b* – образец рис. 2, *b*

Fig. 3. Spectrograms of samples of the W-B system in the synthesis products, where:
a – sample fig. 2, *a*; *b* – sample fig. 2, *b*

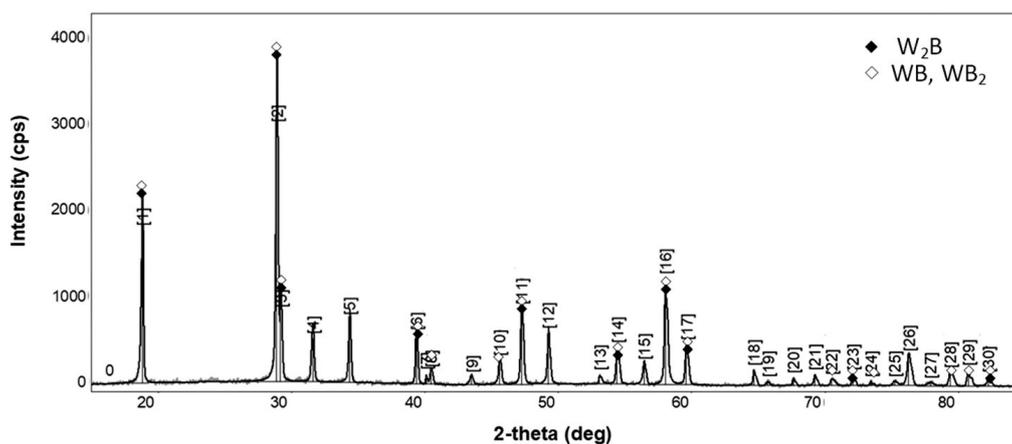


Рис. 4. Рентгенофазовый анализ продуктов синтеза с выделенными пиками боридов вольфрама W-B

Fig. 4. X-ray phase analysis of synthesis products with selected peaks of tungsten borides W-B

Результаты рентгенофазового анализа полученных образцов показали наличие фазовых состояний W_2B , WB и WB_2 (рис. 4). Пики, фиксирующие W_2B , WB и WB_2 , отмечены отдельными маркерами.

Исследованные структуры полученных кристаллов боридов вольфрама W-B показывают, что структура кристаллической решётки преимущественно имеет две модификации: кубическую и тетрагональную. Однако возможно наличие кристаллов с гексагональной сингонией [13–15].

Чистота продуктов синтеза, состоящих из боридов системы W-B, предварительно отделённых от шлака, составляет в среднем порядка 99,4 масс.%, а среднее содержание бора 5,98 масс.%.

Заключение

1. Результаты проведённых исследований подтверждают возможность получения боридов вольфрама системы W-B методом плазмохимического синтеза в реакционной камере при удель-

ной мощности потока электродуговой плазмы 10^4 – 10^5 Вт/см². В ходе экспериментов получены бориды вольфрама фаз WB, WB₂, W₂B.

2. Кристаллы боридов вольфрама формируют дендритные структуры, размер которых значительно отличается и зависит от скорости охлаждения. Кристаллы значительно меньше (250...1000 нм) при резком охлаждении до температур 753–933 К (температура стенок), и больше 1...20 мкм в поперечном сечении при медленном остывании (1750...2400 К) в присопловой области.

3. Выявлено, что формирование структур боридов вольфрама в значительной степени зависит от скорости охлаждения и формирования зародышевой фазы WB. Скорость охлаждения частиц у концентратора выше, что приводит к формированию отдельных малоразмерных частиц, состоящих из боридов вольфрама системы W-B.

4. Результаты проведённых исследований доказывают, что плазмохимический синтез боридов вольфрама системы W-B позволяет получать мелкодисперсные кристаллы на стенках камеры, а подобные исследования могут позволить формировать огнеупорные или химически износостойкие покрытия на деталях строительной и горно-обогатительной технике или тиглях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Туманов Ю.Н.** Плазменные, высокочастотные, микроволновые и лазерные технологии в химико-металлургических процессах. М.: Физматлит, 2010. 968 с.

[2] **Balakhonov D. I., Makarov I.A.** Plasma-Chemical Synthesis of Tungsten Carbides from Multicomponent Oxide-Containing Concentrates // Russian metallurgy (Metally). 2020. Vol. 2020. No. 8. P. 870–876.

[3] **Балахонов Д. И., Макаров И.А.** Разработка способа получения боридов вольфрама методом плазмохимического синтеза // Наука. Технологии. инновации: Сб. научных трудов в 9 ч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. С. 218–221.

[4] **Сизяков В.М., Бажин В.Ю., Виленская А.В., Федоров С.Н.** Способ получения порошка диборида титана. Пат. 2684381 Российская Федерация, МПК С 01 В 35/04, С 01 О 23/00, В 22 Б 9/18.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». № 2018100505; заявл. 09.01.18; опубл. 08.04.19, Бюл. № 10. 7 с.

[5] **Буйкова С.П., Кульков С.Н., Севостьянова И.Н., Савченко Н.Л., Бурлаченко А.Г., Гусев А.Ю., Мировой Ю.А., Пшеничный А.Д.** Способ получения наноразмерного порошка диборида циркония. Пат. 2601340 Российская Федерация, МПК С 01 В 35/04, В 22 F 9/00, В 82 В 3/00.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН). № 2015125930/05; заявл. 29.06.15; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 31. 8 с.: ил.

[6] **Takahiko Kikuchi, Yoshinori Koyama, Yusuke Oysi.** Titanium boride-containing powder, method for producing the same, and method for producing sintered metal. JP6450670B2, Int. C1: В 22 F 1/00, В 22 F 9/04, С 22 С 33/02.; patent holder Nippon Denko Corporation. Application granted 2019-01-09; Publication of JP6450670B2 2019-01-09.

[7] **Tang Zhu Xing, Tan Hui Hui.** Preparation method of tungsten boride powder. CN102285661B, Int. C1: С 01 В 35/04.; patent holder Shandong University of Technology. Application granted 2013-02-13; Publication of CN102285661B 2013-02-13.

[8] **Жучков В.И., Леонтьев Л.И., Акбердин А.А.** Применение бора и его соединений в металлургии. Новосибирск: ИД Академиздат, 2018. 156 с.

[9] **Смирнягина Н.Н., Халганова В.М., Дашеев Д.Э., Белоусов А.Н.** СВЧ синтез боридов и карбидов хрома, молибдена и вольфрама и электронно-лучевая наплавка для поверхностного упрочнения легированных углеродистых сталей // Материалы Всероссийской научной конференции с междуна-

родным участием «III Байкальский материаловедческий форум». Улан-Удэ: Бурятский научный центр Сибирского отделения РАН, 2018. С. 211–212.

[10] **Долматов О.Ю., Закусилов В.В., Кузнецов М.С., Куприянов В.В., Семёнов А.О., Чурсин С.С.** Способ получения материала, содержащего борид вольфрама. Пат. 2706913 Российская Федерация, МПК С 22 С 29/14, В 22 F 3/23, С 04 В 35/58.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». № 2019122266; заявл. 16.07.2019; опубл. 21.11.2019. Бюл. № 33. 9 с.: ил.

[11] **Гордиенко П.С., Пашнина Е.В., Ярусова С. Б.** Комплексная переработка ильменитового концентрата // Химическая технология. 2019. Т. 20. № 14. С. 657–661.

[12] **Гостищев В.В., Хосен Ри, Шекин А.В., Дзюба Г.С.** Получение металлов и композиционных материалов с использованием минерального сырья Дальнего Востока Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2019. 230 с.

[13] **Благов А.Е., Васильев А.Л., Дмитриев В.П.** Исследование особенностей микроструктуры монокристаллического бора // Кристаллография. 2017. Т. 62. № 5. С. 716–726.

[14] **Ноздрин И.В.** Разработка научных основ и технологии плазмометаллургического производства нанопорошков борида и карбида хрома: дисс. на соискание уч. степ. доктора тех. наук: 05.16.06: защищена 11 февраля 2016 г.; утв. 17.02.2016. Красноярск, 2016. 323 с. Библиогр.: С. 260–295.

[15] **Иванов О.К.** Кристаллы: равновесные и неравновесные и причины изменчивости их форм // Уральский геологический журнал, 2016, № 2 (110). С. 3–237.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАЛАХОНОВ Денис Игоревич – старший научный сотрудник лаборатории «Физико-химических основ технологии материалов», Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский Федеральный исследовательский центр Институт Материаловедения Дальневосточного отделения Российской академии наук, канд. техн. наук.

E-mail: karoxar@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1600-6506>

НИКОЛЕНКО Сергей Викторович – главный научный сотрудник лаборатории «Физико-химических основ технологии материалов» института материаловедения ХФИЦ ДВО РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский Федеральный исследовательский центр Институт Материаловедения Дальневосточного отделения Российской академии наук, д-р техн. наук.

E-mail: nikola1960@mail.ru

МАКАРОВ Иван Александрович – старший преподаватель, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, без степени.

E-mail: i.a.makarov@mail.ru

REFERENCES

[1] **Yu.H. Tumanov**, Plazmennyye, vysokochastotnyye, mikrovolnovyye i lazernyye tekhnologii v khimiko-metallurgicheskikh protsessakh. M.: Fizmatlit, 2010. 968 s.

[2] **D.I. Balakhonov, I.A. Makarov**, Plasma-Chemical Synthesis of Tungsten Carbides from Multicomponent Oxide-Containing Concentrates // Russian metallurgy (Metally). 2020. Vol. 2020. No. 8. P. 870–876.

[3] **D.I. Balakhonov, I.A. Makarov**, Razrabotka sposoba polucheniya boridov volframa metodom plazmokhimicheskogo sinteza // Nauka. Tekhnologii. innovatsii: Sb. nauchnykh trudov v 9 ch. Novosibirsk: Izd-vo NG-TU, 2020. S. 218–221.

[4] **V.M. Sizyakov, V.Yu. Bazhin, A.V. Vilenskaya, S.N. Fedorov**, Sposob polucheniya poroshka diborida titana. Pat. 2684381 Rossiyskaya Federatsiya, MPK S 01 V 35/04, S 01 O 23/00, V 22 B 9/18.; zayavitel i patentoobladatel federalnoye gosudarstvennoye byudzhetnoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego obrazovaniya «Sankt-Peterburgskiy gornyy universitet». № 2018100505; zayavl. 09.01.18; opubl. 08.04.19, Byul. № 10. 7 s.

[5] **S.P. Buyakova, S.N. Kulkov, I.N. Sevostyanova, N.L. Savchenko, A.G. Burlachenko, A.Yu. Gusev, Yu.A. Mirovoy, A.D. Pshenichnyy**, Sposob polucheniya nanorazmernogo poroshka diborida tsirkoniya. Pat. 2601340 Rossiyskaya Federatsiya, MPK C 01 B 35/04, B 22 F 9/00, B 82 B 3/00.; zayavitel i patentoobladatel Federalnoye gosudarstvennoye byudzhetnoye uchrezhdeniye nauki Institut fiziki prochnosti i materialovedeniya Sibirskogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk (IFPM SO RAN). № 2015125930/05; zayavl. 29.06.15; opubl. 10.11.2016, Byul. № 31. 8 s.: il.

[6] **Takakhiko Kikuchi, Yoshinori Koyama, Yusuke Oysi**, Titanium boride-containing powder, method for producing the same, and method for producing sintered metal. JP6450670B2, Int. C1: B 22 F 1/00, B 22 F 9/04, C 22 C 33/02.; patent holder Nippon Denko Corporation. Application granted 2019-01-09; Publication of JP6450670B2 2019-01-09.

[7] **Tang Zhu Xing, Tan Hui Hui**, Preparation method of tungsten boride powder. CN102285661B, Int. C1: C 01 B 35/04.; patent holder Shandong University of Technology. Application granted 2013-02-13; Publication of CN102285661B 2013-02-13.

[8] **V.I. Zhuchkov, L.I. Leontyev, A.A. Akberdin**, Primeneniye bora i yego soyedineniy v metallurgii. Novosibirsk: ID Akademizdat, 2018. 156 s.

[9] **N.N. Smirnyagina, V.M. Khaltanova, D.E. Dasheyev, A.N. Belousov**, SVS sintez boridov i karbidov khroma, molibdena i volframa i elektronno-luchevaya naplavka dlya poverkhnostnogo uprochneniya legirovannykh uglerodistykh staley // Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «III Baykalskiy materialovedcheskiy forum». Ulan-Ude: Buryatskiy nauchnyy tsentr Sibirskogo otdeleniya RAN, 2018. S. 211–212.

[10] **O.Yu. Dolmatov, V.V. Zakusilov, M.S. Kuznetsov, V.V. Kupriyanov, A.O. Semenov, A.O. Chursin**, Sposob polucheniya materiala, sodержashchego borid volframa. Pat. 2706913 Rossiyskaya Federatsiya, MPK C 22 C 29/14, B 22 F 3/23, C 04 B 35/58.; zayavitel i patentoobladatel federalnoye gosudarstvennoye avtonomnoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego obrazovaniya «Natsionalnyy issledovatel'skiy Tomskiy politekhnicheskii universitet». № 2019122266; zayavl. 16.07.2019; opubl. 21.11.2019. Byul. № 33. 9 s.: il.

[11] **P.S. Gordiyenko, Ye.V. Pashnina, S.B. Yarusova**, Kompleksnaya pererabotka ilmenitovogo kontsentrata // Khimicheskaya tekhnologiya. 2019. T. 20. № 14. S. 657–661.

[12] **V.V. Gostishchev, Ri Khosen, A.V. Shchekin, G.S. Dzyuba**, Polucheniye metallov i kompozitsionnykh materialov s ispolzovaniyem mineralnogo syrya Dalnego Vostoka Khabarovsk: Izd-vo TOGU, 2019. 230 s.

[13] **A.Ye. Blagov, A.L. Vasilyev, V.P. Dmitriyev**, Issledovaniye osobennostey mikrostruktury monokristallicheskogo bora // Kristallografiya. 2017. T. 62. № 5. S. 716–726.

[14] **I.V. Nozdrin**, Razrabotka nauchnykh osnov i tekhnologii plazmometallurgicheskogo proizvodstva nanoporoshkov borida i karbida khroma : diss. na soiskaniye uch. step. doktora tekhn. nauk: 05.16.06: zashchishchena zashchishchena 11 fevralya 2016 g.: utv. 17.02.2016. Krasnoyarsk, 2016. 323 s. Bibliogr.: S. 260–295.

