

Том 26, №1, 2020



Научно-технические ведомости СПбПУ.

Естественные и инженерные науки

Санкт-Петербург

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбПУ. ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ НАУКИ
ST. PETERSBURG POLYTECHNIC UNIVERSITY
JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES AND TECHNOLOGY

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., главный редактор, научный руководитель
СПбПУ, академик РАН

Вайсберг Л.А., академик РАН

Згуровский М.З., ин. член РАН, академик НАН Украины

Клименко А.В., д-р техн. наук, академик РАН

Костюк В.В., академик РАН

Лагарьков А.Н., академик РАН

Окрепилов В.В., академик РАН

Патон Б.Е., академик НАН Украины и РАН

Рудской А.И., академик РАН

Федоров М.П., академик РАН

Фортвов В.Е., академик РАН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., главный редактор, научный руководитель
СПбПУ академик РАН

Кондратьев С.Ю., зам. главного редактора, д-р техн. наук,
профессор СПбПУ

Аксёнов Л.Б., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Баикарев А.А., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Гордеев С.К., д-р техн. наук, ст. научн. сотр. ЦНИИМ

Гуменюк В.И., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Забойн В.Н., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Каляев И.А., д-р техн. наук, академик РАН

Колсун Михал, профессор Технического университета
г. Кошице (Словакия)

Кириллов А.И., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

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

Митяков А.В., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Михайлов В.Г., д-р техн. наук, профессор Бранденбургского
ТУ (Германия)

Райчик Ярослав, д-р техн. наук, профессор Ченстоховского
политехнического университета (Польша)

Рамасуббу С., PhD, Директор по исследованиям BISS,
ITW-India (P) Ltd (Индия)

Сергеев В.В., д-р техн. наук, профессор, проректор СПбПУ
чл-корр РАН,

Тендлер М.Б., ин. член РАН, KTH Royal Institute
of Technology (Швеция)

Титков В.В., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Толочко О.В., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Фокин Г.А., д-р техн. наук, генеральный директор
ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»

Цеменко В.Н., д-р техн. наук, зав. каф. СПбПУ

Журнал 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.

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).

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ № ФС77-69285 от 6 апреля 2017 г.)

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

Vaisberg L.A. — full member of the Russian Academy of Sciences

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

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

Kostiuk V.V. — full member of the Russian Academy of Sciences

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

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

Paton B.E. — full member of the Russian Academy of Sciences and the National Academy of Sciences of Ukraine

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

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

Fertov V.E. — full member of the Russian Academy of Sciences

JOURNAL 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

Kondrat'ev S.Yu. — deputy editor-in-chief, Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Aksenov L.B. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Bashkarev A.Ya. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Gordeev S.K. — Dr.Sc. (tech.), prof. CNIIM

Gumenyuk V.I. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Zaboin B.N. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

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

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

Kirillov A.I. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Korovkin N.V. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Mityakov A.V. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Michailov V.G. — Dr.Sc. (tech.), prof. BTU (Germania)

Raychik Ya. — Dr.Sc. (tech.), 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. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU, corresponding member of the RAS

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

Titkov V.V. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Tolochko O.V. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Fokin G.A. — Dr.Sc. (tech.), General Director of LLC «Gazprom Transgaz St. Petersburg»

Tsamenko V.N. — Dr.Sc. (tech.), Head of Chair SPbPU

С 2005 года журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Научной электронной библиотеки на сайте <http://www.elibrary.ru>

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

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

Тел. редакции (812) 294-22-86.

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2020

Содержание

Энергетика

- Селезнёв Д.А., Грешняков Г.В.** Применение резистивно-емкостного принципа регулирования электрического поля кабельных муфт на 110 кВ 5
- Коленько Г.С., Ласкин А.С.** Нестационарные и осредненные аэродинамические нагрузки, действующие на рабочие лопатки разной геометрии 15

Машиностроение

- Арсентьева К.С., Мамутов В.С.** Учет скоростей деформации в программном комплексе LS-DYNA® при тонколистовой вытяжке 29

Металлургия и материаловедение

- Озерской Н.Е., Попович А.А., Ермаков Б.С.** Плазмохимический синтез нанодисперсного порошка кремния и его использование в качестве анода литий-ионного аккумулятора. 41
- Григорьев А.А., Дмитрюк А.И.** Расчет технологических параметров экструзии брикетов порошков алюминия 53
- Кончус Д.А., Сивенков А.В., Михайлов А.В., Пряхин Е.И.** Влияние лазерной маркировки на коррозионную стойкость нержавеющей стали 62

Хроника

- Морачевский А.Г.** Дмитрий Иванович Менделеев. 150 лет периодической системе элементов 75
- Шестакова Т.П.** Инженер Алексей Васильевич Лавров 84

Contents

Power Engineering

Seleznev D.A., Greshnyakov G.V. Application of the resistive-capacitive principle of regulating the electric field of cable couplings for 110 kV	5
Kolenko G.S., Laskin A.S. Unsteady and averaged aerodynamic loads acting on rotor blades of different geometry	15

Mechanical engineering

Arsentyeva X.S., Mamutov V.S. Strain rate influence on thin sheet metal drawing simulation using LS-DYNA®	29
--	----

Metallurgy and materials science

Ozerskoi N.E., Popovich A.A., Ermakov B.S. Plasmachemical synthesis of nanodispersed silicon powder and its use as anode in lithium-ion battery	41
Grigoriev A.A., Dmitryuk A.I. Calculation of technology parameters of aluminum powder extrusion	53
Konchus D.A., Sivenkov A.V., Mikhajlov A.V., Pryakhin E.I. The laser marking influence on the stainless steel corrosion resistance	62

Chronicle

Morachevskij A.G. Dmitri Ivanovich Mendeleev. 150 years of the periodic system of elements	75
Shestakova T.P. Engineer Alexey Vasilievich Lavrov	84

DOI: 10.18721/JEST.26101
УДК 621.3

Д.А. Селезнёв, Г.В. Грешняков

НИИ «Севкабель», Санкт-Петербург, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗИСТИВНО-ЕМКОСТНОГО ПРИНЦИПА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КАБЕЛЬНЫХ МУФТ НА 110 КВ

В статье речь идет о применении в качестве усиливающей изоляции муфт на 110 кВ трубки-регулятора (многофункциональный элемент), работа которого основана на использовании в качестве элементов, выравнивающих поле, термоусаживаемых трубок со специальными свойствами. В этой работе рассматриваются ключевые особенности моделирования конструкции трубки-регулятора и ее оптимизации, выполненной в виде совокупности нескольких термоусаживаемых трубок с заданными параметрами. Оптимизация конструкции и анализ ее работоспособности проводился в специализированном программном комплексе ELCUT Professional. В ходе работы был найден общий оптимальный вид конструкции, параметры каждого отдельного элемента трубки-регулятора. Так же были найдены наиболее уязвимые зоны, в которых значение напряженности электрического поля достигает наиболее высоких значений. Даны рекомендации по устройству конструкции для получения лучшей из возможной картины распределения электрического поля в кабельной разделке.

Ключевые слова: трубка-регулятор, кабельная муфта, компьютерное-моделирование, резистивно-емкостной метод, ELCUT.

Ссылка при цитировании:

Селезнёв Д.А., Грешняков Г.В. Применение резистивно-емкостного принципа регулирования электрического поля кабельных муфт на 110 кВ // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2020. Т. 26, № 1. С. 5–14. DOI: 10.18721/JEST.26101

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

D.A. Seleznev, G.V. Greshnyakov

Research institute «Sevkabel», St. Petersburg, Russia

APPLICATION OF THE RESISTIVE-CAPACITIVE PRINCIPLE OF REGULATING THE ELECTRIC FIELD OF CABLE COUPLINGS FOR 110 KV

The article deals with the use of a tube-regulator (multifunctional element) as reinforcing insulation for 110 kV couplings, the operation of which is based on the use of heat-shrinkable tubes with special properties as elements that leveling the field. In this paper, we consider the key features of modeling the design of the tube-regulator and its optimization, made in the form of a combination of several heat-shrinkable tubes with specified parameters. Optimization of the design and analysis of its performance was carried out in a specialized software package ELCUT Professional. In the course of the work, a general optimal view of the structure and the parameters of each individual element of the tube-regulator were found. The most vulnerable zones were also found in which the electric field strength reaches the highest values. Recommendations are given on the arrangement of the structure to obtain the best possible picture of the distribution of the electric field in cable cutting.

Keywords: tube-regulator, cable coupling, computer simulation, resistive-capacitive method, reinforcing insulation, ELCUT.

Citation:

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

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Постоянное развитие в энергетике неразрывно связано с развитием технологий по передаче электроэнергии потребителям на расстоянии. Кабельная линия – это объект, который служит для передачи электрической энергии. Сейчас, с постоянно растущим населением в городах, а, следовательно, и уплотнения застройки, требуется прокладка, которая максимально снижала бы границы отчужденной зоны. С этой задачей бесспорно лучше всего справляются кабельные линии, которые прокладываются под землей [10, 11]. Неотъемлемой частью кабельной линии является кабельная муфта. Из-за того, что требуется передавать энергию на значительные расстояния, а стандартные строительные длины кабелей, которые выходят с предприятий чаще всего составляют 250–300 м, то практически в любой линии будет присутствовать соединительная муфта.

По результатам анализа аварийных ситуаций на кабельных линиях, можно сказать, что значительная часть аварий происходит в местах соединения кабельных отрезков. Это связано с тем, что в местах разделки происходит нарушение конструкции кабеля [13]. В результате чего, появляется касательная (тангенциальная) составляющая электрического поля, которая оказывает наиболее негативный эффект в работу муфт.

Надежность и срок службы муфт напрямую зависит от совершенства их конструкции [15]. Вопросам по анализу электрических полей в усиливающей изоляции посвящено значительное число работ [14]. В [5] на основе анализа электрического поля в кабельных разделках кабеля из бумажно-пропитанной изоляции, показана методология создания усиливающей изоляции концевых муфт. В [6] распределение электрического поля в соединительной муфте, которая может применяться для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, исследуется

при помощи интегральных уравнений. В результате этой работы была получена эмпирическая формула для расчета касательной составляющей напряженности электрического поля между основной изоляцией кабеля и усиливающей изоляции муфты. Так же ранее авторами был проведен тщательный анализ стресс-конуса соединительной муфты на 110 кВ, с определением всех критических зон в конструкции [3], значение напряженности поля в которых, после проведения полной оптимизации геометрических и физических параметров, достигло минимальных значений [1, 7].

Цель настоящей работы – подтвердить возможность замены существующих сейчас стресс-конусов, работающих на принципе емкостного снижения неравномерности поля [9], термоусаживаемой трубкой-регулятором. Получить на базе моделирования оптимальную конструкцию многофункционального элемента. Рассматриваемый критерий – минимальное значение напряженности электрического поля (его касательной составляющей, которая не должна превышать значение в 5 кВ/мм) в выделенных критических зонах.

Методология исследования

Значение потенциала жилы задавалось равным амплитудному значению фазного напряжения, потенциал экрана принимался равным нулю. Полупроводящая вставка нашего многофункционального элемента электрически соединена с заземлённым экраном кабеля, выполняющая функцию восстановления «обрезанного» экрана. По предложенному алгоритму решалась задача расчета электрического поля переменного тока. Учитывая синусоидальность поля во времени, уравнения ниже записаны относительно комплексных величин (электрического потенциала U , вектора плотности тока j , напряженности электрического поля E) [4].

Формулировка задачи для численного решения основана на уравнении Пуассона, описывающего электростатическое поле:

А также на уравнении растекания токов в проводящей среде:

При учете закона Ома:

Тогда уравнение для потенциала U приобретает вид:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot (\varepsilon \cdot \mathbf{E}) &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{j} &= 0 \\ \mathbf{j} &= \nu \cdot \mathbf{E} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\nabla \cdot \left[\left(\varepsilon - \frac{i\gamma}{\omega} \right) \nabla U \right] = 0$$

Используя связь $\mathbf{E} = -gradU$ можно рассчитать значения напряжённости электрического поля в любой точке модели.

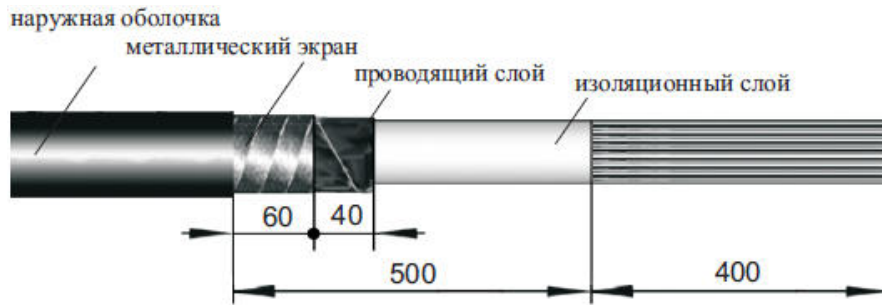


Рис. 1. схематическое изображение разделки кабеля из СПЭ изоляции
Fig. 1. Schematic picture of a cable handling from SPE insulation

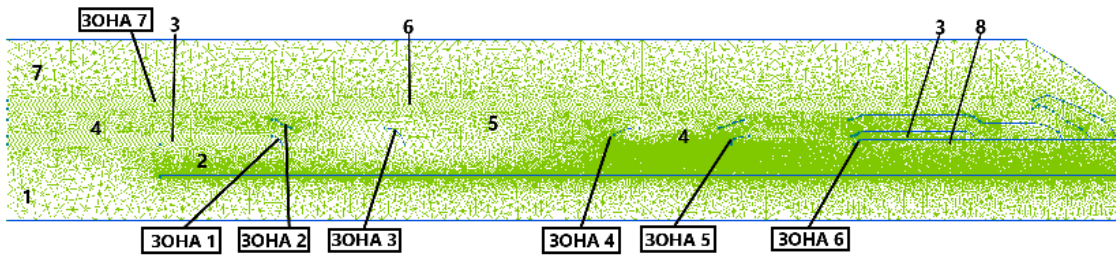


Рис. 2. Предварительная конструкция трубки-регулятора с критическими зонами: 1 – Токопроводящая жила с соединительной гильзой; 2 – Основная изоляция кабеля; 3 – Первый слой многофункционального элемента над гильзой и над полупроводящим экраном по изоляции (полупроводящая вставка или п/пВ); 4 – Второй слой многофункционального элемента с высоким значением диэлектрической проницаемости (диэлектрический экран или ДЭ); 5 – Подмотка; 6 – Третий слой (большой ДЭ); 7 – Верхний изоляционный слой

Fig. 2. Preliminary design of the tube-regulator with critical zones: 1 – Conductor lead with a connecting sleeve; 2 – Main cable insulation; 3 – The first layer of the multifunctional element above the sleeve and above the semiconducting screen for insulation (semiconducting insert or s/cI); 4 – The second layer of a multifunctional element with a high dielectric constant (dielectric screen or DS); 5 – Winding; 6 – Third layer (large DS); 7 – Top insulation layer

Первое уравнение описывает электростатику, где E напряженность потенциального поля, источником которого являются заряды с плотностью ρ .