[15] **O.K. Ivanov**, Kristally: ravnovesnyye i neravnovesnyye i prichiny izmenchivosti ikh form // Uralskiy geologicheskii zhurnal, 2016, № 2 (110). S. 3–237.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Denis I. BALAKHONOV – *Khabarovsk Federal Research Center Institute of materials science of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.*

E-mail: karoxar@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1600-6506>

Sergej N. NIKOLENKO – *Khabarovsk Federal Research Center Institute of materials science of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.*

E-mail: nikola1960@mail.ru

Ivan A. MAKAROV – *Far Eastern State Transport University.*

E-mail: i.a.makarov@mail.ru

Поступила: 04.04.2022; Одобрена: 15.07.2022; Принята: 19.07.2022.

Submitted: 04.04.2022; Approved: 15.07.2022; Accepted: 19.07.2022.

Научная статья

УДК 691.175.3

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28305>



Е.Д. Васильева^{1,2} ✉, *А.Н. Иванов*^{1,2}, *Н.Ф. Стручков*², *А.К. Кычкин*²

¹ Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН»,
г. Якутск, Россия;

² Институт физико-технических проблем Севера им. В.Р. Ларионова СО РАН,
г. Якутск, Россия

✉ vasilyeva_edm@mail.ru

СРАВНЕНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКА ЭТИЛОВЫМ СПИРТОМ И КЕРОСИНОМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКРЫТОЙ ПОРИСТОСТИ

Аннотация. Проведена оценка двух подходов к определению открытой пористости стеклопластика путем гидростатического взвешивания с учетом и без учета объема пор и плотностей образца и рабочих жидкостей: полярного этилового спирта и неполярного керосина. В качестве параметра оценки выбраны поверхностное натяжение и работа адгезии к поверхности стеклопластика. Гидрофобность поверхности, определение энергии поверхностного натяжения и работа адгезии смачивающей жидкости к поверхности стеклопластика оценивали по краевому углу смачивания капель рабочих жидкостей. В качестве эталона для сравнения использована дистиллированная вода. Скорость испарения и проникающая способность этилового спирта по результатам измерения краевого угла смачивания показали значительно более высокие значения. В тоже время смачивание поверхности стеклопластика идет быстрее при использовании неполярного керосина в качестве рабочей жидкости. По данным краевого угла смачивания определены работы адгезии к поверхности стеклопластика с учетом идеально гладкой поверхности. По полученным данным керосин продемонстрировал отличную смачивающую способность, относительно низкую летучесть (испаряемость) с высокой проникающей способностью. Следует иметь в виду, что при расчете открытой пористости образца полимерного композиционного материала следует подбирать рабочую жидкость исходя из смачивающей способности, полярности поверхности исследуемого образца, летучести и не токсичности. В тоже время для измерения открытой пористости необходимо иметь в виду, что, работа, затрачиваемая на адгезию с полярной поверхностью, будет выше при использовании в качестве смачивающей жидкости полярного этилового спирта.

Ключевые слова: композиционный материал, эпоксидная смола, этиловый спирт, керосин, открытая пористость, поверхностное натяжение, краевой угол смачивания.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №FWRS-2021-0041) с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (Грант №13.ЦКП.21.0016).

Для цитирования:

Васильева Е.Д., Иванов А.Н., Стручков Н.Ф., Кычкин А.К. Сравнение смачиваемости стеклопластика этиловым спиртом и керосином для определения открытой пористости // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 3. С. 53–64. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28305>



E.D. Vasileva^{1,2} ✉, *A.N. Ivanov*^{1,2}, *N.F. Struchov*², *A.A. Kychkin*²

¹ Federal Research Centre
“The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”,
Yakutsk, Russia;

² V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems
of the North of the Siberian Branch of the RAS,
Yakutsk, Russia

✉ vasilyeva_edm@mail.ru

COMPARISON OF WETTABILITY OF FIBERGLASS PLASTIC WITH ETHYL ALCOHOL AND KEROSENE TO DETERMINE OPEN POROSITY

Abstract. Two approaches to determining the open porosity of fiberglass plastic by hydrostatic weighing with and without considering the pore volume and densities of the sample and working fluids, polar ethyl alcohol and non-polar kerosene, have been evaluated. Surface tension and work of adhesion to the fiberglass surface were chosen as evaluation parameters. Surface hydrophobicity, determination of surface tension energy and adhesion work of wetting liquid to the fiberglass plastic surface were evaluated by the edge angle of wetting drops of working fluids. Distilled water was used as a reference for comparison. The evaporation rate and permeation capacity of ethyl alcohol showed significantly higher values based on the measurement of the wetting edge angle. At the same time, wetting of the fiberglass surface was faster when non-polar kerosene was used as the working fluid. The data of the wetted edge angle has been used to determine the adhesion work on the fiberglass surface, taking into account the perfectly smooth surface. According to the data obtained, kerosene demonstrated excellent wetting ability, relatively low volatility (evaporation) with high permeability. It should be kept in mind that when calculating the open porosity of a sample of polymer composite material, the working fluid should be selected based on the wettability, surface polarity of the studied sample, volatility and non-toxicity. At the same time to measure the open porosity it is necessary to keep in mind that the work spent on adhesion with a polar surface will be higher when using polar ethyl alcohol as a wetting liquid.

Keywords: composite material, epoxy resin, ethyl alcohol, kerosene, open porosity, surface tension, edge wetting angle.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic no.FWRS-2021-0041) shared core facilities of the Federal Research Center "Yakutsk Science Center SB RAS (Grant no.13. CCP.21.0016).

Citation:

E.D. Vasileva, A.N. Ivanov, N.F. Struchov, A.K. Kychkin, Comparison of wettability of fiberglass plastic with ethyl alcohol and kerosene to determine open porosity, *Global Energy*, 28 (03) (2022) 53–64, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28305>

Введение. Наличие открытых пор на поверхности прежде всего влияет на эксплуатационные свойства и долговечность полимерного композиционного материала. Количество и наличие пор на поверхности полимерных материалов напрямую зависят от термохимических свойств полимерной матрицы и технологии изготовления композиционных материалов [1–3]. Снижение технологических дефектов на стадии формования и отверждения термореактивного связующего с армирующим наполнителем является одним из важнейших условий получения качественных композиционных полимерных материалов с прогнозируемым заданным уровнем эксплуатационных характеристик.

При прогнозировании прочностных свойств и эксплуатации полимерного материала необходимо учитывать термодинамические процессы, происходящие на поверхности в зависимости от химического строения (формирование и образование поверхностного слоя [4]), реакционную и адсорбционную способности, химический потенциал и энергию активации полимерной матрицы [5–6].

При изучении поверхностных явлений в композиционных полимерных материалах необходимо использовать теоретические модели, способные давать априорные оценки поведения молекулярных цепей в граничном слое и возможных способах управления процессами, происходящими на границах раздела в полимерных композитах с целью создания материала с комплексом требуемых свойств [7].

Стандартный метод определения открытой пористости поверхности полимерного композиционного материала основан на методе гидростатического взвешивания образца для испытаний в заданной рабочей жидкости ввиду простоты расчетов и проведения испытания в отличие от аппаратного (газовой адсорбции) и ртутного методов [2]. Согласно ГОСТ 532-2021 в качестве рабочей жидкости используются этиловый спирт технический (ГОСТ 17299) и дистиллированная вода (ГОСТ 6709). В литературе встречаются два подхода к расчету открытой пористости методом гидростатического взвешивания:

1) Расчет кажущейся/истинной и теоретической плотности с учетом толщины образца с последующим вычитанием от 100% отношения плотностей. Иногда расчет ведут путем определения объемов истинной и теоретической плотности и их отношения (объем пор).

2) Расчет отношения разницы масс пропитанного образца в рабочей жидкости и сухого образца к разнице взвешенного на воздухе пропитанного образца и пропитанного образца в рабочей жидкости.

Определяющим фактором точности данного метода, является степень насыщения открытых пор на поверхности рабочей жидкостью. Выбор керосина в качестве рабочей жидкости для определения открытой пористости по методу Преображенского обусловлен высокой проникающей способностью, инертностью к полимеру и низкой летучестью [8–9].

Способность пропитывать образец можно связать со смачиваемостью поверхности рабочей жидкостью. Смачиваемость характеризуется краевым углом смачивания θ и определяется равновесием между химическим составом жидкости и смачиваемой поверхностью, а также шероховатостью поверхности [10]. Измерение угла смачивания с последующим расчетом удельной поверхностной энергии является приблизительным методом оценки работы адгезии и когезии смачивающей жидкости [11]. Краевой угол смачивания на шероховатой поверхности зависит от площади контакта по отношению к выступам и впадинам (рис. 1) и может быть рассчитан графическим методом. Наклон выступа определяется краевым углом Θ и углом выступа $\langle\varphi$ [12].

Согласно адсорбционной теории Дебройна и Мак-Ларена адгезия между жидкостью и адсорбционной поверхностью происходит в результате межмолекулярных сил, иными словами за счет физической адсорбции [12]. Адгезионное взаимодействие воды, керосина и этанола на поверхности полимерного материала на основе карбамидоформальдегидной смолы показало, что все три используемые жидкости проникали внутрь и расширялись по всей поверхности композитных панелей [13]. Сравнение трех жидкостей показало большое влияние связей между гидроксильными группами и поверхностью композита.

Целью данной работы является сравнение результатов смачиваемости поверхности стеклопластика на основе эпоксидной смолы путем измерения краевого угла смачивания и определения открытой пористости с использованием этилового спирта и керосина.

Материалы и методика исследования

Смачиваемость и открытую пористость композиционного материала измеряли на поверхности стеклопластика на основе эпоксидной смолы ЭД-20 (Hefei TNJ Chemical Industry Co., Ltd.,

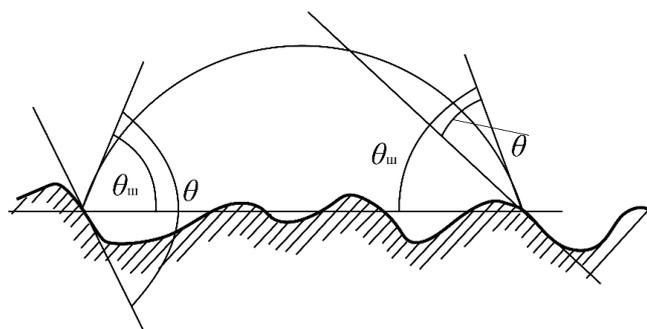


Рис. 1. Изображение краевого угла смачивания на шероховатой поверхности
 Fig. 1. Image of the contact angle on a rough surface

Китай), отвержденной изо-МТГФА (АО «Стерлитамакский нефтехимический завод», Россия) в присутствии ускорителя УП-606/2 (АО «Стерлитамакский нефтехимический завод, Россия) и стеклоткани ТР-560-30А (ОАО «Полоцк-Стекловолокно», Беларусь). Состав связующего подготовлен согласно РТП-СП2-20994511-1999Т представленной в табл. 1.

Образцы стеклопластика получены методом вакуумной инфузии с последовательно уложенными 18-ю слоями стеклоткани, пропитанными связующим. Отверждение в готовых формах проводили при температуре 160 ± 2 °С в течение 4 часов с дальнейшим кондиционированием в течение 24 часов. Полученные плиты имели размеры $950 \times 450 \times 5$ мм.

Таблица 1

Состав рецептуры эпоксигидридного связующего ЭДИ

Table 1

Formulation of EDI epoxyhydride binder

Наименование компонентов	Количество, % масс.
Эпоксидиановая смола ЭД-22	$56,7 \pm 0,2$
Отвердитель изо-МТГФА	$42,5 \pm 0,2$
Ускоритель УП-606/2	$0,8 \pm 0,05$

Для определения угла смачивания использовали приближенные расчеты по проекциям капель дистиллированной воды в качестве эталона и этилового спирта с керосином, полученных на стереомикроскопе High Cloud (Shenzhen Ksl Electronic Equipment Co., Китай). Проникающую способность и испарение с поверхности полимерного композиционного материала определяли по изменению массы образца, погруженного в течение 5 мин в одну из рабочих жидкостей.

Снимки поверхности образца стеклопластика получали с помощью стереоскопического микроскопа Stemi 2000-C (Carl Zeiss, Германия) при увеличении $\times 20$.

Для вычисления работы адгезии использовали преобразованное уравнение Дюпре-Юнга:

$$A_{адг} = \sigma_{ж-г} \cdot (1 + \cos \Theta) \quad (5)$$

$\sigma_{ж-г}$ – сила, направленная параллельно поверхности раздела «твердое тело-воздух», стремящаяся растянуть каплю по поверхности твердого тела и увеличить площадь соприкосновения поверхности «жидкость-твердое тело»; Θ – угол смачивания, между касательной к поверхности жидкости в точке соприкосновения трех фаз и поверхностью твердого тела в сторону нанесенной жидкости.

Учет шероховатости поверхности проводили по данным среднего арифметического отклонения профиля Ra, полученным на профилометре Surfest-201P (Mitutoyo, Япония) в соответствии с ГОСТ 25142-82 и краевого угла смачивания на шероховатой поверхности ($\cos\Theta_{\text{ш}}$) согласно уравнению Венцеля – Дерягина.

$$\cos\Theta_{\text{ш}} = K \cdot \cos\Theta_0 \quad (6)$$

где K – коэффициент шероховатости поверхности, определяемый как отношение площади реальной (шероховатой) поверхности к идеально гладкой (теоретической) поверхности.

Для измерения открытой пористости были подготовлены 2 серии образцов с размерами 10×10 мм, 20×20 мм, 30×30 мм, 40×40 мм, 50×50 мм, толщиной 5 мм. Образцы предварительно высушивались до постоянной массы в вакуумном сушильном шкафу ШКВ-65 (3,5) при температуре 60 °С. Взвешивание образцов проводили на электронных аналитических весах SHINKO ViBRA HT-224RCE с точностью 0,0001 г.

Определение открытой пористости проводили по методу гидростатического взвешивания в рабочей жидкости. В качестве рабочих жидкостей использованы керосин (ООО «Инмаксо-Лакра»), этиловый спирт (ОАО «Кемеровская фармацевтическая фабрика») характеристики которых представлены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-химические характеристики этилового спирта и керосина

Table 2

Physical and chemical characteristics of ethyl alcohol and kerosene

Наименование	Плотность, г/см ³	Молярная масса, г/моль	Параметр водородной связи растворителя
Этиловый спирт C ₂ H ₅ OH	0,79–82	46,07	Полярный протонный растворитель
Керосин CH ₃ (CH ₂) _{8–16} CH ₃ (97 мас. %), C ₆ H ₅ (CH ₂) _{1–4} CH ₃ (3 мас. %)	0,78–0,85	142,17–254,30	Не полярный растворитель

Открытую пористость (Π_o , %) определяли по методу Преображенского и по методу с четом объема пор согласно ГОСТ Р 56682-2015:

$$1. \quad \Pi_o = \frac{(m_2 - m)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где m – масса сухого образца на воздухе; m_1 – масса пропитанного образца в жидкости, г; m_2 – масса пропитанного образца на воздухе, г.

$$2. \quad \Pi_o = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{обр}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где общий объем образца ($V_{\text{обр}}$, см³) равен:

$$V_{\text{обр}} = V_{\text{св}} + V_{\text{в}} + V_{\text{пор}} \quad (3)$$

$$V_{\text{пор}} = \frac{(m_{\text{обр+п}} - m_{\text{сп+п}})}{\rho_{\text{сп}}} - (V_{\text{св}} + V_{\text{в}}) \quad (4)$$

$V_{\text{св}}$, $V_{\text{в}}$ – объем связующего и волокнистого наполнителя в образце, см³; $\rho_{\text{сп}}$ – плотность спирта, г/см³; $m_{\text{обр+п}}$ – масса образца и подвески на воздухе, г; $m_{\text{сп+п}}$ – масса образца и подвески погруженных в спирт, г.

Взвешивание всех образцов проводили по следующей схеме:

- Подготовка образцов;
- Измерение массы (m) образца в сухом состоянии.
- Пропитка образца в рабочей жидкости в течение суток.
- Взвешивание пропитанного образца на воздухе.
- Взвешивание пропитанного образца в рабочей жидкости.

Обсуждение результатов

Средняя шероховатость поверхности стеклопластика составила с лицевой и оборотной сторон 1,61 мкм и 5,61 мкм соответственно. Как видно из рис. 2 профиль поверхности стеклопластика относительно гладкий. Поверхность стеклопластика имеет единичные выпуклости, углубления, а также неровности в виде пузырей воздуха в матрице (рис. 3).

Для оценки смачивающей способности рабочих жидкостей путем определения краевого угла смачивания на поверхности стеклопластика получены снимки с каплями дистиллированной воды, этилового спирта и керосина (рис. 4–5). Результаты расчета по формуле 4 представлены в табл. 3. Погрешность расчета угла смачивания поверхности стеклопластика не более 5%.

По данным проекции капель видно, что керосин демонстрирует отличную смачивающую способность, но в тоже время энергия, затрачиваемая на смачивание поверхности больше, чем для этилового спирта (табл. 3). По вычисленным графическим способом данным площади занимаемой жидкостью видно, что керосин растекается по поверхности и практически не проникает вглубь стеклопластика. В то же время вода и спирт частично проникают вглубь стеклопластика. По данным скорости испарения (рис. 6) можно предположить, что значения площади занимаемой спиртом и, следовательно, работа адгезии на поверхности стеклопластика будут занижены.

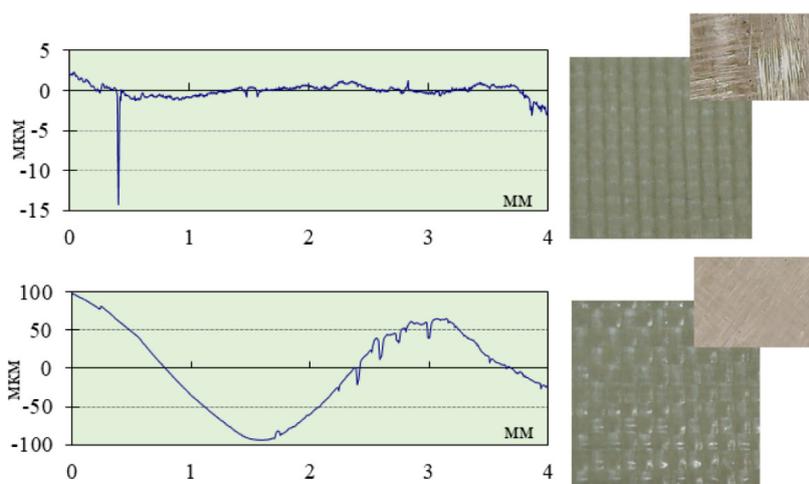


Рис. 2. Профиль поверхности стеклопластика лицевая и оборотная стороны
 Fig. 2. Surface profile of glass fiber reinforced polymer front and back side

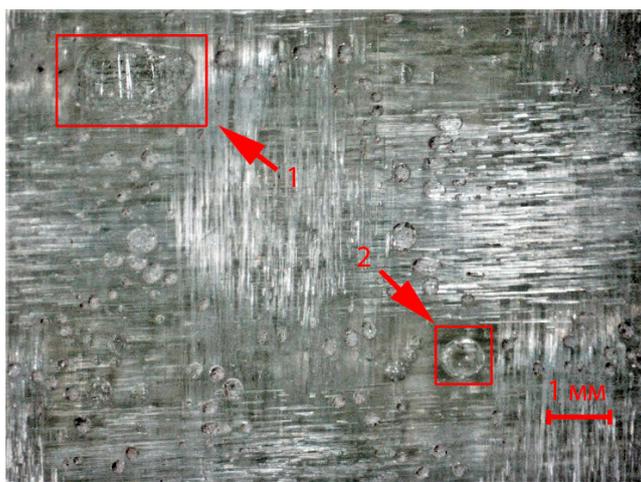


Рис. 3. Снимок поверхности стеклопластика при увеличении в 20 раз
 Fig. 3. Photograph of the fiberglass surface at 20x magnification

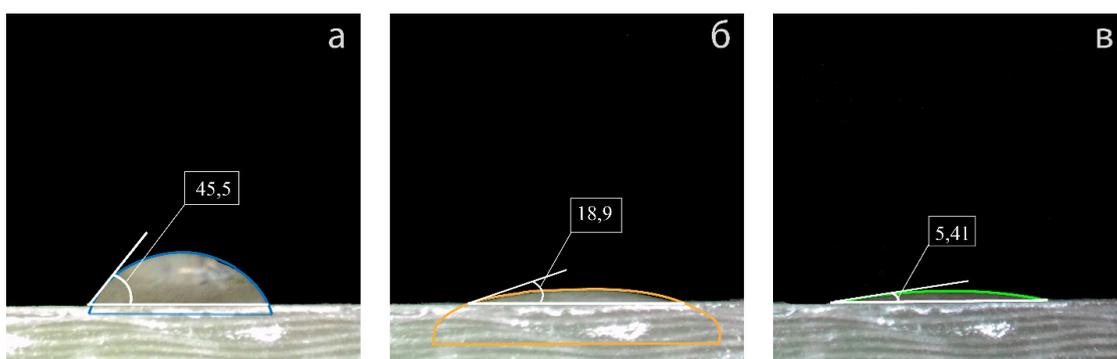


Рис. 4. Изображение капель воды (а), спирта (б) и керосина (в) вид с боковой стороны
 Fig. 4. Image of water droplets (а), alcohol (б) and kerosene (в) side view

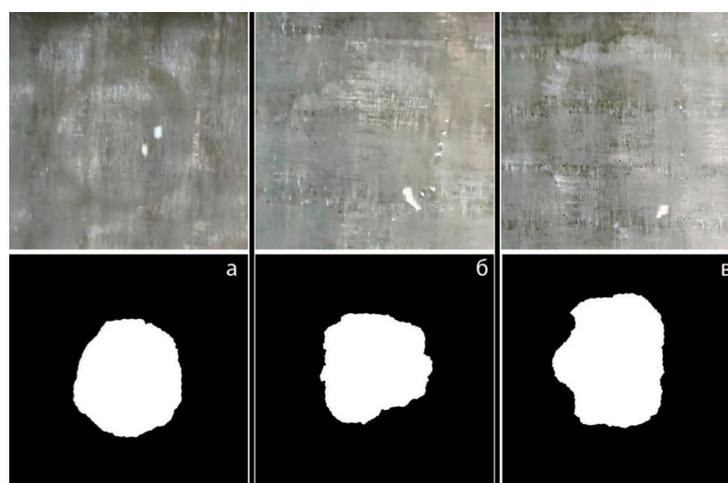


Рис. 5. Изображение и проекция капель воды (а), спирта (б) и керосина (в) вид сверху
 Fig. 5. Image of water droplets (а), alcohol (б) and kerosene (в) top view

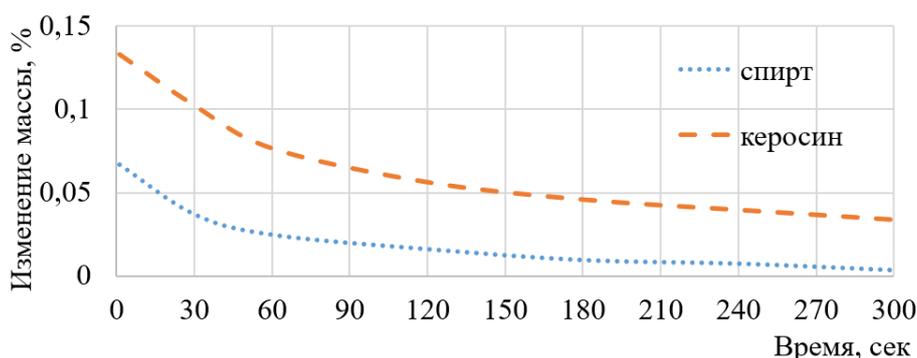


Рис. 6. Скорость испарения этилового спирта и керосина с поверхности стеклопластика
 Fig. 6. Evaporation rate of ethyl alcohol and kerosene from the surface of glass fiber reinforced polymer

Таблица 3

Результаты расчетов работы по смачиванию поверхности стеклопластика

Table 3

Results of surface wetting work calculations for glass fiber reinforced polymer

Жидкость	Площадь капли на поверхности по проекции капли вид сверху, мм ²	Коэффициент поверхностного натяжения*, мДж/м ²	Работа адгезии, мДж/м ²	Работа адгезии на идеальной поверхности, мДж/м ²
Вода	67	72,8	50,3	31,2
Спирт	44	21,0	19,9	12,3
Керосин	128	28,5	28,4	17,6

*Данные взяты с источников [14–16].

Таблица 4

Результаты расчетов открытой пористости, пустот, площади с учетом шероховатости поверхности стеклопластика различного размера

Table 4

Results of calculations of open porosity, voids, area, taking into account surface roughness of fiberglass plastics of different sizes

Соотношение сторон образца, см × см	Площадь поверхности образца S _{уд} с учетом шероховатости, см ²	П ₀ , %				Пустоты, %
		1 способ		2 способ		
		спирт	керосин	спирт	керосин	
1 × 1	4,73	0,11	0,52	10,51	6,71	8,91
2 × 2	13,01	0,11	0,38	12,09	7,87	13,16
3 × 3	24,77	0,09	0,42	9,09	4,00	15,60
4 × 4	41,23	0,05	0,36	9,90	4,21	15,57
5 × 5	62,76	0,02	0,29	9,47	5,77	14,23

По результатам гидростатического взвешивания при определении открытой пористости двумя методами заметно влияние свойств полярности и летучести жидких сред. В-первом случае, данные по открытой пористости получаются во много раз заниженными и с увеличением размера образца имеют тенденцию к снижению (табл. 4). В то же время расчет по 2 методу по-

казывает значительно высокие показатели открытой пористости, соотносимые со значениями пустот демонстрирующее снижение ошибки определения при увеличении массы с 5 г и размера образца площадью более 10 см². Однако для больших образцов ошибка расчетов критична в виду неравномерности геометрии поверхности и сложности учета технологических дефектов и требует применения неразрушающих методов контроля таких как ультразвуковая или акустическая диагностика.

Выводы

В работе проведено сравнение смачиваемости этиловым спиртом и керосином поверхности стеклопластика на основе эпоксидной смолы. По значениям краевого угла смачивания определены работы адгезии к поверхности стеклопластика с учетом идеально гладкой поверхности. Керосин показал лучшую смачивающую способность, но в то же время работа адгезии с поверхностью этилового спирта была ниже, чем у керосина. Тем не менее скорость испарения этилового спирта была значительно выше, чем у керосина, что должно быть учтено при расчете поверхностного натяжения в атмосфере воздуха и на поверхности материала.

При расчете открытой пористости метод Преображенского является неточным. Для армированных полимерных композиционных материалов стоит использовать метод с учетом плотностей, объемов армирующего материала, связующего, композита и пустот, определенных по ГОСТ 56682-2015. Таким образом при расчете открытой пористости образца следует подбирать рабочую жидкость исходя из смачивающей способности, летучести и не токсичности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Душин М.И., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Установление причин образования пористости при изготовлении ПКМ // Труды ВИАМ. 2016. Т. 42. № 6. С. 66–76.
- [2] Постнов В.И., Вешкин Е.А., Абрамов П.А. Особенности подготовки полимерного связующего для снижения пористости стеклопластиков, получаемых методом вакуумного формования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4 (2). С. 462–468.
- [3] Колпачков Е.Д., Петрова А.П., Курносоев А.О., Соколов И.И. Методы формования изделий авиационного назначения из ПКМ (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 11 (83). С. 22–36.
- [4] Лаптев А.Б., Николаев Е.В., Колпачков Е.Д. Термодинамические характеристики старения полимерных композиционных материалов в условиях реальной эксплуатации // Авиационные материалы и технологии. – 2018. № 3 (52). С. 80–88.
- [5] Jacquemin F., Vautrin A. A closed-form solution for the internal stresses in thick composite cylinders induced by cyclical environmental conditions, Composite Structure. 58 (2002) 1–9.
- [6] Каблов, Е.Н. Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) // Коррозия: материалы, защита. 2013. № 12. С. 6–18.
- [7] Трофимов А.Н, Копытин В.С., Комаров В.М. [и др.]. Формирование граничных слоёв в стеклопластиках на основе эпоксидных смол // Пластические массы. 2009. № 4. С. 16–19.
- [8] Кычкин А.К., Стручков Н.Ф., Винокуров Г.Г. Формирование пористости базальтопластиковых композиционных материалов при климатически испытаниях в условиях Севера // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26. № 1. С. 145–154.
- [9] Лукачевская И.Г. [и др.]. Оценка начальной стадии климатического старения базальто- и стеклопластиков в условиях экстремально холодного климата // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26. № 2. С. 159–169.
- [10] Bénard Q., Fois M., Grisel M. Roughness and fibre reinforcement effect onto wettability of composite surfaces, Applied surface science. 253 (10) (2007) 4753–4758.