Решения выше перечисленных уравнений проводятся при помощи метода конечных элементов (МКЭ), на котором основана программа ELCUT¹.

Начальная теория. Проведя анализ разделки высоковольтного кабеля из СПЭ изоляции [12] (см. рис. 1), была построена первоначальная модель трубки-регулятора (см. рис. 2).

В этой модели было изначально известно, что первый слой, который укладывается на срез экранов по изоляции и на соединительную гильзу, должен иметь полупроводящие свойства, для того чтобы «оттягивать» силовые линии от углов гильзы и от среза экранов, используя резистивный способ регулирования поля[8,

¹ ELCUT 6.3. Руководство пользователя. ООО «ТОР». СПб., 2018.

13]. Поверх полупроводящего элемента (вставки) необходимо усадить материал с высоким значением диэлектрической проницаемости, для выравнивания линий напряженности поля при помощи рефракционного метода. Так же можно было сказать, что необходимо, после усадки «3» и «4», выровнять геометрию нашей конструкции, для дальнейшего центрированного наложения последующих слоев. Поэтому элементом «5» является подмотка, которая должна выполнить эту функцию.

После проведения нескольких этапов моделирования, так же были выделены наиболее уязвимые критические области (зоны), в которых значение напряженности достигает максимального значения (см.рис.2).

Этапы моделирования. После определения состава трубки-регулятора и определения всех критических зон в модели, были поставлены пошаговые этапы оптимизации первоначальной конструкции многофункционального элемента:

1. Длина полупроводящей вставки;
2. Разность длин полупроводящей вставки (п/пВ) и диэлектрического экрана (ДЭ);

3. Толщина п/пВ;
4. Толщина ДЭ;
5. Толщина подмотки над ДЭ;
6. Толщина верхнего изоляционного слоя;
7. Толщина большого ДЭ.
8. Расстояние м/у диэлектрическими экранами (усаженными над гильзой и над п/п экраном по изоляции);
9. Диэлектрическая проницаемость п/пВ (в случае, если убрать полупроводящий слой);
10. Диэлектрическая проницаемость ДЭ;
11. Значение электропроводности п/пВ.

Ранее, при исследовании стресс-конуса, нами было обнаружено, что при использовании соединительной гильзы длиной 150 мм или 160 мм, нет разницы в распределении электрического поля в усиливающей изоляции муфт [1], поэтому в данном моделировании была использована гильза длина 150 мм.

Исследование зависимости напряженности электрического поля от длины полупроводящей вставки над гильзой в зоне 1 и от длины полупроводящей вставки над экраном по изоляции в зоне 5 (как со стороны усиливающей изоляции (ус.из), так и со стороны основной изоляции кабеля).

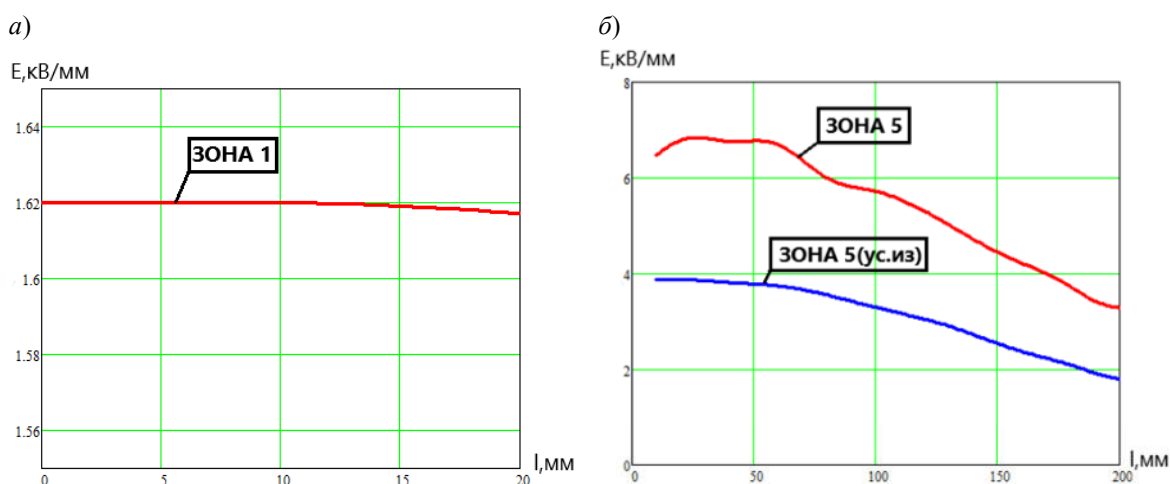


Рис. 3. Графики зависимости напряжённости электрического поля: а) от края соединительной гильзы до края п/пВ над ней; б) от среза полупроводящего экрана по изоляции до края п/пВ над экраном

Fig. 3. Graphs of the dependence of the electric field: а) from the edge of the connecting sleeve to the edge s/cI above it; б) from the cut of the semiconducting screen for insulation to the edge of the s/cI above the screen

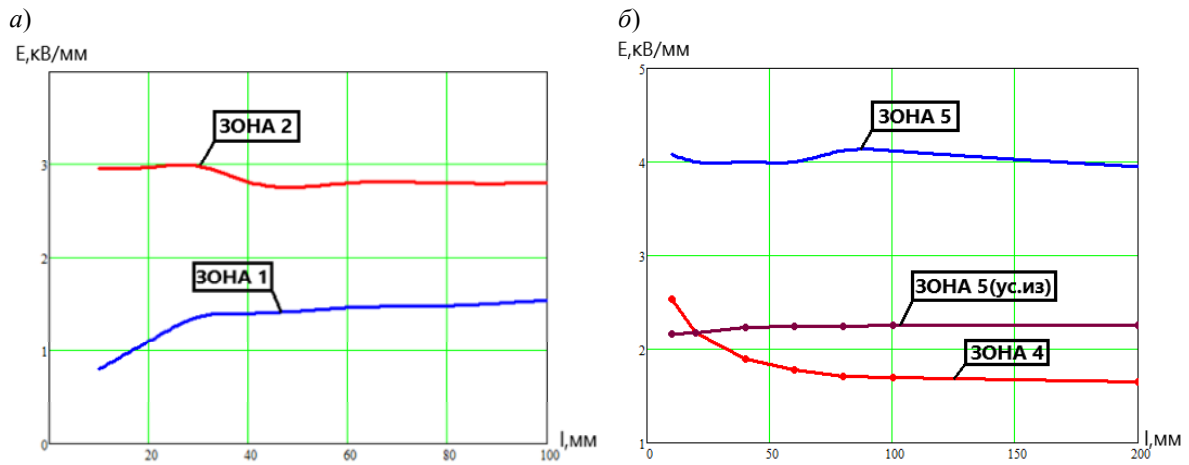


Рис. 4. Графики зависимостей напряженности электрического поля от расстояния между краем п/пВ и краем ДЭ: а) над гильзой, б) над срезом п/п экрана по изоляции

Fig. 4. Graphs of the dependence of the electric field on the distance between the edge of the s/cI and the edge of the DS: а) above the sleeve, б) above the cut of the s/c of the screen for insulation

На первом этапе были рассмотрены зависимости напряженности поля от длин п/пВ, которая заступает за край гильзы и п/п экрана по изоляции. В этом расчете было принято допущение, что все остальные элементы изоляционные, без специальных свойств. В результате получили графики, указанные на рис. 3, а, б. Из этих графиков можно выделить следующее: во-первых, значение E у гильзы изначально не превышает допустимых значений (5 кВ/мм – касательная составляющая), поэтому не имеет смысла делать её слишком длинной, иначе габариты конструкции значительно увеличатся; во-вторых, значения напряженности поля в зоне 5 значительно меняется с изменением длины, но в связи с нежеланием сильно увеличивать габариты муфты, была выбрана величина равная 120 мм.

Исследование зависимости напряженности электрического поля от расстояния между краем п/пВ и ДЭ над гильзой в зонах 1, 2 (а) и над п/п экраном по изоляции в зонах 4, 5 (б).

Проведя анализ двух полученных графиков (см.рис. 4, а, б) можно сказать, что оптимальным расстоянием между краем п/пВ и

ДЭ в обоих случаях будет равно примерно 55 мм. Так как дальнейшее увеличение в первом случае ведёт к увеличению напряженности поля в зоне 1, при этом значение в зоне 2 не уменьшается. Во втором случае снижение в зоне 4 достигло своего пика, и дальнейшее увеличение расстояние не приводит к значительным изменениям E в рассмотренных областях.

Исследование толщины полупроводящих вставок и диэлектрических экранов

При исследовании толщин п/пВ и ДЭ (см. рис. 5 а, б) было принято допущение, что изменения над гильзой и над срезом полупроводящего экрана по изоляции будут проходить идентично, поэтому на данных графиках показаны зоны только над гильзой.

При увеличении толщины полупроводящей вставки значение напряженности поля в зоне 1 уменьшается, но при этом даже при значении в 5 мм оно не превышает допустимого значения, поэтому было принято значение в 5 мм.

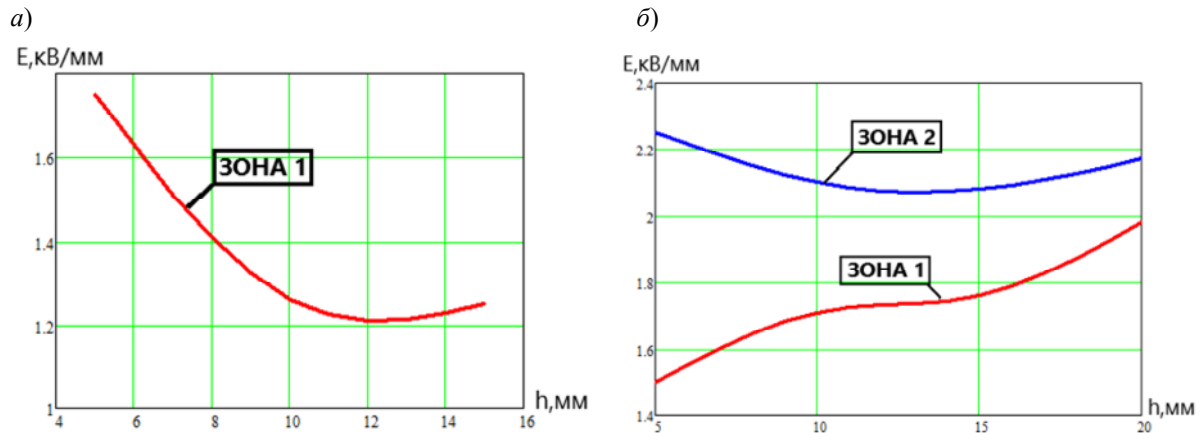


Рис. 5. Графики зависимостей: а) напряженности электрического поля в зоне 1 от толщины п/пВ; б) напряжённости электрического поля в зонах 1,2 от толщины ДЭ

Fig. 5. Dependence graphs: а) electric field strength in zone 1 on thickness of s/cI; б) electric field strength in zones 1 and 2 on thickness of DS

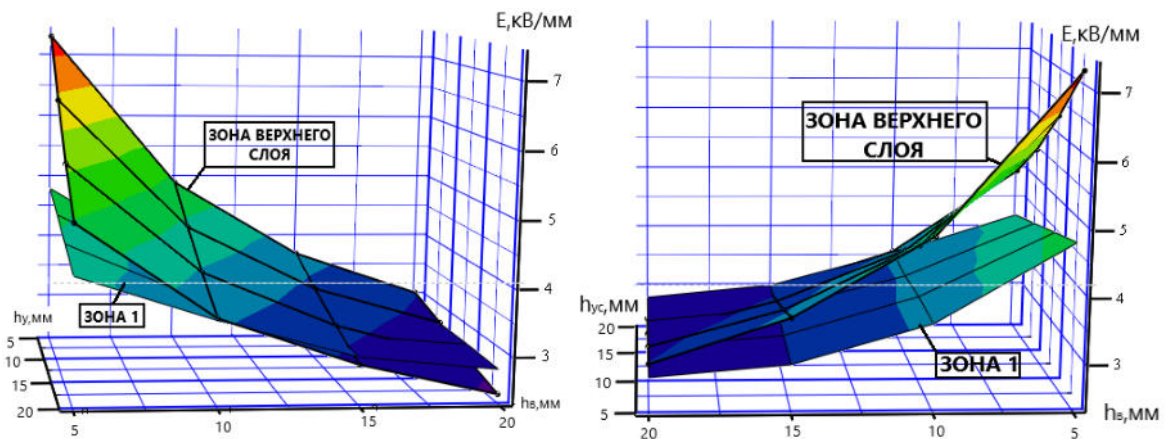


Рис. 6. Графики зависимостей напряженности электрического поля в зоне 1 и в зоне верхнего слоя (зона 7) от толщин большого ДЭ и верхнего изоляционного слоя

Fig. 6. Graphs of the dependences of the electric field in zone 1 and in the zone of the upper layer (zone 7) on the thicknesses of the large DS and the upper insulating layer

При анализе графиков зависимости E от толщины диэлектрических экранов можно сказать, что значительная толщина негативно сказывается на общей картине распределения напряженности электрического поля. Поэтому значение толщины было выбрано 12 мм.