- [11] **Миролюк А.В. [и др.]**. Особенности оценки смачивания полимерных поверхностей // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 1. №. 6 (67). С. 23–26.
- [12] **Калмыков В.В., Медведева Е.А., Конозобко Р.А.** Способы оценки краевого угла методом лежащей капли // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2020. № 1 (28). С. 51–56.
- [13] **Taghiyari H.R. [et al.]**. Penetration of different liquids in wood-based composites: The effect of adsorption energy, Forests. 12 (1) (2021) 63.
- [14] **Esumi K.** Polymer Interfaces and Emulsions, CRC Press. 1999.
- [15] **Butt H.-J., Berger R., Steffen W., Vollmer D., Weber S.A.L.** Adaptive wetting – adaptation in wetting, Langmuir. (2018) 39.
- [16] **Трушляков В.И., Куденцов В.Ю., Буряк А.К., Матюшин Д.Д.** Влияние поверхностно-активных веществ на образование капель с поверхности пленки жидкого керосина при его испарении в баке ракеты-носителя // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2017. Т. 1. № 2. С. 33–38.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВАСИЛЬЕВА Елена Дмитриевна – младший научный сотрудник, Федеральное исследовательское учреждение «Якутский научный центр СО РАН», без степени, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН.

E-mail: vasilyeva_edm@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8953-9309>

ИВАНОВ Афанасий Нюргунович – инженер-исследователь сотрудник, Федеральное исследовательское учреждение «Якутский научный центр СО РАН», без степени, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН.

E-mail: inanovafan98@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9009-3778>

СТРУЧКОВ Николай Федорович – старший научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, канд. техн. наук.

E-mail: struchkov_n@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3078-0709>

КЫЧКИН Анатолий Константинович – ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, без степени.

E-mail: kychkinplasma@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>

REFERENCES

- [1] **M.I. Dushin, K.I. Donetskiy, R.Yu. Karavayev**, Ustanovleniye prichin obrazovaniya poristosti pri izgotovlenii PKM // Trudy VIAM. 2016. Т. 42. № 6. S. 66–76.
- [2] **V.I. Postnov, Ye.A. Veshkin, P.A. Abramov**, Osobennosti podgotovki polimernogo svyazuyushchego dlya snizheniya poristosti stekloplastikov, poluchayemykh metodom vakuumnogo formovaniya // Izvestiya Samarского nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. 2011. Т. 13. № 4 (2). S. 462–468.
- [3] **Ye.D. Kolpachkov, A.P. Petrova, A.O. Kurnosov, I.I. Sokolov**, Metody formovaniya izdeliy aviatsionnogo naznacheniya iz PKM (obzor) // Trudy VIAM. 2019. № 11 (83). S. 22–36.

- [4] **A.B. Laptev, Ye.V. Nikolayev, Ye.D. Kolpachkov**, Termodinamicheskiye kharakteristiki stareniya polimernykh kompozitsionnykh materialov v usloviyakh realnoy ekspluatatsii // *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*. – 2018. № 3 (52). S. 80–88.
- [5] **F. Jacquemin, A. Vautrin**, A closed-form solution for the internal stresses in thick composite cylinders induced by cyclical environmental conditions, *Composite Structure*. 58 (2002) 1–9.
- [6] **Ye.N. Kablov, O.V. Startsev, I.M. Medvedev, S.V. Panin**, Korroziionnaya agressivnost primorskoy atmosfery. Ch. 1. Faktory vliyaniya (obzor) // *Korroziya: materialy, zashchita*. 2013. № 12. S. 6–18.
- [7] **A.N. Trofimov, V.S. Kopytin, V.M. Komarov [i dr.]**, Formirovaniye granichnykh sloyev v stekloplastikakh na osnove epoksidnykh smol // *Plasticheskiye massy*. 2009. № 4. S. 16–19.
- [8] **A.K. Kychkin, N.F. Struchkov, G.G. Vinokurov**, Formirovaniye poristosti bazaltoplastikovykh kompozitsionnykh materialov pri klimaticheskii ispytaniyakh v usloviyakh Severa // *Prirodnyye resursy Arktiki i Subarktiki*. 2021. T. 26. № 1. S. 145–154.
- [9] **I.G. Lukachevskaya [i dr.]**, Otsenka nachalnoy stadii klimaticheskogo stareniya bazalto- i stekloplastikov v usloviyakh ekstremalno kholodnogo klimata // *Prirodnyye resursy Arktiki i Subarktiki*. 2021. T. 26. № 2. S. 159–169.
- [10] **Q. Bénard, M. Fois, M. Grisel**, Roughness and fibre reinforcement effect onto wettability of composite surfaces, *Applied surface science*. 253 (10) (2007) 4753–4758.
- [11] **A.V. Mironyuk [i dr.]**, Osobennosti otsenki smachivaniya polimernykh poverkhnostey // *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. 2014. T. 1. № 6 (67). S. 23–26.
- [12] **V.V. Kalmykov, Ye.A. Medvedeva, R.A. Konozobko**, Sposoby otsenki krayevogo ugla metodom lezhashchey kapli // *Elektronnyy zhurnal: nauka, tekhnika i obrazovaniye*. 2020. № 1 (28). S. 51–56.
- [13] **H.R. Taghiyari [et al.]**, Penetration of different liquids in wood-based composites: The effect of adsorption energy, *Forests*. 12 (1) (2021) 63.
- [14] **K. Esumi**, *Polymer Interfaces and Emulsions*, CRC Press. 1999.
- [15] **H.-J. Butt, R. Berger, W. Steffen, D. Vollmer, S.A.L. Weber**, Adaptive wetting – adaptation in wetting, *Langmuir*. (2018) 39.
- [16] **V.I. Trushlyakov, V.Yu. Kudentsov, A.K. Buryak, D.D. Matyushin**, Vliyaniye poverkhnostno-aktivnykh veshchestv na obrazovaniye kapel s poverkhnosti plenki zhidkogo kerosina pri yego isparenii v bake rakety-nositelya // *Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye*. 2017. T. 1. № 2. S. 33–38.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Elena D. VASILEVA – *Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS.*

E-mail: vasilyeva_edm@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8953-9309>

Afanasiy N. IVANOV – *Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS.*

E-mail: inanovafan98@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9009-3778>

Nikolay F. STRUCHOV – *V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS.*

E-mail: struchkov_n@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3078-0709>

Anatoliy K. KYCHKIN – *V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS.*

E-mail: kychkinplasma@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>

Поступила: 29.07.2022; Одобрена: 01.08.2022; Принята: 02.08.2022.

Submitted: 29.07.2022; Approved: 01.08.2022; Accepted: 02.08.2022.

Научная статья

УДК 678

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28306>



Д.В. Гончаренко ✉, *А.А. Кирьянов*, *С.В. Кочемировская*

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

✉ honcharenkodmitry@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА НА АДГЕЗИЮ МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕР

Аннотация. В данной работе исследуется влияние лазерной обработки поверхности на адгезию между алюминиевым сплавом Д16АМ и термопластичным полиуретаном. Путем измерения предела прочности на сдвиг показано влияние: предварительной очистки поверхности алюминиевого сплава; химического травления и электрохимического анодирования; комбинации методов травления или анодирования с лазерной обработкой поверхности. Высокая плотность мощности при лазерной обработке позволяет не только модифицировать поверхность, но и очищать её от органических загрязнителей. Показано, что несколько типов комбинированной обработки металла позволяют получить сдвиговую прочность выше предела текучести полимера, и составляет не менее 50%. Кроме того, в работе показано, что влияние очередности лазерной обработки позволяет повысить предел прочности на сдвиг на 10%.

Ключевые слова: адгезия, лазерная обработка поверхности, металл-полимерный слоистый композиционный материал, термоэластопласт, травление, анодирование.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90080.

Для цитирования:

Гончаренко Д.В., Кирьянов А.А., Кочемировская С.В. Исследование влияния лазерной обработки поверхности алюминиевого сплава на адгезию металл-полимер // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 3. С. 65–74. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28306>



D.V. Goncharenko ✉, *A.A. Kiryanov*, *S.V. Kochemirovskaia*

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

✉ honcharenkodmitry@gmail.com

EFFECT OF LASER TREATMENT OF ALUMINUM ALLOY SURFACE ON METAL-POLYMER ADHESION

Abstract. This paper investigates the effect of laser surface treatment on the adhesion between D16AM aluminum alloy and thermoplastic polyurethane. By measuring the shear strength, we showed the effect of: preliminary surface cleaning of aluminum alloy; chemical etching and electrochemical anodizing; a combination of etching or anodizing methods with laser surface treatment. High power density in laser treatment allows not only modifying the surface, but also cleaning it from an organic contaminant. It is shown that several types of combined treatment of metal allow obtaining the shear strength above the yield strength of the polymer and is no less than 50%. In addition, the work shows that the effect of the sequence of laser treatment allows increasing the shear strength by 10%.

Keywords: adhesion, laser surface treatment, fiber metal laminate, thermoplastic elastomer, etching, anodizing.

Acknowledgements: The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 20-33-90080.

Citation:

D.V. Goncharenko, A.A. Kiryanov, S.V. Kochemirovskaia, Effect of laser treatment of aluminum alloy surface effect on metal-polymer adhesion, *Global Energy*, 28 (03) (2022) 65–74, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28306>

Введение. Композиты со структурой металл-полимер уже давно зарекомендовали себя как незаменимый материал во многих областях человеческой жизни. Например, использование биосовместимых полимеров в связке с металлом позволяет создавать прочные импланты, за счет металлической основы и высокой степени остеоинтеграции за счет покрытия полимером [1]. Но чаще используются металл-полимерные слоистые композиционные материалы (МПС), состоящие из чередующихся слоев металла и полимера, использующихся в качестве конструкционного материала, самым известным примером которого является часть фюзеляжа Airbus A380 [2]. Такая структура обеспечивает значительное снижение скорости роста трещин. [3]. При зарождении трещины в одном из слоев на границе раздела, ее рост замедляется, и этот эффект продолжается до появления трещины в следующем слое. По схожему механизму МПС рассеивают вибрационные колебания, и благодаря такой структуре они могут оказаться крайне востребованы как демпфирующие конструкционные материалы [4]. Для этого, в качестве полимерной составляющей используются эластомеры, позволяющие значительно повысить эффективность гашения вибраций.

Наибольший вклад в прочностные свойства слоистого композита вносят две основные составляющие: свойства его отдельных компонентов и адгезия между ними. Ввиду того что термопластичный полимер проходит стадию плавления, его сложно обработать, чтобы повысить адгезию. Вследствие чего большинство технологических процессов направлено на обработку поверхности алюминия [5]. Обработка поверхности, как правило, изменяет поверхность подложки, обеспечивая следующие характеристики: отсутствие загрязнений; смачиваемость; высокая шерохова-

тость; механическая и гидrolитическая стабильность [6]. В работе [7] описано множество методов обработки поверхности металла. Наиболее перспективными химическими методами были выбраны следующие типы обработок: Травление в сернокислом железе [8]; травление в азотной кислоте [9]; сернокислое анодирование [10]; анодирование в смеси серной кислоты с сернокислым алюминием.

Кроме химических методов, используются и физические, наиболее популярным является пескоструйная обработка [11]. Но больший интерес представляют работы, исследующие возможность повышения адгезии с помощью лазерной обработки металла [12–14].

В данной работе проводилось исследование влияния различных типов обработок поверхности алюминиевого сплава на адгезию к термопластичному полиуретану, путем измерения предела прочности на сдвиг и изучения морфологии поверхности.

Методы и материалы

Изготовление образцов. В качестве материала для изготовления образцов использованы: алюминиевый сплав Д16АМ толщиной 0,5 мм (далее алюминий); термопластичный полиуретан (ТПУ) (ООО «НПФ «Витур»), толщиной 0,1 мм. Образцы изготовлены методом горячего прессования. Две пластины размером 80×10 мм уложены в пресс-форму с нахлестом 10 мм. Между пластинами уложен 1 слой ТПУ. Температура прессования – 200 °С, время – 20 мин. Для обеспечения гарантированной толщины ТПУ, использовались вставки, ограничивающие перемещение верхней плиты.

Обработка поверхности. Образцы предварительно очищались с помощью моющих средств, и травления в 10% растворе NaOH. После чего промывались водой. Исключение составила серия образцов, обработанная лазером при разных коэффициентах заполнения (КЗ), в которой образцы алюминия были только протерты насухо, без средств очистки.

Для модификации поверхности использованы разные типы обработок, а также их сочетания. Параметры отдельных процессов указаны в табл. 1.

Таблица 1

Параметры обработки поверхности

Table 1

Surface treatment parameters

	Код	Тип обработки	Состав	Темп.	Время (скорость)	Детали
1	HNO ₃	Химический	32% HNO ₃	20 °С	1 мин	–
2	Fe ₂ (SO ₄) ₃		Fe ₂ (SO ₄) ₃ 127 г/л H ₂ SO ₄ 185 мл/л	65 °С	8 мин	–
3	H ₂ SO ₄	Электро-химический	H ₂ SO ₄ 200 мл/л	20 °С	20 мин	Плотность тока 1,5 А/дм ²
4	Al ₂ (SO ₄) ₃		Al ₂ (SO ₄) ₃ 200 г/л H ₂ SO ₄ 60 мл/л	20 °С	20 мин	
5	Лазер	Физический	–	20 °С	1 м/с	P = 10 Вт; λ = 1 мкм; КЗ = 50 %; t _{имп} = 5 нс.

Отдельно было изучено влияние коэффициента заполнения. Это параметр, характеризующийся соотношением площадей, засвеченной лазерным пучком к геометрической. Диапазон значений исследовался в пределах от 0 до 100%.