Исследование толщин большого ДЭ и верхнего изоляционного слоя

На этом этапе проводилось исследование зависимости сразу от двух параметров. В ре-

зультате был получен график зависимости напряженности электрического поля от толщины большого ДЭ и от толщины верхнего изоляционного слоя (см.рис.6) в зоне 7 (таблица 1) и зоне 1 (таблица 2).

Можно сказать, что при увеличении обеих величин происходит снижение напряженности электрического поля как в зоне й, так и в зоне 7. В результате, было выбрано значение толщины большого диэлектрического экрана 15 мм, а толщина верхнего изоляционного слоя – 20 мм.

Таблица 1

Значения E в зоне 7

Table 1

E values in zone 7

		Толщина верхнего слоя, мм			
		5	10	15	20
Толщина ДЭ, мм	5	7,3	4,9	3,9	3,02
	10	6,4	4,4	3,4	2,83
	15	5,6	3,96	3,13	2,6
	20	4,96	3,58	2,89	2,43

Таблица 2

Значения E в зоне 1

Table 2

E values in zone 1

		Толщина верхнего слоя, мм			
		5	10	15	20
Толщина ДЭ, мм	5	4,8	3,6	3,0	2,82
	10	4,6	3,6	3,08	2,82
	15	4,4	3,54	3,06	2,82
	20	4,2	3,55	3,05	2,8

Исследование зависимости напряженности электрического поля в критических зонах от диэлектрической проницаемости диэлектрических экранов

В ходе исследования так же была получена зависимость напряженности поля от величины диэлектрической проницаемости ДЭ во всех зонах, на которые изменения исследуемой величины оказывает наибольший эффект (см. рис. 7)

Можно сказать, что оптимальный диапазон диэлектрической проницаемости лежит в пределах от 10 до 12. Так как при дальнейшем увеличении уже не происходит резкого снижения напряженности в критических зонах, а в зонах 7 и 2 – есть стабильное увеличение. Тем более вероятность разработать материал снижается с тем, чем выше будет значение ϵ .

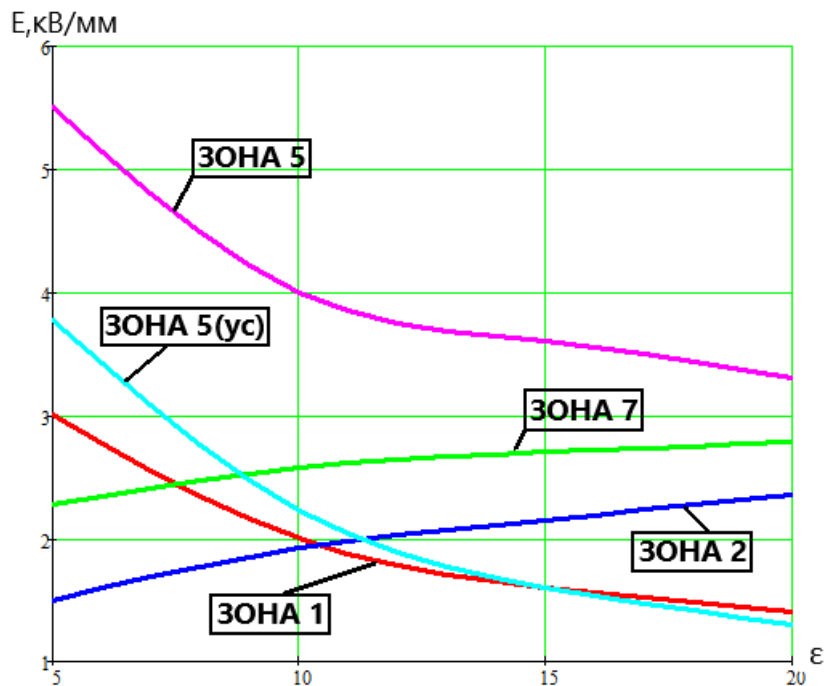


Рис. 7. Графики зависимостей напряженности электрического поля от диэлектрической проницаемости ДЭ

Fig. 7. Graphs of the dependence of the electric field on the dielectric constant of the DS

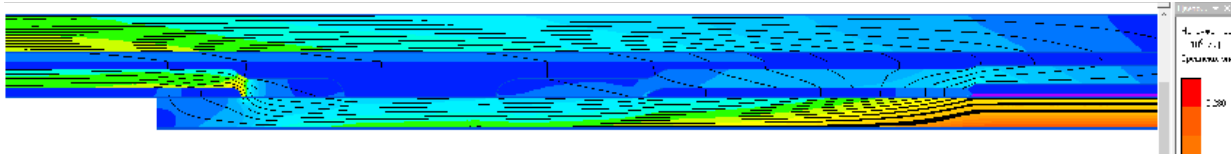


Рис. 8. Картина распределения напряженности электрического поля в трубке-регуляторе
 Fig. 8. The picture of the distribution of electric field strength in the tube-regulator

Значения напряженности электрического поля во всех критических зонах

Таблица 3

Electric field strengths in all critical areas

Table 3

Зоны	1	2	3	4	5	6	7
E_{Σ} , кВ/мм	3.57	0.10	1.51	1.74	1.37/2.71	3.64	2.60
E_{τ} , кВ/мм	3.27	0.04	1.50	1.72	0.07/2.62	3.62	2.60

Так же хотелось бы отметить, что ранее, в предыдущих исследованиях стресс-конуса, было проведено исследование напряженности поля от электропроводности высоковольтного электрода, что по аналогии можно отнести к зависимости от электропроводности п/пВ, поэтому было поставлено значение $\gamma = 0.002$ См/м [1].

В результате проведенной работы, была получена следующая картина распределения силовых линий в усиливающей изоляции кабельной муфты типа трубка-регулятор (см. рис. 8).

И соответственно значения касательной и суммарной составляющих во всех критических зонах (табл. 3)

Как видно из полученных значений, напряженность поля в конструкции не превышает допустимого значения (5 кВ/мм), что говорит о работоспособности данной модели.

Итоги проведенного исследования

- Предложена предварительная конструкция многофункционального элемента;
- На примере соединительной муфты кабеля на 110 кВ, определены параметры, кото-

рые необходимо оптимизировать и критические зоны на значения напряженностей, в которых ориентировались при моделировании;

- Проведено компьютерное моделирование многофункционального элемента, в результате чего были получены оптимальные геометрические и физические параметры элементов конструкции трубки-регулятора;

- Получена итоговая предварительная конструкция многофункционального элемента, в которой максимальное значение напряженности электрического поля не превышает допустимого значения касательной составляющей электрического поля;

- Был разработан патент на полезную модель [2]

Данное исследование подтверждает возможность создания усиливающей изоляции муфты с применением нового комбинированного резистивно-емкостного метода выравнивания электрического поля. При полученных результатах, максимальное значение тангенциальной составляющей поля в трубке составляет 3.62 кВ/мм в зоне 6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Грешняков Г.В., Селезнёв Д.А., Коровкин Н.В. Регулирование электрического поля в усиливающей изоляции соединительных кабельных муфт на

напряжение 110 кВ Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2016. Т. 24, № 4. С. 116–125. DOI: 10.5862/JEST.254.13



- [2] Патент на полезную модель № 184107 «Соединительная муфта для силового кабеля». Авторы: Грешняков Г.В., Селезнёв Д.А., Ковалёв Г.Г. Зарегистрирован в государственном реестре полезных моделей 16 октября 2018 г. Срок действия патента истекает 15 июня 2028 года.
- [3] **Seleznev D.A., Obratsov N.V., Kiesewetter D.V.** Numerical Simulation of the High-Voltage Cable Sleeve Operation for 110 kV // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, 2018.
- [4] **Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В.** Теоретические основы электротехники. В 2 т. СПб.: Питер, 2009.
- [5] **Шварцман Л.Г.** Регулирование электрического поля в концевых муфтах кабелей высокого напряжения // Труды ВНИИКП. 1969. №13. С. 11–33.
- [6] **Велугаев С.С., Макаров Л.Е., Образцов Ю.В., Фурсов П.В.** Электрическое поле в соединительных муфтах с эластомерной изоляцией на напряжение 110 кВ // Кабели и провода. 2004. № 1. С. 15–18.
- [7] **Котов Р.В.** Распределение электрического поля в кабельных муфтах холодной усадки // Электро. 2006. № 5. С. 40–44.
- [8] **Christen T., Donzel L., Greuter F.** Nonlinear resistive electric field grading part 1: Theory and simulation // IEEE Electr. Insul. Mag. 2011. Vol. 27, no. 2. P. 18–28.
- [9] **Кучерявая И.Н.** Электрическое поле в кабельных муфтах при различных способах его выравнивания и при наличии дефектов в элементах // Теоретическая электротехника. 2016. С. 111–118
- [10] Кабели и провода / под ред. И.Б. Пешкова. Основы кабельной техники. М.: Энергоатомиздат, 2009. 470 с.
- [11] **Хакимуллин Б.Р., Багаутдинов И.З.** Преимущества силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Инновационная наука: [международный науч. журнал]. 2016. № 4. С. 198–200.
- [12] **Ларина Э.Т.** Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. М., 1996.
- [13] **Lise Donzel, Felix Greuter, Thomas Christen.** Nonlinear resistive electric field grading part 2: Materials and Applications // IEEE Electr. Insul. Mag. 2011. Vol. 26, no. 6. P. 48–60.
- [14] **Таджибаев А.И., Канискин В.А., Костенко Э.М.** Неразрушающий метод определения ресурса электрических кабелей с полимерной изоляцией в условиях эксплуатации // Электричество. 1995. № 5. С. 19–23.
- [15] **Канискин В.А., Таджибаев А.И.** Исследование надежности полимерных изоляционных конструкций при воздействии перенапряжений // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 54. Кн. 2 Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2005. С. 61–70.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СЕЛЕЗНЁВ Дмитрий Александрович – ведущий инженер НИИ «Севкабель»

E-mail: Di.Sel92@ya.ru

ГРЕШНЯКОВ Георгий Викторович – доктор технических наук главный конструктор, НИИ «Севкабель»

E-mail: g.greshnyakov@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 20.12.2019

REFERENCES

- [1] **G.V. Greshnyakov, D.A. Seleznev, N.V. Korovkin,** Regulirovaniye elektricheskogo polya v usilivayushchey izolyatsii soyedinitelnykh kabelnykh muft na napryazheniye 110 kV, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 254 (04) (2016) 116–125. DOI: 10.5862/JEST.254.13
- [2] Patent na poleznuyu model № 184107 «Soyedinitelnaya mufta dlya silovogo kabelya». Avtory: Greshnyakov G.V., Seleznev D.A., Kovalev G.G. Zaregistrirovan v gosudarstvennom reyestre poleznykh modeley 16 oktyabrya 2018 g. Srok deystviya patenta istekayet 15 iyunya 2028 goda.
- [3] **D.A. Seleznev, N.V. Obratsov, D.V. Kiesewetter,** Numerical Simulation of the High-Voltage Cable Sleeve Operation for 110 kV, IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, (2018).
- [4] **K.S. Demirchyan, L.R. Neyman, N.V. Korovkin,** Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. V 2 t. SPb.: Piter, 2009.

- [5] **L.G. Shvartsman**, Regulirovaniye elektricheskogo polya v kontsevykh muftakh kabeley vysokogo napryazheniya, Trudy VNIIEP, 13 (1969) 11–33.
- [6] **S.S. Vetlugayev, L.Ye. Makarov, Yu.V. Obratsov, P.V. Fursov**, Elektricheskoye pole v soyedinitelnykh muftakh s elastomernoy izolyatsiyey na napryazheniye 110 kV, Kabeli i provoda, 1 (2004) 15–18.
- [7] **R.V. Kotov**, Raspredeleniye elektricheskogo polya v kabelnykh muftakh kholodnoy usadki. Elektro, 5 (2006) 40–44.
- [8] **T. Christen, L. Donzel, F. Greuter**, Nonlinear resistive electric field grading part 1: Theory and simulation, IEEE Electr. Insul. Mag. 27 (2) (2011).
- [9] **I.N. Kucheryavaya**, Elektricheskoye pole v kabelnykh muftakh pri razlichnykh sposobakh yego vyravnivaniya i pri nalichii defektov v elementakh, Teoretichna yelektrotehnika, (2016) 111–118
- [10] Kabeli i provoda. Osnovy kabelnoy tekhniki. Pod. Red. I.B. Peshkova. M.: Energoatomizdat, 2009.
- [11] **B.R. Khakimullin, I.Z. Bagautdinov**, Preimushchestva silovykh kabeley s izolyatsiyey iz sshitogo polietilena», Innovatsionnaya nauka: mezhdunar. nauch. zhurnal, 4 (2016) 198–200.
- [12] **E.T. Larina**, Silovyye kabeli i vysokovoltnyye kabelnyye linii. M., 1996.
- [13] **Lise Donzel, Felix Greuter, Thomas Christen**, Nonlinear resistive electric field grading part 2: Materials and Applications, IEEE Electr. Insul. Mag. 26 (6) (2011) 48–60.
- [14] **A.I. Tadzhibayev, V.A. Kaniskin, E.M. Kostenko**, Nerazrushayushchiy metod opredeleniya resursa elektricheskikh kabeley s polimernoy izolyatsiyey v usloviyakh ekspluatatsii, Elektrichestvo, 5 (1995) 19–23.
- [15] **V.A. Kaniskin, A.I. Tadzhibayev**, Issledovaniye nadezhnosti polimernykh izolyatsionnykh konstruksiy pri vozdeystvii perenapryazheniy, Metodicheskiye voprosy issledovaniya nadezhnosti bolshikh sistem energetiki, 54 (2) (2005) 61–70.