Испытания. Механические испытания предела прочности на сдвиг (сдвиговую прочность) проводились на разрывной машине Zwick//Roell Z050 с постоянной скоростью деформации 1 мм/мин. Исследования микроструктуры поверхности были проведены с помощью сканирующего электронного микроскопа Phenom Pro X.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 представлены результаты исследования влияния КЗ на сдвиговую прочность. Разница между кривыми состоит в том, что одна серия была очищена с применением моющих средств и 10% раствора NaOH, а вторая только вытерта насухо, без применения дополнительных средств очистки.

Исследование влияния КЗ показало, что обе кривые на рис. 1, в области от 0 до 50%, показывают рост сдвиговой прочности, постепенно приближаясь к максимальному значению. Дальнейшее увеличение параметра не приводит к росту прочности, и кривая выходит на плато. Предположительно это связано с тем, что морфология значительно не меняется, так как новый кратер перекрывает старый, не изменяя параметров (рис. 2). При достижении КЗ 50% разница между предварительными обработками пропадает.

Плотность мощности лазерного излучения составляет не менее 8 кВт/мм², что позволяет за 5 нс расплавить поверхностный слой алюминия. Такое количество тепла достаточно для сжигания органических веществ, таких как консервационное масло, на поверхности. Это позволяет использовать лазерную обработку одновременно как модификатор, так и как очиститель поверхности. Эффект очистки может значительно повысить технологичность предварительной обработки лазером, так как снижает затраты времени и ресурсов, а также является более экологичным и безопасным для персонала.

Образование кратеров происходит ввиду выталкивания расплавленного металла из зоны нагрева. Площадь «разбрызгивания» превышает площадь пятна лазера, ввиду чего истинный коэффициент заполнения выше, и при 50% (рис. 2, в) практически не видно областей с исходной поверхностью (рис 2, а, б). На рис. 2, г упомянутые области перекрываются, что, по-видимому, уже не вносит заметного вклада в адгезионную прочность. Дальше в работе обработка лазером будет производиться с коэффициентом заполнения равным 50%.

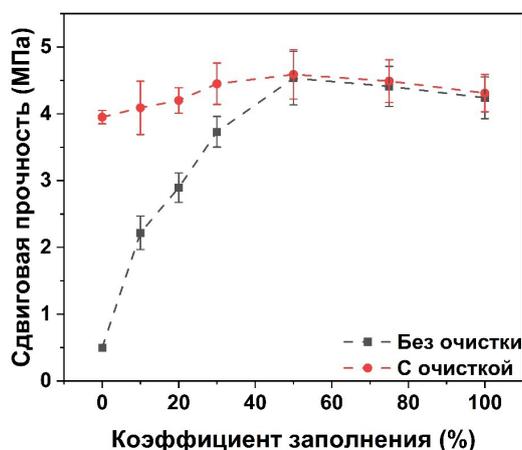


Рис. 1. Зависимость сдвиговой прочности от КЗ
 Fig. 1. Dependence of shear strength on filling ratio (FR)

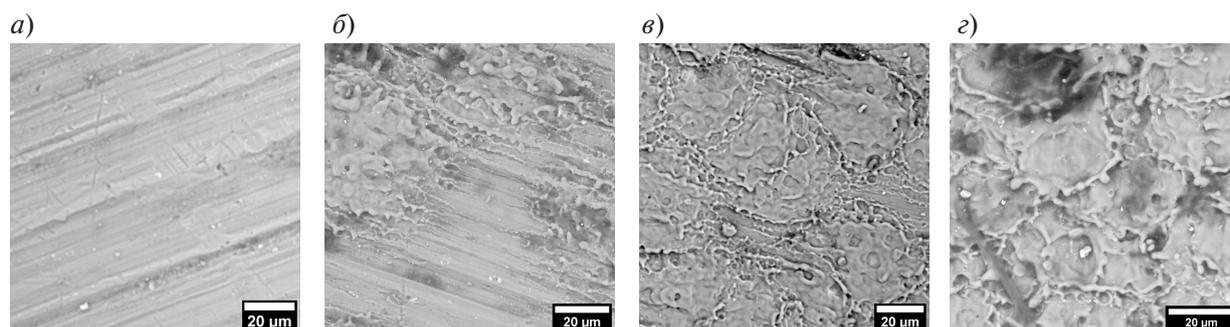


Рис. 2. Внешний вид поверхности после засветки лазером:

a – исходная поверхность; *b* – K3 20%; *c* – K3 50%; *d* – K3 100 %

Fig. 2. Surface appearance after laser exposure: *a* – original surface; *b* – 20% FR; *c* – 50% FR; *d* – 100% FR

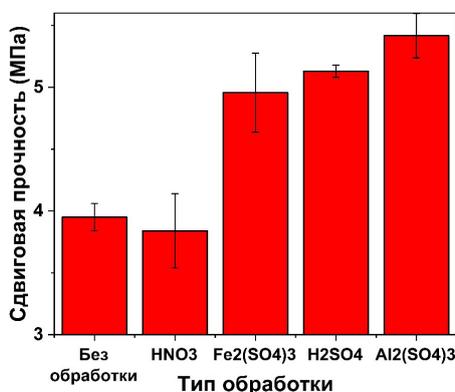


Рис. 3. Влияние типа обработки поверхности на сдвиговую прочность

Fig. 3. Surface treatment type effect on shear strength

Кроме исследования влияния обработки поверхности лазером было исследовано влияние химического травления с помощью растворов азотной кислоты и сернокислого железа, а также электрохимической обработки в электролитах на основе серной кислоты и сернокислого алюминия (табл. 1). Полученные результаты представлены на рис. 3.

Из рисунка видно, что обработка раствором HNO₃ не имеет значительного влияния на адгезию. В свою очередь, обработка Fe₂(SO₄)₃ увеличивает сдвиговую прочность более чем на 20 %. Электрохимическая обработка в сернокислом электролите показывает прирост до 28%. А добавление в состав электролита сернокислого алюминия увеличивает это значение до 35%. На рис. 4 представлена морфология поверхности для указанных типов обработки.

Данные на рис. 4 показывают, что поверхность, обработанная в растворе HNO₃, в отличие от остальных типов обработки, не имеет пор на поверхности. Максимальная пористость наблюдается при химическом травлении Fe₂(SO₄)₃.

Зачастую, для повышения адгезии, в комплексе с химической, или электрохимической обработкой, используется механическая, например, пескоструйная [15]. В данной работе проведено исследование влияния вышеупомянутых обработок в комплексе с лазерной. Дополнительно проведены исследования влияния очередности обработок. На рис. 5 показаны результаты комплексной обработки на сдвиговую прочность.

Видно, что комплексная обработка в значительной мере повышает сдвиговую прочность, и в случае использования лазера после травления в Fe₂(SO₄)₃, прирост составил в районе 20%,

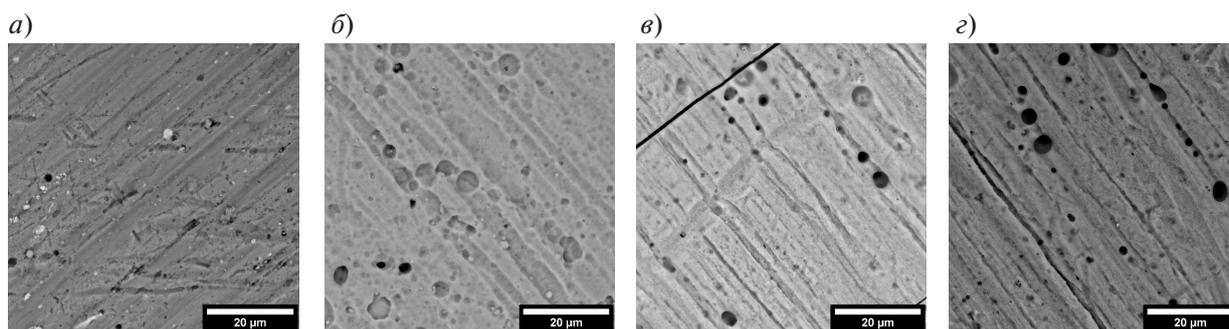


Рис. 4. Морфология поверхности в зависимости от типа обработки:

a – HNO_3 ; *б* – $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$; *в* – H_2SO_4 ; *з* – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Fig. 4. Surface morphology depending on the treatment type:

a – HNO_3 ; *b* – $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$; *c* – H_2SO_4 ; *d* – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

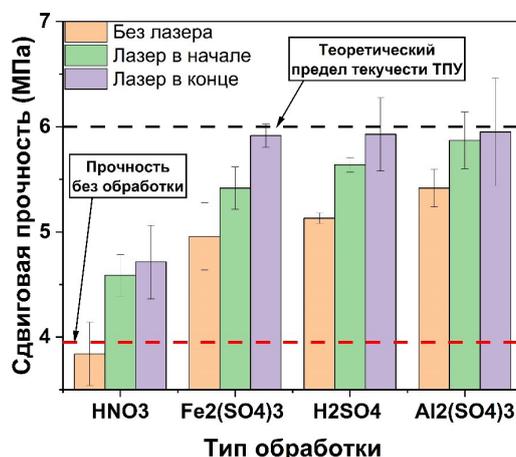


Рис. 5. Сдвиговая прочность в зависимости от типа комплексной обработки

Fig. 5. Shear strength depending on the complex treatment type

относительно травления без использования лазера. Прирост сдвиговой прочности образцов обработанных лазером после $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ составил $\approx 50\%$ от образцов без обработки. Кроме того, лазерная обработка, в большинстве случаев, оказывает больший положительный эффект, если производится после химической или электрохимической. Изменение очередности между травлением в $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ и лазерной обработкой позволило увеличить сдвиговую прочность на 10 %. Важно отметить, что теоретический предел текучести ТПУ находится в районе 6 МПа, ввиду чего невозможно оценить максимально возможные приросты прочности для $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, H_2SO_4 и $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$.

На рис. 6 показаны микроструктуры нескольких комбинированных обработок. Внешний вид обработок на фотографиях *a*, *в*, *з* слабо отличается. Практически так же выглядят и все остальные поверхности. Исключение составляет обработка $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ после лазера. Вместо «каплеобразной», поверхность имеет развитую пористость, значительно отличающуюся от той, которая получается на необработанном алюминии.

Предположительно, основным механизмом влияния лазерной обработки на прочность, образование «каплеобразных» структур, (в случае $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ – развитой пористости). Во-первых, за счет увеличения фактической площади. Во-вторых, капли (как и поры) могут увеличивать прочность контакта с полимером, за счет механического зацепления полимера за неровности.

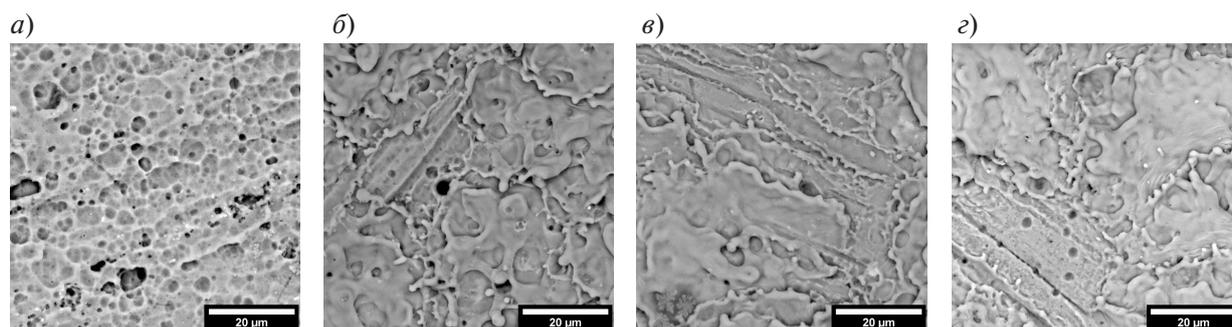


Рис. 6. Микроструктура поверхности после комбинированных обработок:
a – Лазер > $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$; *b* – $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ > Лазер; *c* – Лазер > HNO_3 ; *d* – Лазер > $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
 Fig. 6. Surface microstructure after the combined treatments:
a – Laser > $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$; *b* – $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ > Laser; *c* – Laser > HNO_3 ; *d* – Laser > $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Исходя из того, что внешний вид всех обработок, в зависимости от последовательности лазерной обработки, за исключением $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, отличается слабо, можно заключить, что разница в прочности обуславливается не только микроструктурой поверхности, но и другими параметрами. Например, свойствами оксидной пленки, которые не рассматривались в данной работе.

Заключение

В работе показано влияние лазерной обработки поверхности на адгезию между алюминиевым сплавом Д16АМ и термопластичным полиуретаном.

Благодаря высокой плотности мощности, лазерная обработка позволяет не только модифицировать поверхность, но и одновременно очищать её от органических загрязнителей.

При величине коэффициента заполнения в 50%, практически вся поверхность металла была подвергнута обработке, в результате чего увеличилась сдвиговая прочность. Дальнейшее увеличение этого параметра не привело к изменениям.

Комбинирование химической или электрохимической обработки с лазерной, позволило увеличить сдвиговую прочность на $\approx 50\%$.

Изменение очередности между травлением в $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ и лазерной обработкой позволило увеличить сдвиговую прочность на 10 %.

Лазерная обработка поверхности алюминия при производстве композиционных материалов с термопластичным полиуретаном выступает одновременно как модификатор, так и как очиститель поверхности. Эффект очистки поверхности от органических веществ может значительно повысить технологичность производства, за счет снижения затрат времени и ресурсов, а также является более экологичным и безопасным для персонала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Trauth A.** Interface characterization of hybrid biocompatible fiber-metal laminates after laser-based surface treatment / A. Trauth, C. Lohr, B. Lallinger, K.A. Weidenmann // Composite Structures. – 2022. – Vol. 281.

[2] **Kadhum A.M., Saad T. Faris, Ali A. Al-katawy.** Improvement and Properties of Fiber Metal Laminates Used in Aircraft Wing by Using Graphite-Polyester, Diyala Journal of Engineering Sciences. Vol. 12, No. 4. 2019.

[3] **Po-Yu Chang, Po-Ching Yeh, Jenn-Ming Yang.** Fatigue crack initiation in hybrid boron/glass/aluminum fiber metal laminates, Materials Science and Engineering: A, Vol. 496, Iss. 1–2. 2008. Pp. 273–280.