THE AUTHORS

SELEZNEV Dmirtii A. – *Research institute «Sevkabel»*

E-mail: Di.Sel92@ya.ru

GRESHNYAKOV Georgii V. – *Research institute «Sevkabel»*

E-mail: g.greshnyakov@gmail.com

Received: 20.12.2019



DOI: 10.18721/JEST.26102
УДК 621.438

Г.С. Коленко, А.С. Ласкин

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

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ И ОСРЕДНЕННЫЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА РАБОЧИЕ ЛОПАТКИ РАЗНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Лопатки современных осевых турбинных ступеней являются высоконагруженными деталями. Повышенные динамические напряжения в материале лопаток могут приводить к их усталостным поломкам. Источником динамических напряжений в лопатках являются переменные аэродинамические силы, оценка которых должна производиться на этапе проектирования. В статье рассматривается влияние основных геометрических параметров осевой ступени на осредненные и нестационарные аэродинамические нагрузки, действующие на рабочие лопатки. В частности, рассматривается влияние межвенцового осевого зазора, отношения шагов, относительной длины лопатки. Сравниваются и сопоставляются некоторые результаты зарубежных исследований и собственные результаты авторов, полученные численно-расчетными методами вычислительной газодинамики (с помощью пакета Ansys CFX). В качестве объектов исследования выбраны две модельные осевые ступени Кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей СПбПУ, которые различаются между собой отношением среднего диаметра к высоте лопатки и величиной межвенцового осевого зазора.

Ключевые слова: переменные аэродинамические силы, осевая турбинная ступень, нестационарные процессы в осевых турбинах, вибрационная надежность, взаимодействие лопаточных венцов, межвенцовый осевой зазор.

Ссылка при цитировании:

Коленко Г.С., Ласкин А.С. Нестационарные и осредненные аэродинамические нагрузки, действующие на рабочие лопатки разной геометрии // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2020. Т. 26, № 1. С. 15–28. DOI: 10.18721/JEST.26102

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

G.S. Kolenko, A.S. Laskin

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

UNSTEADY AND AVERAGED AERODYNAMIC LOADS ACTING ON ROTOR BLADES OF DIFFERENT GEOMETRY

The blades of modern axial turbine stages are highly loaded parts. Increased dynamic stresses in the material of the blades can lead to their fatigue failure. The source of dynamic stresses in the blades are variable aerodynamic forces, which must be evaluated at the design stage. The article considers the influence of the main geometric parameters of the axial stage on the averaged and non-stationary aerodynamic loads acting on the rotor blades. In particular, the influence of rotor-stator axial gap, blade count ratio and the relative length of blades is considered. Some

foreign research results and authors' own results obtained by numerical-computational methods of computational gas dynamics (using the Ansys CFX package) are compared. Two model axial stages of the Department of Turbines, Hydraulic Machines and Aircraft Engines of SPbPU, which differ in the ratio of the average diameter to the height of the blade and the value of the rotor-stator axial gap, were selected as objects of study.

Keywords: unsteady blade forces, axial turbine, vibration reliability, unsteady blade, loading, rotor-stator axial gap, blade row interaction, effect of blade count ratio.

Citation:

Kolenko G.S. Kolenko, Laskin A.S. Laskin, Unsteady and averaged aerodynamic loads acting on rotor blades of different geometry, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 26 (01) (2020) 15–28. DOI: 10.18721/JEST.26102

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Современная тенденция снижения металлоемкости турбинных двигателей продиктована естественным желанием производителей снизить себестоимость выпускаемой продукции. Один из основных способов уменьшить металлоемкость турбоустановки – уменьшить расход дорогих и химически и технологически сложных в производстве металлических жаропрочных сплавов, из которых изготавливают сопловые и направляющие лопатки осевых турбин. Для транспортных турбинных двигателей задача уменьшения массы и габаритов особенно актуальна.

Уменьшить число лопаток можно за счет применения высоконагруженных лопаточных венцов, характеризующихся высокими располагаемыми перепадами энтальпий (соответственно, давлений и температур потока) на каждую ступень и высокими числами Маха обтекающего рабочего тела.

Однако при этом повышается средний уровень аэродинамических нагрузок, действующих на каждую рабочую лопатку, а также амплитуды переменных составляющих этих нагрузок и соответствующие амплитуды динамических напряжений в теле лопатки. Повышенные динамические напряжения в материале лопаток могут приводить к уменьшению вибрационной надежности и к усталостным трещинам и разрушению лопаток. Поэтому оценка уровня пе-

ременных аэродинамических сил (ПАС), действующих на рабочие лопатки (РЛ), должна производиться на этапе проектирования.

Для того чтобы оценить уровень ПАС, действующих на рабочие лопатки интересующей турбинной ступени, необходимо иметь экспериментальные или численно-расчетные данные о распределении давлений по профилю лопатки, причем эти распределения – периодическая функция времени.

В настоящее время имеется возможность определения не только осредненных во времени нагрузок на РЛ, но и их нестационарных составляющих. Это обеспечивается не только методами вычислительной газодинамики (программный пакет Ansys CFX и др.), но и достижениями в создании малоинерционных измерительных приборов, необходимых при выполнении экспериментальных исследований. Сказанное иллюстрируется увеличением количества публикаций в области исследования нестационарных процессов за последние 10 лет, сочетающих в себе как результаты расчетов, так и экспериментальные оценки [1, 2, 3]. Выполненные исследования уже позволяют сделать некоторые обобщения, в частности, по влиянию на рабочие процессы в ступенях турбин основных геометрических параметров этих ступеней.

В настоящей статье рассматривается влияние на осредненные и нестационарные



нагрузки на рабочие лопатки межвенцовых осевых зазоров, соотношения шагов РЛ и НЛ, а также влияния высоты РЛ на расфазировку распределения нестационарных усилий. Полагаем, что читателю известны основные причины возникновения нестационарных нагрузок и их некоторые особенности [4, 5].

Следует отметить, что результаты исследований нестационарных процессов в проточных частях турбин могут быть использованы не только при решении задач обеспечения вибрационной надежности лопаточного аппарата, но и для оценки энергетической эффективности ступени, а также при решении задач снижения металлоемкости турбоагрегатов.

Цель настоящей работы – обобщение некоторых результатов, полученных зарубежными и отечественными авторами касательно исследования влияния геометрических параметров (Δz_1 , t_2/t_1 и d/l) осевых турбинных ступеней на уровень аэродинамических нагрузок на рабочие лопатки, а также сопоставление их с собственными авторскими результатами (полученными с помощью пакета Ansys CFX).

Метод численного моделирования и исследуемые турбинные ступени. Для расчета трехмерного вязкого нестационарного потока в проточных частях исследуемых турбинных ступеней был использован программный пакет Ansys CFX 18.2. В данном пакете реализованы методы вычислительной гидрогазодинамики (CFD), основанные на использовании нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS). Уравнения Навье-Стокса для сжимаемого потока являются уравнениями непрерывности, импульса и энергии в дифференциальной форме. В качестве модели турбулентности была выбрана одна из наиболее популярных на сегодняшний день модель SST Ментера [6], пригодная для расчета турбулентных течений в турбомашинах. Модель SST предполагает

переключение между уравнениями $k-\omega$ модели (вблизи поверхностей) и $k-\epsilon$ модели (вдали от поверхностей) с помощью специальной функции-переключателя.

Для построения расчетных сеток лопаточных секторов исследуемых осевых турбинных ступеней использовался сеточный генератор Ansys Turbogrid. Суммарное количество элементов расчетной сетки находилось в диапазоне 4–12 млн. Безразмерное число y^+ для первой пристенной ячейки для всех сеточных моделей находилось в диапазоне 1–2, что удовлетворяет требованиям низкорейнольдсовой модели турбулентности SST. Выполненное исследование сеточной сходимости показало пригодность используемых расчетных сеток для корректного разрешения особенностей нестационарного турбулентного потока и вычисления аэродинамических сил, действующих на поверхности рабочих и направляющих лопаток.

Временной шаг расчета подбирался таким образом, чтобы число Куранта $C = \frac{u\Delta t}{\Delta x}$ (где u – скорость переноса, Δt – временной шаг, Δx – пространственный шаг) находилось в диапазоне 1–4, в соответствии с требованиями метода URANS.

На интерфейсной поверхности между сетками направляющих и рабочих межлопаточных каналов применен метод скользящих сеток Transient Blade Row с временным преобразованием.

Объекты исследования. В качестве объектов исследования были выбраны две модельные осевые ступени, различающиеся отношением d/l и другими параметрами. На рис. 1, а представлена расчетная модель ступени ЛПИ с отношением $d/l = 13$, а на рис. 1, б – расчетная модель ступени V84.3 с отношением $d/l = 4$. Отношение количества направляющих и рабочих лопаток было подобрано таким образом, чтобы отношение угловых секторов было близко к единице, в соответствии с требованиями, накладываемыми методом *Преобразования времени (Time Transformation)*.

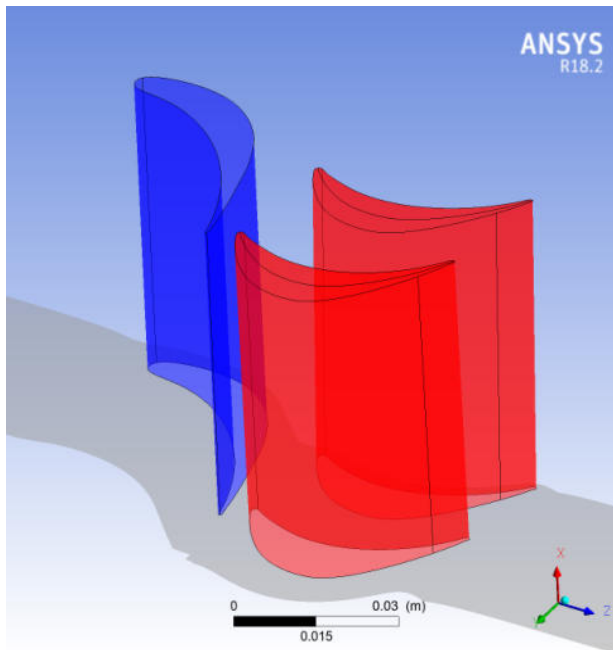


Рис. 1, а Модельная ступень ЛПИ: $d/l = 13$
 $d = 0,78$ м $l = 0,06$ м $t_2/t_1 = 0,53$ $\Delta z_r/b_1 = 0,08$

Fig. 1, a. SPbSTU Stage

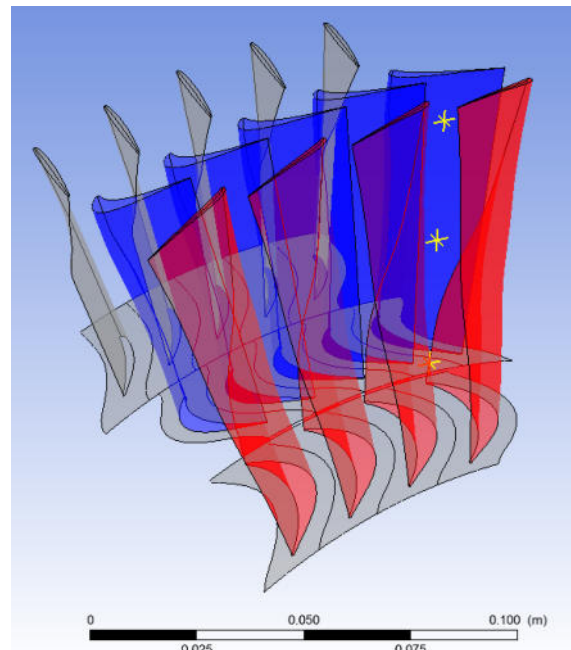


Рис. 1, б Модельная ступень V84.3: $d/l = 4$
 $d = 0,332$ м $l = 0,09$ м $t_2/t_1 = 1,255$ $\Delta z_r/b_1 = 0,38$

Fig. 1, б. V84.3 Stage

Таблица 1

Геометрические характеристики исследуемых турбинных ступеней

Table 1

Geometric characteristics of studied turbine stages

Геометрический параметр	Ступень ЛПИ	Ступень V84.3
Радиус среднего сечения r , мм	390	166
Длина направляющей лопатки l_1 , мм	60	71
Хорда профиля НЛ b_1 , мм	59	30
Шаг НЛ t_1 , мм	47,9	16,9
Относительный шаг НЛ \bar{t}_1	0,8	0,564
Число НЛ $Z_{НЛ}$	51	59
Длина рабочей лопатки l_2 , мм	59	86
Хорда профиля РЛ b_2 , мм	41	34,4
Шаг РЛ t_2 , мм	25,4	22,2
Относительный шаг РЛ \bar{t}_2	0,618	0,645
Число РЛ $Z_{РЛ}$	96	47
Отношение d/l_2	13	3,86
Отношение шагов t_2/t_1	0,53	1,255
Межвенцовый осевой зазор Δz_1 , мм	4	12

Желтыми точками на рис. 1, б обозначены точки замера статического давления в процессе моделирования, координаты этих точек относительно расчетной сетки рабочего колеса остаются

постоянными, а относительно направляющего аппарата – обновляются с временным шагом моделирования. Основные геометрические характеристики исследуемых ступеней приведены в табл. 1.

Результаты численного расчета и их обсуждение

В соответствии с целями настоящего исследования, а именно исследование влияния на переменные аэродинамические силы, действующие на рабочие лопатки, следующих геометрических параметров:

межвенцовый осевой зазор $\Delta z_1 / t_1 \operatorname{tg} \alpha_1$;

отношение шагов РЛ/НЛ t_2/t_1

отношение среднего диаметра к длине рабочей лопатки d/l_2

была выполнена серия расчетов нестационарного течения в исследуемых ступенях: 1) $\Delta z_1 / t_1 \operatorname{tg} \alpha_1 = \text{varia}$; $t_2/t_1 = \text{const}$ (для ступени ЛПИ) 2) $\Delta z_1 / t_1 \operatorname{tg} \alpha_1 = \text{const}$ $t_2/t_1 = \text{varia}$ (для ступени ЛПИ) 3) $\Delta z_1 / t_1 \operatorname{tg} \alpha_1 = \text{const}$ $d/l_2 = \text{varia}$ (ступень V84.3).

Влияние величины межвенцового осевого зазора. Изучение влияния осевого зазора при

решении нестационарных задач всегда оценивается в первую очередь. Это обусловлено тем, что интенсивность нестационарных процессов определяется неравномерностью окружных параметров потока, которые, в свою очередь, зависят от удаления контрольного сечения от турбинной решетки и уровня потенциальной и вязкой неравномерностей потока.

Исходя из геометрических соображений, при интерференции потенциальных и вязких возмущений, суммарные экстремумы будут наблюдаться на осевом расстоянии $n \cdot t_1 \operatorname{tg} \alpha_1$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) от выходных кромок НЛ (рис. 2), что, конечно, отразится на уровне размахов ПАС, действующих на РЛ, если межвенцовый осевой зазор будет кратен $t_1 \operatorname{tg} \alpha_1$, по сравнению с другими величинами зазора.

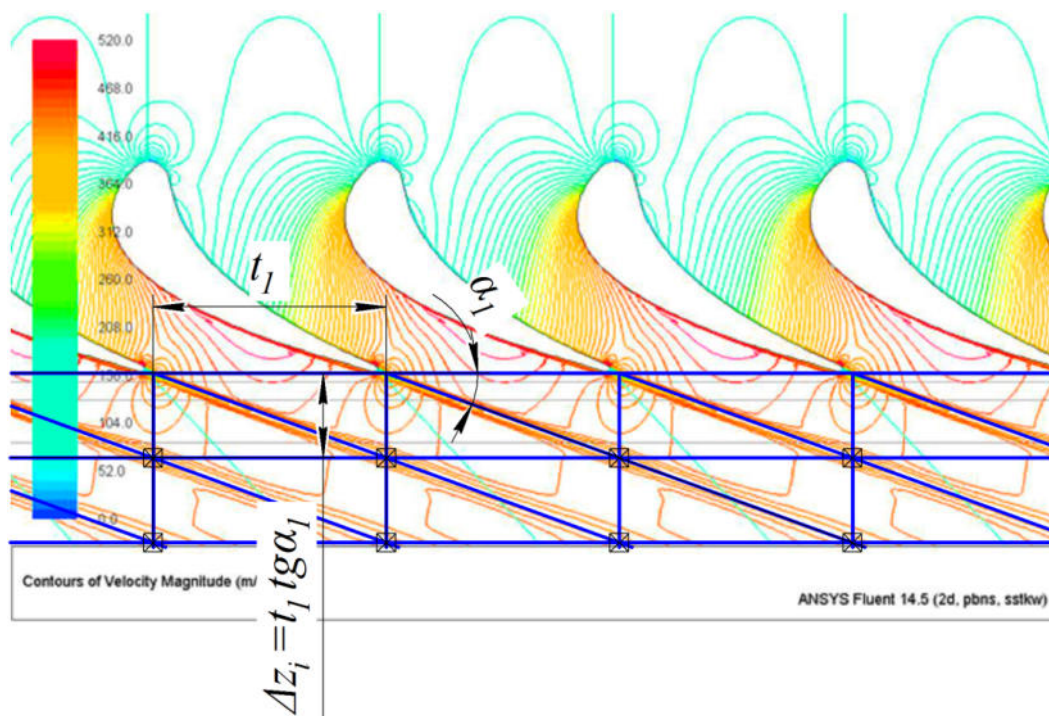


Рис. 2. Наложение вязких и потенциальных возмущений за выходными кромками направляющего аппарата

Fig. 2. Viscous and potential disturbances imposition beyond the guide vane trailing edges

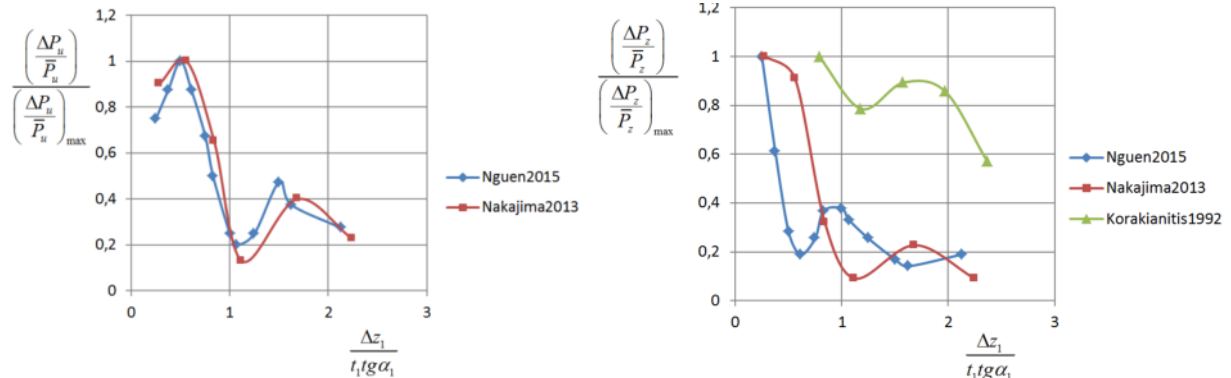


Рис. 3. Зависимость относительных размахов ПАС, действующих на РЛ, от относительного межвенцового зазора: окружная составляющая (а) и осевая составляющая (б)

Fig. 3. Normalized amplitudes of unsteady blade forces: *a* – tangential forces; *b* – axial forces

Как видно из рис. 2, потенциальные и вязкие воздействия суммируются в узлах воображаемой прямоугольно-треугольной сетки. На кривых $\overline{\Delta P_{u,z}}(\Delta z_1)$ данный факт будет проявляться в виде минимумов, соответствующих межвенцовым зазорам, кратным $\frac{\Delta z_1}{t_1 \operatorname{tg} \alpha_1}$, и в

первую очередь равным $\frac{\Delta z_1}{t_1 \operatorname{tg} \alpha_1}$. Немонотонно

убывающий, но периодический (с периодом $t_1 \operatorname{tg} \alpha_1$) характер зависимости относительных размахов ПАС РЛ от межвенцового зазора (рис. 3, *a, б*) подтверждается у Нгуена К. [7, (2015)], Nakajima Т. [8, (2013)] и Korakianitis Т. [9, (1992)] (рис. 2, *б*). Геометрический критерий $\frac{\Delta z_1}{t_1 \operatorname{tg} \alpha_1}$, наглядно отражающий периодичность

картины наложения вязких и потенциальных возмущений в осевом и окружном направлении для турбинных решеток, впервые был введен в обиход и применен Ласкиным А.С. [10, (1987)].

Влияние соотношения шагов рабочих и направляющих лопаток t_2/t_1 . При исследовании влияния отношения шагов t_2/t_1 обычно оставляют неизменной рабочую решетку, изменяя шаг направляющих лопаток t_1 . Следует подчеркнуть, что при изменении шага решетки, хорды лопаток также должны быть пропорционально изменены для сохранения оптималь-

ного отношения шага решетки к хорде профиля t_1/b_1 (см. рис. 4).

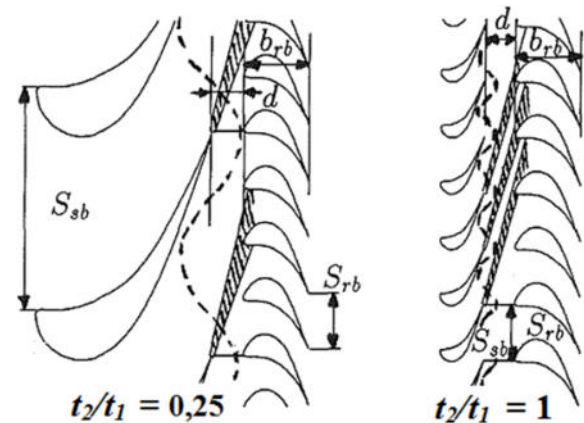


Рис. 4. Пропорциональное уменьшение хорды направляющей лопатки при уменьшении ее шага

Fig. 4. Proportional decrease in the chord of guide vanes with a decrease in its pitch

При увеличении хорды направляющих лопаток интенсивность потенциальных возмущений и вихревых закруточных следов будет также монотонно возрастать, а значит, будут возрастать и размахи ПАС, действующих на рабочие лопатки. Такой характер зависимости относительных размахов ПАС РЛ от отношения шагов t_2/t_1 (рис. 5, *a*) был подтвержден у Nakajima Т. [8, (2013)] и Korakianitis Т. [9, (1992)] (рис. 5, *a*).

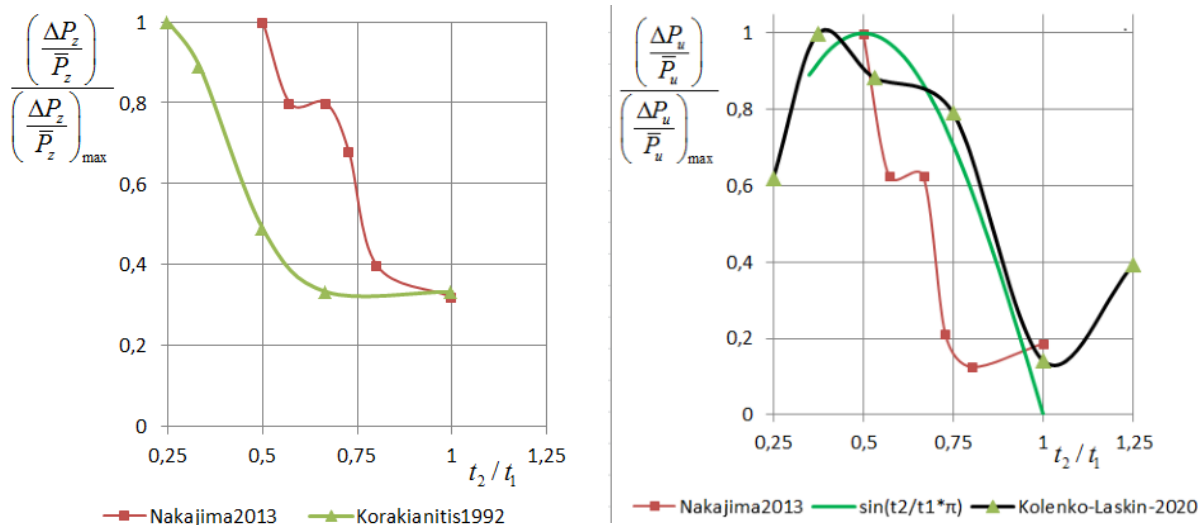


Рис. 5. Зависимость относительного размаха осевой составляющей (а) и окружной составляющей (б) ПАС РЛ от отношения шагов РЛ и НЛ t_2/t_1

Fig. 5. Normalized amplitudes of unsteady blade forces: a – axial forces; b – tangential forces

На рис. 5, б сопоставлены результаты Nakajima Т. и результаты CFD-расчета, выполненного авторами статьи. Также на рис. 5, б нанесена аналитическая кривая, полученная в предположении, что сдвиг фаз между силой, действующей на вогнутую поверхность РЛ и силой, действующей на выпуклую поверхность РЛ, пропорционален отношению шагов t_2/t_1 . В диапазоне отношений шагов $0,25 \leq t_2/t_1 \leq 1,0$ такое предположение подтверждается расчетными данными (рис. 5, б, кривая Kolenko-Laskin-2020).

Из графика на рис. 5, а, б видно, в частности, что минимальный уровень нестационарных сил, действующих на лопатку, соответствует отношению шагов $t_2/t_1 = 1$ (т. е. случаю, когда число направляющих лопаток равно числу рабочих лопаток). Однако, смежные направляющий и рабочий венец с отношением шагов, равным единице, обычно не выполняют, поскольку, хотя амплитуда сил, действующих на одну лопатку (как на направляющую, так и на рабочую), невелика, эти ПАС действуют в одной фазе на все лопатки по окружности, и возникают проблемы прочности крепежа сегментов направляющих лопаток. Ком-

промиссным с точки зрения динамических напряжений изгиба в материале рабочих лопаток и напряжений среза в крепеже статорных лопаток можно считать диапазон отношений шагов $0,5 < t_2/t_1 < 1,0$ и $1,0 < t_2/t_1 \leq 1,25$. В реальных конструкциях осевых турбинных ступеней $t_2/t_1 = 0,75-0,85$.

Влияние отношения среднего диаметра ступени к высоте рабочей лопатки d/h_2 . Для осевых турбинных ступеней с отношением $d/l = 10...15$ обычно применяются лопатки постоянного по высоте сечения, и малыми радиальными градиентами параметров потока и, соответственно, амплитуд и фаз ПАС РЛ по высоте проточной части можно пренебречь. Для ступеней с отношением $d/l = 3...8$ применяют лопатки, спрофилированные в соответствии с выбранным законом закрутки потока по радиусу, и в этом случае изменение параметров потока и размахов ПАС РЛ по высоте проточной части существенно.

Сдвиг фаз ПАС по высоте рабочей лопатки, который будет наблюдаться в ступени с относительно длинными и закрученными лопатками, обусловлен, прежде всего, формой лопаток: линия входной кромки РЛ и линия выходной кромки НЛ в таких ступенях не совпадает с ра-

диальной линией, вдобавок, и направляющие, и рабочие лопатки могут иметь тангенциальный наклон (положительный или отрицательный).