- [4] **Kobykhno Ilya, Didenko Andrey, Honcharenko Dmytro, Vasilyeva Ekaterina, Kudryavtsev Vladislav, Tolochko Oleg.** Development thermoplastic elastomer-based fiber-metal laminate for vibration damping application, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 30, Part 3. 2020. Pp. 393–397.
- [5] **Park Sang Yoon, Choi Won, Choi, Heung Soap, Kwon, Hyuk, Kim, Sang.** Recent Trends in Surface Treatment Technologies for Airframe Adhesive Bonding Processing: A Review (1995–2008). *Journal of Adhesion J ADHES.* 86. 2010. Pp. 192–221.
- [6] **Critchlow G.W., Brewis D.M.** Review of surface pretreatments for aluminium alloys, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 16, Iss. 4. 1996. Pp. 255–275.
- [7] **Tamer Sinmazçelik, Egemen Avcu, Mustafa Özgür Bora, Onur Çoban.** A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods, *Materials & Design*, Vol. 32, Iss. 7. 2011. Pp. 3671–3685.
- [8] **Lefebvre D., Ahn B., Dillard D. et al.** The effect of surface treatments on interfacial fatigue crack initiation in aluminum/epoxy bonds. *International Journal of Fracture* 114. 2002. Pp. 191–202.
- [9] **Gonzalez-Canche N.G., Flores-Johnson E.A., Cortes P., Carrillo J.G.** Evaluation of surface treatments on 5052-H32 aluminum alloy for enhancing the interfacial adhesion of thermoplastic-based fiber metal laminates, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 82. 2018. Pp. 90–99.
- [10] **Astrid Bjørgum, Fabrice Lapique, John Walmsley, Keith Redford.** Anodising as pre-treatment for structural bonding, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 23, Iss. 5. 2003. Pp. 401–412.
- [11] **Liu, Jiong & Chaudhury, Manoj & Berry, Douglas & Seebergh, Jill & Osborne, Joseph & Blohowiak, Kay.** Effect of Surface Morphology on Crack Growth at a Sol-Gel Reinforced Epoxy/Aluminum Interface. *Journal of Adhesion.* 82. 2006. Pp. 487–516.
- [12] **Nassier A. Nassir.** Experimental and numerical characterization of titanium-based fibre metal laminates / Nassier A. Nassir, R.S. Birch, W.J. Cantwell, D. Rico Sierra, S.P. Edwardson, G. Dearden, Z.W. Guan // *Composite Structures.* – 2020. – Vol. 245.
- [13] **Kochemirovskaia S.V., Lebedev D.V., Fogel A.A. et al.** Properties of Selenium Colloidal Solution Obtained via Laser Ablation and a Subsequent Method for Producing Highly Dispersed CuInSe₂. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 73. 2021. Pp. 646–654.
- [14] **Moldovan E.R., Concheso Doria C., Ocaña Moreno J.L., Baltes L.S., Stanciu E.M., Croitoru C., Pascu A., Terean M.H.** Geometry Characterization of AISI 430 Stainless Steel Microstructuring Using Laser. *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 67, No 2, 2022. Pp. 645–652.
- [15] **Wei-Sheng Lei, Kash Mittal.** Laser Surface Modification for Adhesion Enhancement. *Laser Technology: Applications in Adhesion and Related Areas.* Wiley Online Library, 2018. Pp. 123–174.
- [16] **Harris A.F., Beevers A.** The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 19, Iss. 6. 1999. Pp. 445–452.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГОНЧАРЕНКО Дмитрий Вячеславович – инженер-исследователь, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: honcharenkodmitry@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0827-6816>

КИРЬЯНОВ Андрей Александрович – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: Kiryanov97@mail.ru

КОЧЕМИРОВСКАЯ Светлана Валерьевна – старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: svetlanav.fokina@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7592-3860>

REFERENCES

- [1] **A. Trauth**, Interface characterization of hybrid biocompatible fiber-metal laminates after laser-based surface treatment / A. Trauth, C. Lohr, B. Lallinger, K.A. Weidenmann // *Composite Structures*. – 2022. – Vol. 281.
- [2] **A.M. Kadhum, Saad T. Faris, Ali A. Al-katawy**, Improvement and Properties of Fiber Metal Laminates Used in Aircraft Wing by Using Graphite-Polyester, *Diyala Journal of Engineering Sciences*. Vol. 12, No. 4. 2019.
- [3] **Po-Yu Chang, Po-Ching Yeh, Jenn-Ming Yang**, Fatigue crack initiation in hybrid boron/glass/aluminum fiber metal laminates, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 496, Iss. 1–2, 2008. Pp. 273–280.
- [4] **Kobykhno Ilya, Didenko Andrey, Honcharenko Dmytro, Vasilyeva Ekaterina, Kudryavtsev Vladislav, Tolochko Oleg**, Development thermoplastic elastomer-based fiber-metal laminate for vibration damping application, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 30, Part 3, 2020. Pp. 393–397.
- [5] **Park Sang Yoon, Choi Won, Choi, Heung Soap, Kwon, Hyuk, Kim, Sang**, Recent Trends in Surface Treatment Technologies for Airframe Adhesive Bonding Processing: A Review (1995–2008). *Journal of Adhesion – J ADHES.* 86. 2010. Pp. 192–221.
- [6] **G.W. Critchlow, D.M. Brewis**, Review of surface pretreatments for aluminium alloys, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 16, Iss. 4, 1996. Pp. 255–275.
- [7] **Tamer Sinmazçelik, Egemen Avcu, Mustafa Özgür Bora, Onur Çoban**, A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods, *Materials & Design*, Vol. 32, Iss. 7, 2011. Pp. 3671–3685.
- [8] **D. Lefebvre, B. Ahn, D. Dillard, et al.**, The effect of surface treatments on interfacial fatigue crack initiation in aluminum/epoxy bonds. *International Journal of Fracture* 114, 2002. Pp. 191–202.
- [9] **N.G. Gonzalez-Canche, E.A. Flores-Johnson, P. Cortes, J.G. Carrillo**, Evaluation of surface treatments on 5052-H32 aluminum alloy for enhancing the interfacial adhesion of thermoplastic-based fiber metal laminates, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 82, 2018. Pp. 90–99.
- [10] **Astrid Bjørgum, Fabrice Lapique, John Walmsley, Keith Redford**, Anodising as pre-treatment for structural bonding, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 23, Iss. 5, 2003. Pp. 401–412.
- [11] **Liu, Jiong & Chaudhury, Manoj & Berry, Douglas & Seebergh, Jill & Osborne, Joseph & Blohowiak, Kay**, Effect of Surface Morphology on Crack Growth at a Sol-Gel Reinforced Epoxy/Aluminum Interface. *Journal of Adhesion*. 82. 2006. Pp. 487–516.
- [12] **A. Nassier Nassir**, Experimental and numerical characterization of titanium-based fibre metal laminates / Nassier A. Nassir, R.S. Birch, W.J. Cantwell, D. Rico Sierra, S.P. Edwardson, G. Dearden, Z.W. Guan // *Composite Structures*. – 2020. – Vol. 245.
- [13] **S.V. Kochemirovskaia, D.V. Lebedev, A.A. Fogel, et al.**, Properties of Selenium Colloidal Solution Obtained via Laser Ablation and a Subsequent Method for Producing Highly Dispersed CuInSe₂. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 73, 2021. Pp. 646–654.
- [14] **E.R. Moldovan, C. Concheso Doria, J.L. Ocaña Moreno, L.S. Baltes, E.M. Stanciu, C. Croitoru, A. Pascu, M.H. Tiorean**, Geometry Characterization of AISI 430 Stainless Steel Microstructuring Using Laser. *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 67, No. 2. 2022. Pp. 645–652.
- [15] **Wei-Sheng Lei, Kash Mittal**, Laser Surface Modification for Adhesion Enhancement. *Laser Technology: Applications in Adhesion and Related Areas*. Wiley Online Library, 2018. Pp. 123–174.
- [16] **A.F. Harris, A. Beevers**, The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 19, Iss. 6, 1999. Pp. 445–452.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Dmitry V. GONCHARENKO – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: honcharenkodmitry@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0827-6816>

Andrey A. KIRYANOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: Kiryanov97@mail.ru

Svetlana V. KOCHEMIROVSKAIA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: svetlanav.fokina@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7592-3860>

Поступила: 31.08.2022; Одобрена: 27.09.2022; Принята: 27.09.2022.

Submitted: 31.08.2022; Approved: 27.09.2022; Accepted: 27.09.2022.

Научная статья

УДК 621.2.082.18

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28307>



Ф.А. Юнусов ✉, Т.В. Ларионова, О.В. Толочко

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

✉ yunusov.firuz@mail.ru

ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

Аннотация. С помощью механического размола с последующим компактированием методом горячего прессования были получены композиционные материалы – алюминий-фуллереновая сажа с последующим легированием. Показано влияние легирования на структуру и свойства композиционных материалов. Добавление меди и никеля привело к формированию более плотной структуры и увеличению твердости, а добавление титана и цинка практически не сказалось на структуре и твердости композита. Трибологические свойства композиционных материалов алюминий-фуллереновой сажи с легирующим элементом исследуются и сравниваются с результатами композитов алюминий-фуллереновой сажи, полученных при аналогичных условиях. Морфология поверхностей износа была исследована с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Добавление меди и никеля привело к изменению механизма трения от окислительно-адгезионного с микрорезанием к окислительному с микрорезанием.

Ключевые слова: механический размол, композиционный материал, легирующий элемент, механические свойства, трибология, механизм трения.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90079.

Для цитирования:

Юнусов Ф.А., Ларионова Т.В., Толочко О.В. Влияния легирующих элементов на структуру и свойства композиционных материалов на основе алюминия с углеродными наночастицами // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 3. С. 75–84. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28307>



F.A. Yunusov ✉, T.V. Larionova, O.V. Tolochko

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

✉ yunusov.firuz@mail.ru

INFLUENCE OF ALLOYING ELEMENTS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF ALUMINUM-BASED COMPOSITES WITH CARBON NANOPARTICLES

Abstract. Aluminum–fullerene soot composite materials with subsequent alloying were obtained by mechanical milling followed by hot press compacting. The influence of the alloying on the structure and properties of the composite materials is shown. The addition of copper and nickel led to denser structure and increased hardness, and the addition of titanium and zinc had almost no effect on the structure and hardness of the composite. The tribological properties of the aluminum–fullerene soot composites with alloying are investigated and compared with the results of the aluminum–fullerene soot composites obtained under similar conditions. The morphology of the wear surfaces was examined using scanning electron microscopy (SEM). The addition of copper and nickel resulted in a change in the friction mechanism from oxidation–adhesion with micro-cutting to oxidation with micro-cutting.

Keywords: mechanical milling, composite material, alloying element, mechanical properties, tribology, friction mechanism.

Acknowledgements: The reported study was funded by RFBR according to the research project № 20-33-90079.

Citation:

F.A. Yunusov, T.V. Larionova, O.V. Tolochko, Influence of alloying elements on the structure and properties of aluminum-based composites with carbon nanoparticles, *Global Energy*, 28 (03) (2022) 75–84, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28307>

Введение. Создание легких материалов с улучшенными механическими и физическими свойствами на сегодняшний день является актуальной задачей. Добавление углеродных наноструктур, таких как: графены [1–2], углеродные нанотрубки [3–6], фуллерены [7–8] и углеродные нановолокны [9] в металлы может значительно повысить их механические характеристики за счет дисперсного упрочнения, при этом не приводя к увеличению удельной массы и сохраняя тепло- и электропроводность на высоком уровне [10]. В работах [11–12] рассматривают влияние углеродных нанотрубок на физико-механические свойства сплава Al–Cu. Добавление углеродных нанотрубок привело к повышению твердости за счет уменьшения размера зерен и частично из-за образования карбида алюминия. Авторы работы [13] подробно изучали влияние углеродных нанотрубок на структуру и свойства сплава системы Al–Zn–Mg–Cu. В качестве исходного материала в одном случае был использован распыленный порошок сплава AA7075, а в другом – чистые металлические порошки. Показано, что при добавлении УНТ в распыленный порошковый сплав они были серьезно повреждены из-за его высокой твердости. При использовании чистых металлических порошков структурная целостность УНТ сохранилась, что привело к повышению прочности без значительной потери пластичности. В работе [14] введение легирующих происходило на предварительном этапе путем смешивания на молекулярном уровне; таким образом был получен композиционный порошок углеродные нанотрубки–медь и углеродные нанотрубки–никель. Затем полученный композиционный порошок методом размла смешивали с алюминии-

ем. Было высказано предположение, что наличие фазы Al_4C_3 на границе раздела Al-УНТ способствует лучшей передаче нагрузки между матрицей и упрочняющей углеродной фазой. Добавление Ni в композиты Al/Ni-УНТ привело к стабилизации и равномерному распределению УНТ в матрице, что оказалась причиной улучшения трибологических характеристик. Значение твердости для композитов, легированных никелем, оказалось на 27% выше, чем у композитов Al-УНТ. В композитах Al/Cu-УНТ вдоль границ зерен выделилась упрочняющая фаза Al_2Cu . Соответственно, композиты из УНТ с добавлением Cu и Ni обладают лучшими механическими свойствами, чем композиты Al-УНТ. В [15] композиты на основе алюминиевой матрицы, упрочненные углеродными нанотрубками и дополнительно легированные титаном, были получены методом порошковой металлургии путем введения в систему УНТ/Al порошков Ti. Оказалось, что добавление Ti в композит УНТ/Al привело к росту прочности (~51% UTS) по сравнению с композитом без добавления Ti, что являлось результатом комплексного эффекта УНТ, наноразмерных частиц $TiAl_3$ и уменьшения размера зерна.

Таким образом дополнительное добавление некоторых металлов в качестве легирующего элемента приводит к повышению физико-механических свойств металло-матричных композиционных материалов алюминий-углеродные наночастицы.

Целью данной работы является изучение влияния легирующих элементов на структуру и свойства композиционных материалов на основе алюминия с углеродными наночастицами.