Помимо чисто геометрических соотношений, на сдвиг фаз ПАС по высоте РЛ оказывают влияние и соотношения между режимными параметрами (M_{e1} , Re_{b2} , Re_{l2}) и геометрическими критериями подобия (d/l , l_2/b_2). Акустические возмущения давления распространяются в движущемся потоке с местной скоростью звука, а рабочем межлопаточном канале со скоростью $a+w$. Это значит, что для случая относительно коротких лопаток и умеренных чисел M_{e1} пульсации статического давления в различных точках объема рабочего межлопаточного канала будут практически синфазны, в то время как для случая относительно длинных лопаток и высоких чисел M_{e1} пульсации статического давления в различных точках по высоте рабочего межлопаточного канала не будут синфазны, потому что время, за которое акустическое возмущение преодолеет путь, например, от корня до периферии РЛ, окажется больше времени, через которое условная воображаемая порция рабочего тела покинет рабочий межлопаточный канал.

К сожалению, авторам не удалось найти публикаций, посвященных исследованию влияния относительной и абсолютной высоты рабочих лопаток на размахи и фазы ПАС РЛ. Некоторые соображения касательно влияния нерадиальной установки лопаток на сдвиг фаз ПАС РЛ можно найти у Самойловича Г.С. [11, с. 201, (1975)]. В частности, приводятся аналитические формулы для расчета динамических напряжений в рабочих лопатках с учетом нерадиальной установки направляющих лопаток. Формулы выведены для случая, когда сдвиг фаз аэродинамической нагрузки по высоте лопатки предполагается известным, а интенсивность ее изменения по высоте – постоянной.

На сегодняшний день доступные вычислительные мощности и программный пакет Ansys CFX позволяют численно-расчетным методом и с достаточной достоверностью опреде-

лить амплитуды и фазы переменных аэродинамических сил, действующих на рабочие лопатки, для любой модельной или натурной ступени. Авторы считают проблему оценки влияния относительной высоты лопаток на размахи и фазы ПАС РЛ актуальной и неисследованной, поэтому далее изложены некоторые результаты численного URANS-расчета ПАС РЛ в ступенях ЛПИ и V84.3, полученные с помощью пакета Ansys CFX 18 [12].

На рис. 6 показано изменение статического давления во времени для ступени V84.3 в точках $x/l = 0,1$, $x/l = 0,5$, $x/l = 0,9$, расположение которых было показано на рис. 1, б. Период основной гармоники, как и ожидалось, равен $T_1 = \frac{1}{n_c Z_{НЛ}}$ (периоду НЛ).

В процессе вращения рабочего колеса соответствующая эпюра давлений по профилю рабочей лопатки на выбранном радиусе (на рис. 7, $x/l = 0,5$) периодически «пульсирует».

Если разбить период изменения этой эпюры на произвольное число шагов, и вычислить площадь этой эпюры для каждого момента времени, то можно построить изменение во времени погонной переменной аэродинамической силы q [Н/м], действующей на отрезок лопатки высотой Δl , и отнесенной к длине этого участка. На рис. 8 представлено изменение окружной погонной ПАС, действующей на рабочую лопатку ступени ЛПИ, а на рис. 9 – аналогичные кривые для рабочей лопатки ступени V84.3.

Из рис. 8 можно видеть, что изменение нагрузки на рабочую лопатку ступени ЛПИ происходит практически синфазно по высоте проточной части, поскольку лопатка относительно короткая, имеет практически постоянный профиль и угол установки по высоте. Относительный размах ПАС достигает 30-40% от осредненной во времени силы \bar{P}_u , его высокий уровень объясняется малым относительным осевым зазором для данной ступени ($\Delta z_r/b_1 = 0,08$). Средний уровень ПАС возрастает от корня к периферии.

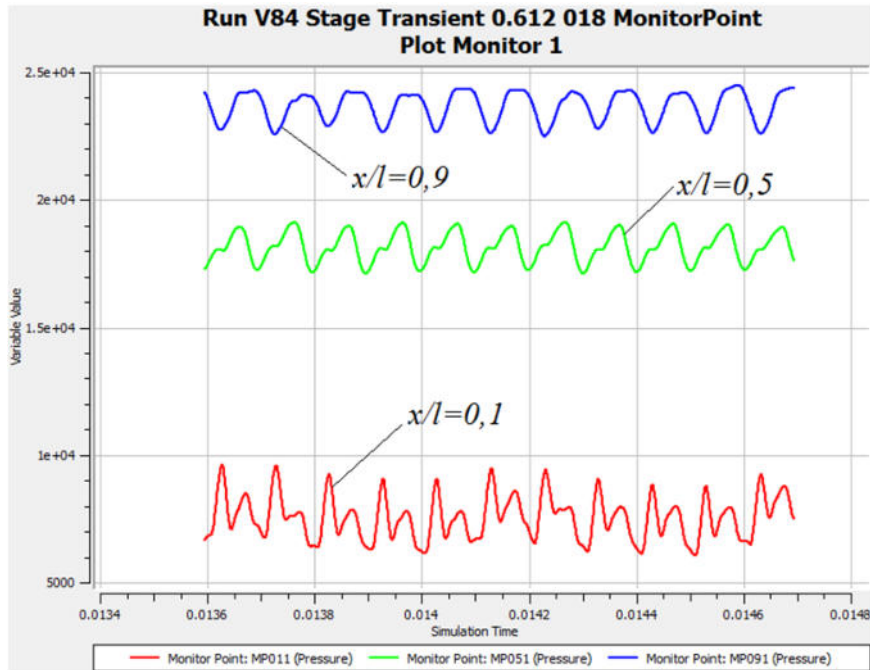


Рис. 6. Пульсации статического давления в точках замера (ступень V84.3) (на входе в рабочий межлопаточный канал): ступень V84.3
 Fig. 6. Static pressure fluctuations at monitoring points (V84.3 stage)

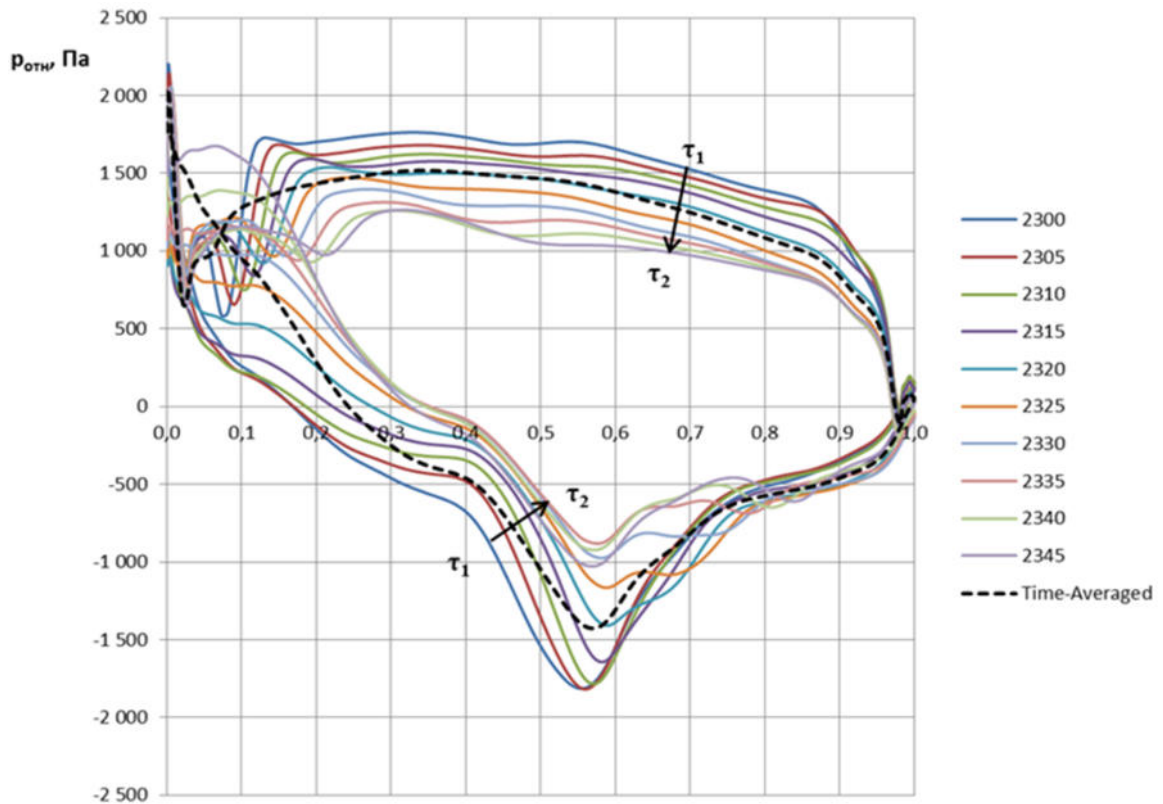


Рис. 7. Распределение статического давления по профилю: $x/l = 0,5$ модельная ступень ЛПИ
 Fig. 7. Blade loading distribution fluctuations at $x/l = 0,5$ section (SPbSTU stage)

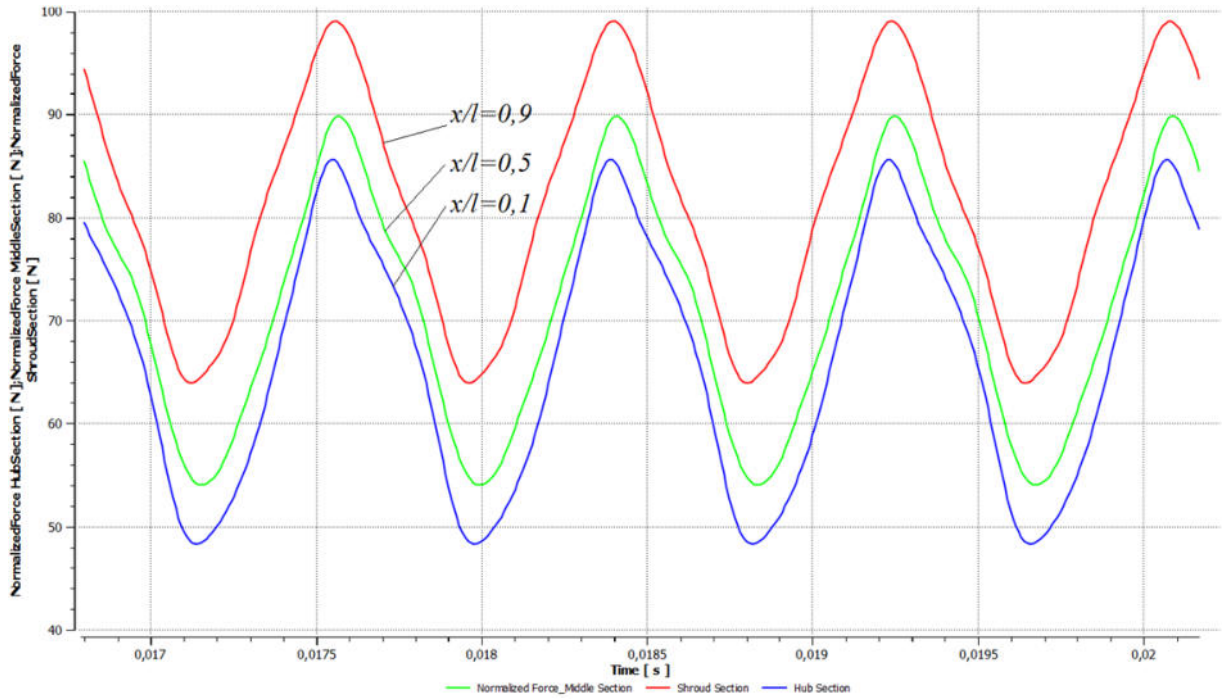


Рис. 8. Погонная окружная ПАС, действующая на РЛ: ступень ЛПИ, $x/l = 0,1$ 0,5 0,9
 Fig. 8. Normalized blade forces fluctuations, $x/l = 0,1$ 0,5 0,9 (SPbSTU stage)

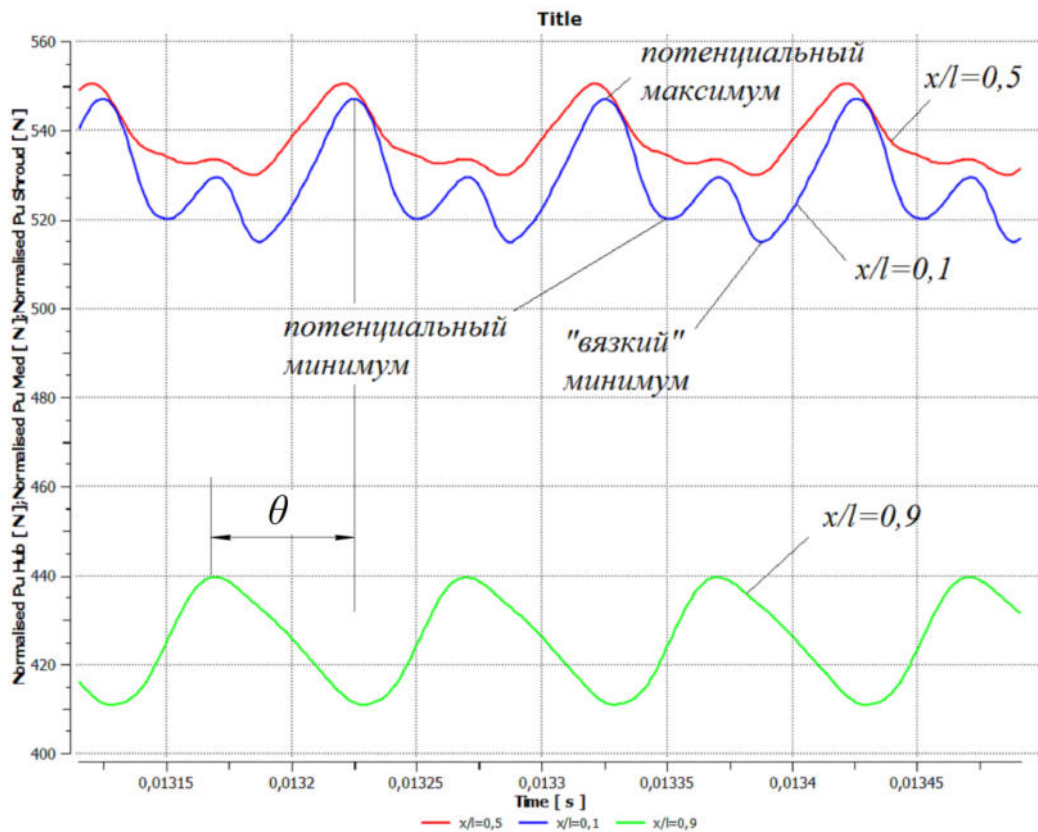


Рис. 9. Погонная окружная ПАС, действующая на РЛ: ступень V84.3
 Fig. 9. Normalized blade forces fluctuations, $x/l = 0,1$ 0,5 0,9 (V84.3 stage)