Материалы и методы исследования

Методом порошковой металлургии были получены композиционные материалы алюминий-фуллереновая сажа-легирующий элемент. Для этой цели сначала методом механического размолва были получены композиционные порошки. В качестве исходных материалов были использованы: порошок алюминия марки ПА-4 ГОСТ 6058-73 с размером частиц до 125 мкм, фуллереновая сажа (ФС), содержащая до 30% фуллерена C_{60} , порошок никеля с размером частиц 80-100 мкм, порошок титана 80-100 и порошок цинка 80-100 мкм. В качестве поверхностно-активного вещества 1 масс.% стеариновой кислоты для предотвращения агломерации фуллереновой сажи, 3 масс.% смеси $CaCl_2$, NaCl, KCl в соотношении 2:1:1 в качестве флюса для улучшения контакта между частицами Al.

Механический размол проводился с помощью шаровой мельнице Fritsch Pulverisette 7 premium line в стальных нержавеющих стаканах объемом 80 мл. Первоначально проводили смешивание порошков со скоростью вращения 200 об/мин в течение одного часа, затем помол при 600 об/мин в течение двух часов в инертной среде. Соотношение массы размольных шаров к массе порошка составляло 10:1. Для предотвращения чрезмерного нагрева порошка измельчение проводилось с 20-минутными перерывами после каждых 15 мин измельчения.

Рентгенофазовый анализ композиционного порошкового и компактного материала проводился на дифрактометре Bruker D8 ADVANCE в $CuK\alpha$ при напряжении 30 кВ и силе тока 30 мА.

Композиционные порошки подвергали холодному прессованию при давлении 400 МПа, далее после нагрева пресс-формы до температуры 480°C и выдержки проводили горячее прессование при давлении 200 МПа.

Микротвердость по Виккерсу проверялась на приборе ZWICK ZHU 250 при нагрузке 100 Н и времени выдержки 10 с.

Металлографический анализ микроструктуры производился на оптическом микроскопе Carl Zeiss Observer D1m в диапазоне увеличений X50–1000. Микроскопические исследования проводились на сканирующем микроскопе PhenomProX.

Изучение трения проводилось на реометре DHR-2 при комнатной температуре и постоянной нагрузке 20 Н. Использовалась схема трения «кольцо-плоскость», обеспечивающая постоянство контактного давления в течение всего эксперимента. В качестве контртела было использовано

кольцо из нержавеющей стали. Были проведены ряд испытаний при скоростях скольжения 0,015, 0,03, 0,06, 0,12, 0,18, 0,24, 0,3 м/с.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 приведена краткая характеристика легирующих элементов с точки зрения их взаимодействия с элементами композита.

Таблица 1

Характеристика легирующих элементов

Table 1

Characteristics of alloying elements

Легирующий элемент	Характер взаимодействия с матрицей (Al)	Характер взаимодействия с углеродом
Cu	Входит в твердый раствор (до 5%), образует интерметаллид Al_2Cu	Не взаимодействует
Ni	Не входит в твердый раствор, образует интерметаллид Al_3Ni	Не образует карбидов, углерод растворяется в твердом растворе до 0.8%
Zn	Входит в твердый раствор (до 82%), не образует интерметаллидов	Не взаимодействует
Ti	Входит в твердый раствор (до 2%), образует интерметаллид Al_3Ti	Образует карбид TiC , углерод растворяется в твердом растворе до 2%

На рис. 1 приведена зависимость твердости композита от концентрации легирующих компонентов и микрофотографии поверхностей материалов. Чтобы оценить пористость образцов, приведены изображения нетравленных поверхностей.

Без добавления металлического легирующего композит Al-2%С имеет пористую структуру: пористость составляет около 5% со средним размером пор около 5 мкм. Но тем не менее твердость композита почти в три раза превышает твердость образца, полученного по аналогичной технологии из алюминия без добавления углерода. Упрочнение алюминиевой матрицы обусловлено образованием сложной структуры, в которой углеродные частицы оказываются связаны с матрицей когерентным карбидом. Помимо дисперсного упрочнения матрицы такая структура препятствует процессам возврата и рекристаллизации наклепанных алюминиевых частиц при компактировании.

Наиболее высокая твердость получена на материале Al-2%С с добавлением меди, и как видно на рис. 1, этот материал обладает наиболее плотной и однородной структурой. Добавление титана и цинка практически не сказалось на структуре и твердости композита. Структура образца с добавлением цинка наиболее близка к структуре образцов Al-С без добавления легирующих. Добавление никеля привело к некоторому уплотнению структуры и незначительному увеличению твердости (на 18%). Можно предположить, что одной из причин образования более плотной структуры при добавлении элементов, образующих интерметаллические соединения с алюминием, является локальный разогрев вследствие экзотермического эффекта.

На рис. 2 приведены результаты рентгенофазового анализа. Видно, что взаимодействие алюминия с углеродом и легирующими с образованием Al_4C_3 и интерметаллидов, происходит только на стадии компактирования.

На рис. 3 приведены зависимости коэффициента трения от скорости скольжения. Для всех образцов зависимость имеет единый характер: при увеличении скорости сила трения сначала убывает, а потом, достигнув минимального значения, начинает возрастать. В соответствие с этим

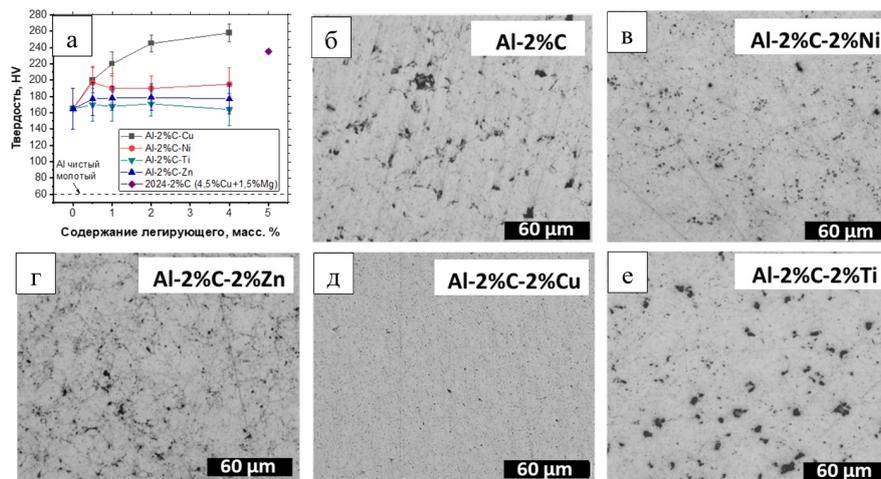


Рис. 1. Зависимость твердости композитов от концентрации легирующих (а), микроструктуры композитов с добавлением Ni (в), Zn (г), Cu (д) и Ti (е) (без травления)
 Fig. 1. The dependence of hardness of composites on the concentration of alloying agents (a), microstructure of composites with the addition of Ni (c), Zn (d), Cu (e) and Ti (f) (without etching)

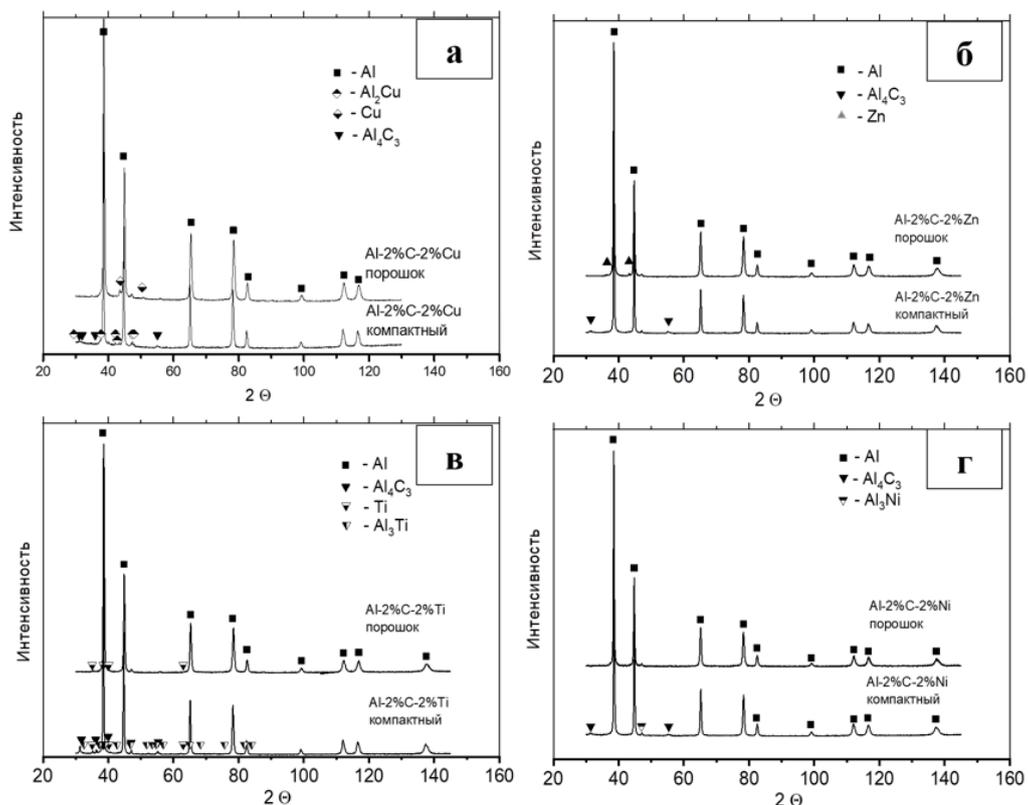


Рис. 2. Рентгенограммы порошковых и компактных композитных материалов Al-2%C-2%Me с добавлением легирующих элементов: а – Cu, б – Ni, в – Zn, г – Ti
 Fig. 2. X-ray diffraction patterns of powder and compact Al-2%C-2%Me composites with alloying elements: a – Cu, b – Ni, c – Zn, d – Ti

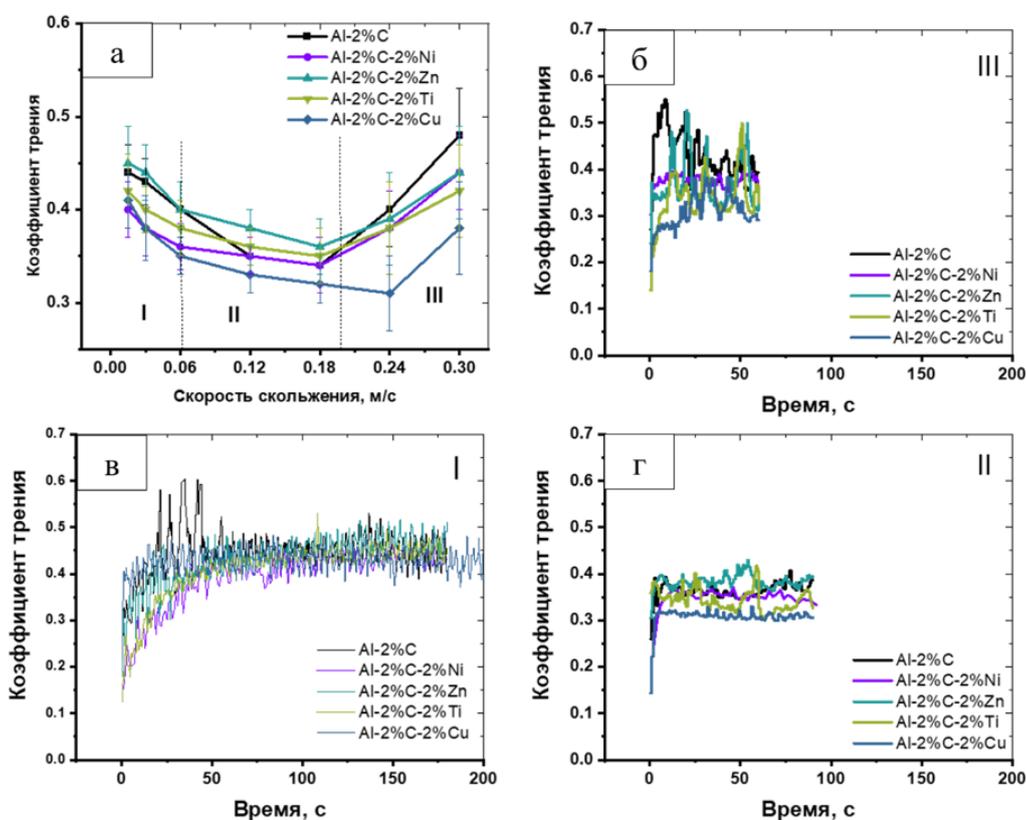


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от скорости и осциллограммы изменения силы трения от времени (а), полученные при скоростях, соответствующих различным участкам для различных режимов для композиционных материалов Al-C-легирующий элемент: 0,015 м/с (б), 0,12 м/с (в) и 0,24 м/с (г)

Fig. 3. The dependence of friction coefficient on speed and oscillograms of friction force change with time (а) obtained at speeds corresponding to different sections for different modes for composite materials Al-C-alloying element: 0.015 m/s (б), 0.12 m/s (с) and 0.24 m/s (д)

можно выделить три участка трения (рис. 3 а). На рис. 3 б-г приведены осциллограммы зависимости силы трения от времени для трех участков: II – стационарный участок соответствует нормальному режиму трения с минимальным значением силы трения и минимальными флуктуациями; I и III – участки патологических процессов, развивающихся при схватывании первого и второго рода, соответственно¹. Участок нормального режима характеризуется устойчивым значением силы трения, обусловленным минимизацией толщины деформированного слоя и образованием на трущейся поверхности защитных структур, в частности, оксидных пленок².

Устойчивые значения коэффициента трения на втором участке наблюдаются у композиционных материалов Al-2%C-2%Cu и Al-2%C-2%Ni, трение остальных материалов сопровождается значительными флуктуациями. Одна из причин наблюдаемого эффекта связана с механизмом трения.

На рис. 4 приведены СЭМ-изображения дорожек износа композиционных материалов.

На дорожке трения композита без добавления легирующих ясно видны ямки, рытвины и поперечные полосы, что является следствием окислительно-адгезионного износа с микрорезанием. Добавление меди и никеля привело к изменению механизма трения от окислительно-адгезионного с микрорезанием к окислительному с микрорезанием. А добавление цинка и титана суще-

¹ Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. Киев.: «Техника».1970. – С. 396.

² Крагельский И.В. Трение и износ. М.: «Машиностроение». 1968. – С. 475.

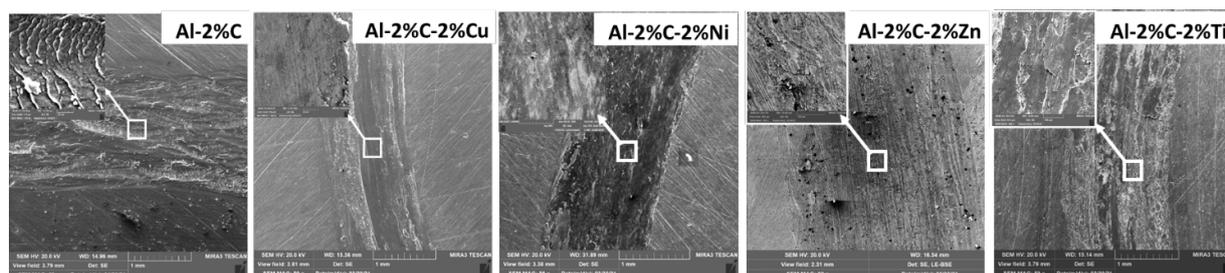


Рис. 4. СЭМ-анализ дорожки износа металло-матричных композиционных материалов Al-C-легирующий элемент
 Fig. 4. SEM analysis of the wear track of metal-matrix composites Al-C-alloy element

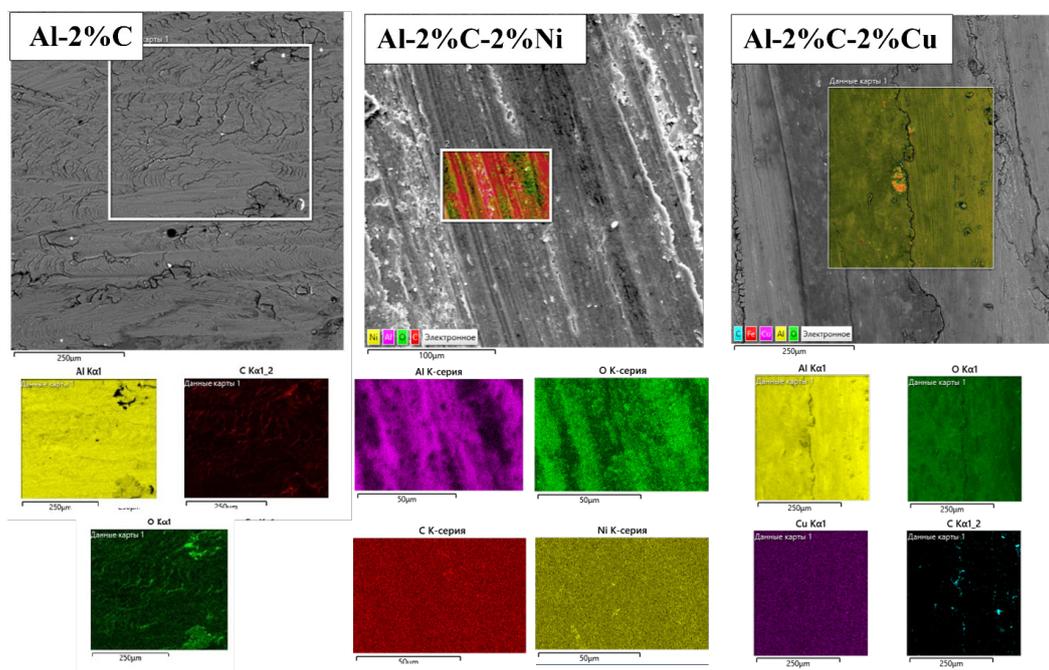


Рис. 5. ЭДС анализ изношенных поверхностей композиционных материалов
 Fig. 5. EDS analysis of worn surfaces of composite materials

ственно не изменило механизма трения. Наблюдаемые большие флуктуации на втором участке на осциллограммах этих материалов (рис. 3) косвенно подтверждают наличие адгезионной составляющей износа. Изменение механизма трения на окислительный свидетельствует о том, что скорость разрушения оксидной пленки стала ниже, чем скорость ее образования. Скорость разрушения оксидной пленки связана с пористостью и твердостью материала: чем больше пор и ниже твердость, тем выше скорость разрушения. Поэтому, добавление меди привело к очевидному расширению стационарного участка трения, что обусловлено как более высокой твердостью образца, так и более плотной (беспористой) структурой.

На рис. 5 показаны результаты энергодисперсионного анализа изношенных поверхностей.

На поверхности композита Al-2%C-2%Cu наблюдается высокая концентрация и равномерное распределение кислорода, что подтверждает, предположение, что при такой нагрузке и скорости вращения скорость разрушения оксидной пленки ниже, чем скорость ее образования. На поверх-

ностях образцов Al-2%С и Al-2%С-2%Ni кислород распределен неравномерно, что говорит о более активном разрушении оксидной пленки при этих же нагрузках.

Выводы

1. Добавление меди и никеля привело к формированию более плотной структуры и увеличению твердости, а добавление титана и цинка практически не сказалось на структуре и твердости композита.
2. Добавление меди и никеля привело к изменению механизма трения от окислительно-адгезионного с микрорезанием к окислительному с микрорезанием.
3. Добавление меди привело к очевидному расширению стационарного участка трения, что в первую очередь обусловлено низкой пористостью и более высокой твердостью образца по сравнению с другими.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Wang J., Li Z., Fan G., Pan H., Chen Z., Zhang D.** Reinforcement with Graphene Nanosheets in Aluminum Matrix, *Composites. Scripta Materialia* (66) (2012) 594–597.
- [2] **Bhagya Lakshmi Dasari, Muhammad Morshed, Jamshid M. Nouri, Dermot Brabazon, Sumsun Naher.** Mechanical properties of graphene oxide reinforced aluminium matrix composites, *Composites Part B*, (145) (2018) 136–144.
- [3] **Xu R., Tan Z., Xiong D., Fan G., Jie Zhang Q-G., Su Y., Li Z., Zhang D.** Balanced Strength and Ductility in CNT/Al Composites Achieved by Flake Powder Metallurgy via Shift-Speed Ball Milling, *Compos. Part A*, (96) (2017) 57–66.
- [4] **Shin S.E., Ko Y.J., Bae D.H.** Mechanical and thermal properties of nanocarbon-reinforced aluminum matrix composites at elevated temperatures, *Composites Part B*, (106) (2016), 66–73.
- [5] **Nam D.H., Cha S.I., Lim B.K., Park H.M., Han D.S., Hong S.H.** Synergistic Strengthening by Load Transfer Mechanism and Grain Refinement of CNT/Al–Cu Composites, *Carbon* (50) (2012) 2417–2423.
- [6] **Miranda A., Varekar N., McKay B.J.** MWCNTs and their use in Al-MMCs for ultra-high thermal conductivity applications, *Journal of Alloys and Compounds*, (774) (2019) 820–840.
- [7] **Tokunaga T., Kaneko K., Sato L., Horita Z.** Microstructure and mechanical properties of aluminum–fullerene composite fabricated by high pressure torsion, *Scripta Materialia*, (58) (2008) 735–738.
- [8] **Larionova T.V., Yunusov F.A., Bobrynina E.V., Koltsova T.S., Tolochko O.V.** Fullerene Soot-Reinforced Al-Based Composites and Their Densification Via Copper Addition, *Journal of Materials Engineering and Performance*, (29) (2020) 5195–5202.
- [9] **Рудской А.И., Толочко О.В., Кольцова Т.С., Насибулин А.Г.** Синтез углеродных нановолокон на поверхности частиц порошка алюминия // *Металловедение и термическая обработка*. 2013. № 10. С. 53–57.
- [10] **Юнусов Ф.А., Кузьменко Е.А., Новиков Е.В., Толочко О.В., Кондратьев С.Ю.** // *Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 19–24 ноября 2018г.* Институт металлургии машиностроения и транспорта. Ч. 1. СПб:Технология получения композитных материалов алюминий – углерод и изучение их структуры и свойств. ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. С. 3–5.
- [11] **Chunhong Li, Risheng Qiu, Baifeng Luan, Zhiqiang Li.** Effect of Carbon Nanotubes and high temperature extrusion on the microstructure evolution of Al–Cu alloy, *Materials science and engineering*, (704) (2017) 38–44
- [12] **Xin Meng, Tao Liu, Chunsheng Shi n, Enzuo Liu, Chunnian He, Naiqin Zhao.** *Materials Science & Engineering A*, (633) (2015) 103–111.

[13] **Run Xu, Zhanqiu Tan, Genlian Fan, Gang Ji, Ding-Bang Xiong, Qiang Guo, Yishi Su, Zhiqiang Li, Di Zhang.** High-strength CNT/Al-Zn-Mg-Cu composites with improved ductility achieved by flake powder metallurgy via elemental alloying, *Composites*, (111) (2018) 1-11.

[14] **Murugesan R., Gopal M., Murali G.** Effect of Cu, Ni addition on the CNTs dispersion, wear and thermal expansion behavior of Al-CNT composites by molecular mixing and mechanical alloying, *Applied Surface Science* (495) (2019).

[15] **Liu X.Q., Li C.J., You X., Xu Z.Y., Li X., Bao R., Ta J.M., Yi J.H.** Size-dependent effects of Ti powders in the pure aluminum matrix composites reinforced by carbon nanotubes, *Journal of Alloys and Compounds*, (823) (2020) 1–9.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЮНУСОВ Фируз Абдукадимович – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: yunusov.firuz@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4657-4467>

ЛАРИОНОВА Татьяна Васильевна – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: larionova@hotmail.com

ТОЛОЧКО Олег Викторович – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: ol_tol@hotmail.com

REFERENCES

[1] **J. Wang, Z. Li, G. Fan, H. Pan, Z. Chen, D. Zhang,** Reinforcement with Graphene Nanosheets in Aluminum Matrix, *Composites. Scripta Materialia* (66) (2012) 594–597.

[2] **Bhagya Lakshmi Dasari, Muhammad Morshed, Jamshid M. Nouri, Dermot Brabazon, Sumsun Naher,** Mechanical properties of graphene oxide reinforced aluminium matrix composites, *Composites Part B*, (145) (2018) 136–144.

[3] **R. Xu, Z. Tan, D. Xiong, G. Fan, Q-G. Jie Zhang, Y. Su, Z. Li, D. Zhang,** Balanced Strength and Ductility in CNT/Al Composites Achieved by Flake Powder Metallurgy via Shift-Speed Ball Milling, *Compos. Part A*, (96) (2017) 57–66.

[4] **S.E. Shin, Y.J. Ko, D.H. Bae,** Mechanical and thermal properties of nanocarbon-reinforced aluminum matrix composites at elevated temperatures, *Composites Part B*, (106) (2016) 66–73.

[5] **D.H. Nam, S.I. Cha, B.K. Lim, H.M. Park, D.S. Han, S.H. Hong,** Synergistic Strengthening by Load Transfer Mechanism and Grain Refinement of CNT/Al–Cu Composites, *Carbon* (50) (2012) 2417–2423.

[6] **A. Miranda, N. Varekar, B.J. McKay,** MWCNTs and their use in Al-MMCs for ultra-high thermal conductivity applications, *Journal of Alloys and Compounds*, (774) (2019) 820–840.

[7] **T. Tokunaga, K. Kaneko, L. Sato, Z. Horita,** Microstructure and mechanical properties of aluminum–fullerene composite fabricated by high pressure torsion, *Scripta Materialia*, (58) (2008) 735–738.

[8] **T.V. Larionova, F.A. Yunusov, E.V. Bobrynina, T.S. Koltsova, O.V. Tolochko,** Fullerene Soot-Reinforced Al-Based Composites and Their Densification Via Copper Addition, *Journal of Materials Engineering and Performance*, (29) (2020) 5195–5202.

- [9] **A.I. Rudskoy, O.V. Tolochko, O.V. Koltsova, A.G. Nasibulin**, Sintez uglirodnykh nanovolokon na pov-
erkhnosti chastits poroshka alyuminiya // *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka*. 2013. № 10. С. 53–57.
- [10] **F.A. Yunusov, Ye.A. Kuzmenko, Ye.V. Novikov, O.V. Tolochko, S.Yu. Kondratyev**, // *Nedelya nauki SP-
bPU: materialy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem*, 19–24 noyabrya 2018 g. Institut met-
allurgii mashinostroyeniya i transporta. Ch. 1. SPb:Tekhnologiya polucheniya kompozitnykh materialov aly-
uminiy – uglirod i izucheniye ikh struktury i svoystv. POLITEKk-PRESS, 2018. S. 3–5.
- [11] **Chunhong Li, Risheng Qiu, Baifeng Luan, Zhiqiang Li**, Effect of Carbon Nanotubes and high tempera-
ture extrusion on the microstructure evolution of Al-Cu alloy, *Materials science and engineering*, (704) (2017)
38-44
- [12] **Xin Meng, Tao Liu, Chunsheng Shi n, Enzuo Liu, Chunnian He, Naiqin Zhao**, *Materials Science & En-
gineering A*, (633) (2015) 103–111.
- [13] **Run Xu, Zhanqiu Tan, Genlian Fan, Gang Ji, Ding-Bang Xiong, Qiang Guo, Yishi Su, Zhiqiang Li, Di
Zhang**, High-strength CNT/Al-Zn-Mg-Cu composites with improved ductility achieved by flake powder met-
allurgy via elemental alloying, *Composites*, (111) (2018) 1–11.
- [14] **R. Murugesan, M. Gopal, G. Murali**, Effect of Cu, Ni addition on the CNTs dispersion, wear and ther-
mal expansion behavior of Al-CNT composites by molecular mixing and mechanical alloying, *Applied Surface
Science* (495) (2019).
- [15] **X.Q. Liu, C.J. Li, X. You, Z.Y. Xu, X. Li, R. Bao, J.M. Ta, J.H. Yi**, Size-dependent effects of Ti powders
in the pure aluminum matrix composites reinforced by carbon nanotubes, *Journal of Alloys and Compounds*,
(823) (2020) 1–9.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Firuz A. YUNUSOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: yunusov.firuz@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4657-4467>

Tatiana V. LARIONOVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: larionova@hotmail.com

Oleg V. TOLOCHKO – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: ol_tol@hotmail.com

Поступила: 06.09.2022; Одобрена: 09.09.2022; Принята: 16.09.2022.
Submitted: 06.09.2022; Approved: 09.09.2022; Accepted: 16.09.2022.