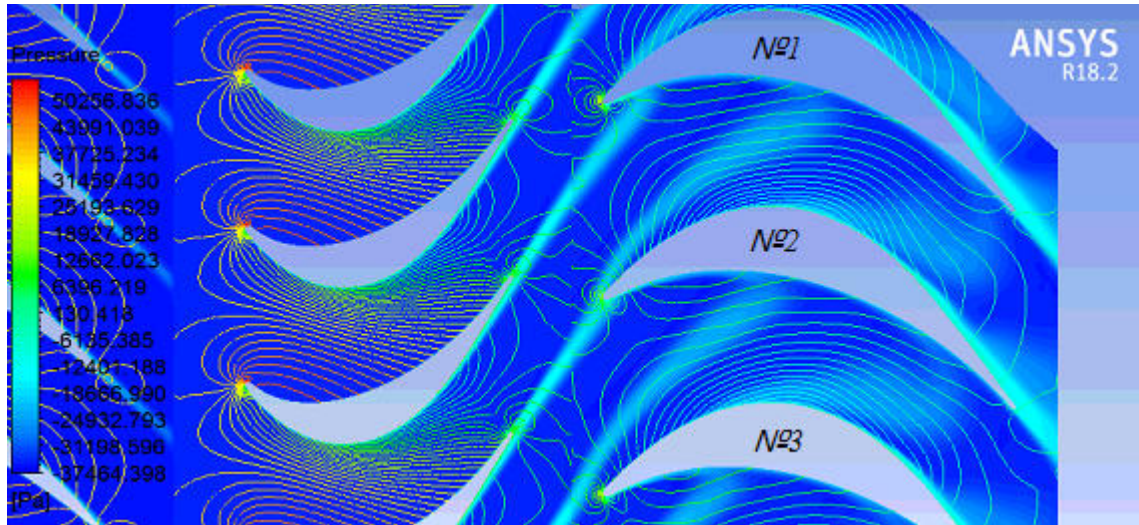


Рис. 10. Мгновенное поле энтропии и контуры давления: плоская развёртка в корневом сечении ($x/l = 0,1$), ступень V84.3

Fig. 11. Instantaneous entropy and static pressure flow fields, span 0,1 (V84.3 stage)

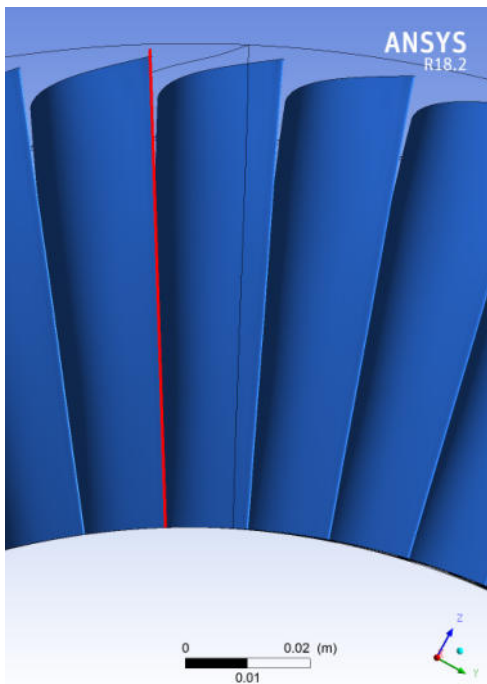


Рис. 11, а. Выходная кромка НЛ
Fig. 11, a. Guide vane trailing edge

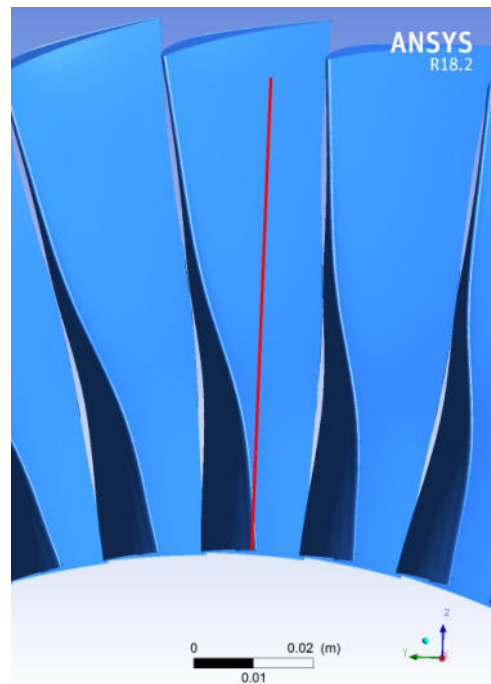


Рис. 12, б. Входная кромка РЛ
Fig. 12, б. Rotor blade leading edge

Анализируя изменение погонной ПАС РЛ для ступени V84.3 (рис. 9), можно заметить дополнительные минимумы на кривой $x/l = 0,1$ (прикорневая область лопатки), частота этих минимумов также равна $n_e Z_{НЛ}$. При сопоставлении

этих минимумов с полем энтропии в корневом сечении (рис. 10, РЛ №2), было обнаружено, что они соответствуют моменту натекания аэродинамического следа НЛ на входную кромку РЛ. Эти минимумы обозначены авторами «вязками».

Потенциальный максимум – соответствует положению РЛ относительно НЛ, при котором выходная кромка НЛ и входная кромка РЛ находятся на одной линии, перпендикулярной плоскости вращения (см. РЛ №1 на рис. 10).

Потенциальный минимум – примерно соответствует положению РЛ относительно НЛ, при котором входная кромка РЛ равноудалена от ближайших выходных кромок НЛ (см. РЛ №3 на рис. 10).

Наблюдаемый сдвиг фаз θ суммарного возмущающего воздействия потока в сечениях $x/l = 0,1$ и $x/l = 0,9$ в ступени V84.3 (рис. 9) объясняется формой рабочей лопатки. Из рис. 11, б следует, что входная кромка РЛ имеет криволинейную форму и наклонена в сторону вращения (помимо того, что по высоте проточной части меняется и величина межвенцового зазора), поэтому возмущающее воздействие на периферии лопатки будет опережать по фазе воздействие у корня на величину порядка $\theta = \tau / T = 0,6$, что подтверждается рис. 9. Следует также отметить, что для данной ступени аэродинамический след натекает на входную кромку РЛ практически синфазно по высоте лопатки, а расфазировка ПАС РЛ в таком случае определяется или только потенциальными возмущениями поля потока (для периферии), или суммарным воздействием вихревой области и потенциальной неравномерности потока (для корневого сечения).

Выводы

1) Для турбинных ступеней, рассмотренных в работах [7–9], зависимость размахов переменных сил, действующих на рабочие лопатки, от межвенцового осевого зазора (рис. 3, а, б) имеет немонотонно-убывающий периодический характер с периодом, равным или близким к $\frac{\Delta z_1}{t_1 \operatorname{tg} \alpha_1}$. Периодическая немонотонность зависимости осредненных размахов ПАС РЛ от межвенцового зазора $\overline{\Delta P}(\overline{\Delta z})$ определяется картиной наложения вязких и потенциальных

возмущений потока за НЛ, отражаемой параметром $\Delta z_m = t_1 \operatorname{tg} \alpha_1$ (рис. 2, 3, а, б).

2) Для турбинных ступеней, рассмотренных в работах [7, 8] и ступени ЛПИ, исследованной в настоящей работе, кривые зависимости размахов переменных сил, действующих на рабочие лопатки, от отношения шагов рабочей решетки к шагам направляющей решетки t_2/t_1 (рис. 5, а, б) существенно различаются между собой для ступеней различной геометрии. Общим качественным свойством этих кривых является, в целом, монотонное убывание осредненной величины ПАС РЛ в диапазоне отношений шагов $0,25 \leq t_2/t_1 \leq 1,0$.

3) Сравнивая зависимости погонных ПАС РЛ от времени для трех сечений лопатки ($x/l = 0,1$ 0,5 0,9) для исследованных в данной работе ступеней ЛПИ ($d/l = 13$) и V84.3 ($d/l = 4$), (рис. 8, 10), можно видеть, что для модельной ступени ЛПИ расфазировка ПАС РЛ по высоте проточной части практически отсутствует, переменные силы действуют на перо лопатки синфазно, в то время как для модельной ступени V84.3 расфазировка ПАС РЛ по высоте проточной части была обнаружена, и составила $\theta = \tau / T = 0,6$ (рис. 9).

4) Размахи и фазы ПАС, действующих на рабочие лопатки, нелинейно зависят от геометрических параметров ступени: $\Delta z_1/b_1$ t_2/t_1 d/l .

5) Для осевых турбинных ступеней различных производителей с относительным межвенцовым зазором в диапазоне $\Delta z_1/b_1 = 0,2 \div 0,5$ и отношением шагов $t_2/t_1 = 0,5 \div 1,25$ характерен уровень относительных размахов переменных аэродинамических сил в диапазоне $7 \div 30\%$ от осредненных во времени величин \overline{P}_u .

6) Зависимость осредненных размахов ПАС РЛ от отношения шагов РЛ/НЛ $\overline{\Delta P}(t_2/t_1)$ в наиболее употребительном диапазоне $0,5 < t_2/t_1 < 1,0$ в целом, является практически монотонно убывающей. Кривая, полученная авторами для ступени ЛПИ, хорошо аппроксимируется функцией $\sin\left(\frac{t_2}{t_1} \pi\right)$ (см. рис. 5. б).



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Chen T., Patel K., Millington P.** Combined effects of both axial gap and blade count ratio on the unsteady forces of a steam turbine stage // Proceedings of ASME Turbo Expo, ASME GT2012-68874. 2012.
- [2] **Funazaki K., Yamada K., Kikuchi M., Sato H.** Detailed Studies on Aerodynamic Performance and Unsteady Flow Behaviors of a Single Turbine Stage with Variable Rotor-Stator Axial Gap // International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems (Japan). Dec 2008. Vol. 2, no. 1. P. 30–37.
- [3] **Гнесин В.И., Колодяжная Л.В., Жандковски Р., Колесник А.А.** Численный анализ аэроупругого поведения лопаточного венца осевой турбомашин // Вестник НТУ «ХПИ». 2014. № 62 (1104).
- [4] **Афанасьева Н.Н., Бусурин В.Н., Гоголев И.Г. [и др.]** Аэродинамические характеристики ступеней тепловых турбин / под общ. ред. В.А. Черникова. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980. 263 с.
- [5] **Коленько Г.С., Ласкин А.С.** Структура потока и аэродинамические характеристики плоской турбинной направляющей решетки // Естественные и технические науки. 2018. 4 (118). С. 164–176.
- [6] Shawn Wasserman Choosing the Right Turbulence Model for Your CFD Simulation // ENGINEERING.com. – 2016. URL: <https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/13743/Choosing-the-Right-Turbulence-Model-for-Your-CFD-Simulation.aspx> (дата обращения: 12.02.2020).
- [7] **Нгуен Куок Куан.** Численное исследование влияния межвенцового зазора на переменные силы в осевой ступени турбины // Молодой ученый. 2015. № 10 (90). С. 270–274.
- [8] **Nakajima, Tomomi Shikano, Yoshio Yamashita Yutaka.** Prediction of Unsteady Force for Axial Turbine Buckets (Effects of Nozzle-Bucket Axial Gap Length and Blade Count Ratio) // Proceedings of ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition, June 3–7, 2013, San Antonio, Texas, USA.
- [9] **Korakianitis T.** On the prediction of unsteady forces on gas turbine blades: Part 1 -Description of the approach // Transaction of the ASME. 1992. Vol. 114, P. 123–131.
- [10] **Ласкин А.С.** Выбор оптимального осевого зазора, обеспечивающего минимум аэродинамического возбуждения колебаний рабочих лопаток газовой турбины // Энергомашиностроение. 1987. № 2. С. 18–25.
- [11] **Самойлович Г.С.** Возбуждение колебаний лопаток турбомашин. М.: Машиностроение. 1975. 288 с.
- [12] **Гнесин В.И., Колодяжная Л.В., Жандковски Р.** Численный анализ трёхмерного нестационарного потока идеального газа в последней ступени турбомашин с учётом неосесимметричного выхлопного патрубка // Вестник НТУ «ХПИ». 2016. № 8(1180). С. 47–53.
- [13] **Niu, Xiyang Wang, Lin Li, Dongming Du.** Quli Reduction of Turbine Blade Unsteady Forces by Shape Modification of Vanes for Industrial Gas Turbines // Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, June 13–17, 2016, Seoul, South Korea.
- [14] **Rzadkowski R., Gnesin V., Kolodyazhnaya L.** Aeroelasticity Analysis of Unsteady Rotor Blade Forces and Displacements in LP Last Stage Steam Turbine with Various Pressure Distributions the Stage Exit // Journal of Vibration Engineering & Technologies.. 2018. Vol. 6, is. 5.
- [15] **Waite, Joshua J. Kielb, Robert E.** The Impact of Blade Loading and Unsteady Pressure Bifurcations on Low-Pressure Turbine Flutter Boundaries // Journal of Turbomachinery. 2016. Vol. 138, is. 4.
- [16] **Seeley, Charles E. Wakelam, Christian Zhang, Xuefeng Hofer, Douglas Ren.** Wei-Min Investigations of Flutter and Aerodynamic Damping of a Turbine Blade: Experimental Characterization // Journal of Turbomachinery. 2017. Vol. 139, is. 8.
- [17] **Jian Liu, Wei-Yang Qiao, Wen-Hua Duan.** Investigation of Unsteady Aerodynamic Excitation on Rotor Blade of Variable Geometry Turbine // International Journal of Rotating Machinery. Vol. 2019. URL: <https://doi.org/10.1155/2019/4396546>
- [18] **Ooten, Michael K. Anthony, Richard J. Lethander, Andrew T. Clark, John P.** Unsteady Aerodynamic Interaction in a Closely Coupled Turbine Consistent With Contrarotation // Journal of Turbomachinery. 2016. Vol. 138, is. 6.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОЛЕНЬКО Григорий Сергеевич – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: gidrat@mail.ru

ЛАСКИН Александр Степанович – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: as.laskin@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 04.02.2020

REFERENCES

- [1] **T. Chen, K. Patel, P. Millington**, Combined effects of both axial gap and blade count ratio on the unsteady forces of a steam turbine stage, Proceedings of ASME Turbo Expo, ASME GT2012-68874. 2012.
- [2] **K. Funazaki, K. Yamada, M. Kikuchi, H. Sato**, Detailed Studies on Aerodynamic Performance and Unsteady Flow Behaviors of a Single Turbine Stage with Variable Rotor-Stator Axial Gap, International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems (Japan). Dec, 2 (1) (2008) 30–37.
- [3] **V.I. Gnesin, L.V. Kolodyazhnaya, R. Zhandkovski, A.A. Kolesnik**, Chislenny analiz aerouprugogo povedeniya lopatochnogo ventsa osevoy turbomashiny, Vestnik NTU «KhPI», 62 (1104) (2014).
- [4] **N.N. Afanasyeva, V.N. Busurin, I.G. Gogolev [i dr.]**. Aerodinamicheskiye kharakteristiki stupeney teplovykh turbin. Pod obshch. red. V.A. Chernikova. L.: Mashinostroyeniye, Leningr. otd-niye, 1980.
- [5] **G.S. Kolenko, A.S. Laskin**, Struktura potoka i aerodinamicheskiye kharakteristiki ploskoy turbinnoy napravlyayushchey reshetki, Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki, 4 (118) (2018) 164–176.
- [6] Shawn Wasserman Choosing the Right Turbulence Model for Your CFD Simulation, ENGINEERING.com. – 2016. URL: <https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/13743/Choosing-the-Right-Turbulence-Model-for-Your-CFD-Simulation.aspx> (accessed February 12, 2020)
- [7] **Nguyen Kuok Kuan**, Chislennoye issledovaniye vliyaniya mezhventsovogo zazora na peremennyye sily v osevoy stupeni turbiny, Molodoy uchenyy, 10 (90) (2015) 270–274.
- [8] **Nakajima, Tomomi Shikano, Yoshio Yamashita, Yutaka**, Prediction of Unsteady Force for Axial Turbine Buckets (Effects of Nozzle-Bucket Axial Gap Length and Blade Count Ratio), Proceedings of ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition, June 3–7, 2013, San Antonio, Texas, USA.
- [9] **Korakianitis T.** On the prediction of unsteady forces on gas turbine blades: Part 1 -Description of the approach, Transaction of the ASME, 114 (1992) 123–131.
- [10] **A.S. Laskin**, Vybór optimalnogo oseвого zazora, obespechivayushchego minimum aerodinamicheskogo vzbuzhdeniya kolebaniy rabochikh lopatok gazovoy turbiny, Energomashinostroyeniye, 2 (1987) 18–25.
- [11] **G.S. Samoylovich**, Vzbuzhdeniye kolebaniy lopatok turbomashin. M., Mashinostroyeniye, 1975.
- [12] **V.I. Gnesin, L.V. Kolodyazhnaya, R. Zhandkovski**, Chislenny analiz trekhmernogo nestatsionarnogo potoka idealnogo gaza v posledney stupeni turbomashiny s uchetom neosesimmetrichnogo vykhlopnogo patrubka, Visnik NTU «KhPI», 8 (1180) (2016) 47–53.
- [13] **Niu, Xiyang Wang, Lin Li, Dongming Du, Qiuli**, Reduction of Turbine Blade Unsteady Forces by Shape Modification of Vanes for Industrial Gas Turbines, Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, June 13–17, 2016, Seoul, South Korea.
- [14] **R. Rzadkowski, V. Gnesin, L. Kolodyazhnaya**, Aeroelasticity Analysis of Unsteady Rotor Blade Forces and Displacements in LP Last Stage Steam Turbine with Various Pressure Distributions the Stage Exit, Journal of Vibration Engineering & Technologies, 6 (5) (2018)..
- [15] **Waite, Joshua J. Kiel, Robert E.** The Impact of Blade Loading and Unsteady Pressure Bifurcations on Low-Pressure Turbine Flutter Boundaries, Journal of Turbomachinery, 138 (4) (2016).
- [16] **Seeley, Charles E. Wakelam, Christian Zhang, Xuefeng Hofer, Douglas Ren.** Wei-Min Investigations of Flutter and Aerodynamic Damping of a Turbine Blade: Experimental Characterization, Journal of Turbomachinery, 139 (8) (2017).
- [17] **Jian Liu, Wei-Yang Qiao, Wen-Hua Duan**, Investigation of Unsteady Aerodynamic Excitation on Rotor Blade of Variable Geometry Turbine, International Journal of Rotating Machinery, (2019). URL: <https://doi.org/10.1155/2019/4396546>
- [18] **Ooten, Michael K. Anthony, Richard J. Lethander, Andrew T. Clark, John P.** Unsteady Aerodynamic Interaction in a Closely Coupled Turbine Consistent With Contrarotation, Journal of Turbomachinery, 138 (6) (2016).

THE AUTHORS

KOLENKO Grigorii S. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: gidrat@mail.ru

LASKIN Aleksandr S. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: as.laskin@mail.ru

Received: 04.02.2020

DOI: 10.18721/JEST.26103
УДК 621.7.044

К.С. Арсентьева, В.С. Мамутов

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

УЧЕТ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ LS-DYNA® ПРИ ТОНКОЛИСТОВОЙ ВЫТЯЖКЕ

Исследовано влияние выбора модели материала и учета скоростей деформации при создании компьютерных моделей импульсного деформирования тонколистовых металлов. В конечно-элементном программном комплексе LS-DYNA разработаны компьютерные модели процессов вытяжки сферических деталей из тонколистового металла методом электрогидроимпульсной вытяжки. Компьютерные расчеты проводились для заготовок из латуни Л68 толщиной 0.24 мм и заготовок из алюминия 5754 толщиной 1 мм в матрицу диаметром 60 мм. Разработана методика уточнения коэффициента скоростного упрочнения металла на основе расчетов в комплексе LS-DYNA, с помощью которых определялся диапазон изменений скоростей эффективных деформации элементов заготовки. Проведено сравнение методов учета скоростного упрочнения металлов при задании различных моделей материала заготовки. Выполнена оценка применимости моделей материала заготовки для решения задач импульсного деформирования тонколистовых металлов.

Ключевые слова: импульсная вытяжка, тонколистовой металл, конечно-элементный комплекс LS-DYNA, скорости деформации, деформационное упрочнение.

Ссылка при цитировании: Арсентьева К.С., Мамутов В.С. Учет скоростей деформации в программном комплексе LS-DYNA® при тонколистовой вытяжке // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2020. Т. 26, № 1. С. 29–40. DOI: 10.18721/JEST.26103

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

X.S. Arsentyeva, V.S. Mamutov

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

STRAIN RATE INFLUENCE ON THIN SHEET METAL DRAWING SIMULATION USING LS-DYNA®

The article presents an investigation of the influence of material model selection and strain rate accounting on the calculation error during impulse sheet metal drawing simulation. Computer models of electrohydraulic thin sheet metal drawing processes have been developed in the LS-DYNA finite-element complex. Computer simulation in this study was carried out for 0.24 mm-thick CuZn33 brass sheet blank and 1mm-thick Aluminum 5754 under impulse drawing into a die 60 mm in diameter. Technique of refining of speed hardening coefficient of metal using LS-DYNA complex has been developed. The technique is based on preliminary computer calculations, which allow defining a changes range of elements effective strain rates in different parts of workpiece. The technique is simple to execute and implement.

Comparison of methods of the strain rate hardening accounting during usage of different material models of workpiece in computer simulations have been provided. The applicability of material models for high-speed computer simulation of thin sheet metal drawing has been assessed.

Keywords: impulse drawing, thin sheet metall, finite-element software LS-DYNA, strain rate, strain hardening

Citation: X.S. Arsenyeva, V.S. Mamutov, Strain rate influence on thin sheet metal drawing simulation using LS-DYNA®, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 26 (01) (2020) 29–40. DOI: 10.18721/JEST.26103

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Для производства сложных точных деталей в мелкосерийном и индивидуальном производстве наиболее эффективны импульсные методы, в частности электрогидроимпульсная (ЭГИ) штамповка [1, 2]. Импульсный характер нагружения, за счет уменьшения пружинения, позволяет повысить точность изготовления деталей в сравнении с квазистатическими методами деформирования [3–6]. ЭГИ штамповка является относительно простой технологией, не требует сложной и дорогостоящей оснастки [7, 8], однако экспериментальные исследования процессов, на которых основывается данная технология, затруднены [9]. Аналитические методы исследования импульсных процессов также неэффективны, поскольку являются приближенными: не учитывают нелинейность физико-механических процессов и оперируют не всей системой исходных уравнений.

С развитием современных ЭВМ появилась возможность численного решения сложных задач обработки металлов давлением во всей полноте технологической и физической постановки. Развитие универсальных конечно-элементных (КЭ) комплексов, таких как LS-DYNA, позволяет моделировать процессы с учетом множества влияющих факторов [10]. Программный комплекс LS-DYNA имеет явный (explicit) решатель и изначально разрабатывался для расчетов воздействия подводных взрывов на металлические конструкции, т. е. рассчитан для решения задач взаимодействия

жидкостей и газов с деформируемой конструкцией и ориентирован на быстротекущие термомеханические процессы. Комплекс LS-DYNA успешно применяется в исследовании импульсных процессов, в частности для расчетов ЭГИ штамповки тонколистовых металлов [5, 11–14]. Программный комплекс позволяет решать многие технологические задачи, важные для проектирования, в том числе оценить влияние скоростей деформации на механические свойства заготовки.

Задачи данной работы: рассмотреть методы задания вида кривой деформационного упрочнения в расчетах; провести компьютерное моделирование в конечно-элементном комплексе LS-DYNA импульсной вытяжки-формовки на примере свободной ЭГИ вытяжки-формовки тонколистовой заготовки; оценить применение различных моделей материала и соответствующих кривых деформационного упрочнения в компьютерных расчетах импульсной вытяжки-формовки.

Методы задания вида кривой деформационного упрочнения в расчетах. Механические свойства деформируемой заготовки имеют большое значение в процессах обработки металлов давлением и их расчетов. Достоверные механические характеристики металлов определяются в результате экспериментальных исследований – специальных испытаний образцов, которые позволяют построить кривые упрочнения материалов в координатах $\sigma_s - \epsilon_t$

[15]. Для дальнейших расчетов используют аппроксимированные кривые деформационного упрочнения.

Деформационное упрочнение материала заготовки при квазистатическом формоизменении учитывается степенным законом, соответствующим усредненной аппроксимации опытных данных по Холломану:

$$\sigma_s = B\varepsilon^m, \quad (1)$$

где σ_s и ε — обозначают истинные напряжения и истинную деформацию соответственно, B и m — коэффициенты аппроксимации кривой деформационного упрочнения, получаемые из опытных данных.

Процесс ЭГИ вытяжки-формовки относится к импульсным процессам, при которых скорости деформации превышают 10^2 с^{-1} и наблюдается дополнительное динамическое упрочнение металла по сравнению с квазистатическими испытаниями при скоростях деформации менее $(0.1...1) \text{ с}^{-1}$ [16, 17]. Следовательно, для расчетов импульсного деформирования необходимо дополнительно учитывать скоростное упрочнение материала заготовки. В инженерных расчетах скоростное упрочнение рекомендуется учитывать с помощью коэффициента динамичности K_d , устанавливаемого для определенного диапазона значений скоростей и степеней деформации, характерных для того или иного процесса¹. В рамках конечно-элементного программного комплекса LS-DYNA коррекцию расчетов, связанную с влиянием скоростей, характерных для импульсных процессов, можно осуществить несколькими способами.

Один из способов — при задании модели материала *MAT_POWER_LAW_PLASTICITY (MPL)* использовать коэффициент динамичности K_d ,

¹ Мамутов А.В. Технологии обработки материалов импульсным давлением. Технологии обработки концентрированными потоками энергии: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2008. 40 с

преобразуя степенной закон (1) в соответствующий:

$$\sigma_s = K_d B \varepsilon^m. \quad (2)$$

Также в программном комплексе существует модель пластичности, которая учитывает влияние скоростей деформации и обычно используется для расчетов сверхпластичных процессов формоизменения: *RATE_SENSITIVE_POWER_LAW_PLASTICITY (RSPL)*, соответствующая степенному закону:

$$\sigma_s = B \varepsilon^m \dot{\varepsilon}^n, \quad (3)$$

где $\dot{\varepsilon}$ — скорость деформации; n — коэффициент скоростного упрочнения.

Известно, что коэффициент скоростного упрочнения n для расчетов процессов импульсной штамповки определяется по следующей формуле [18]:

$$n = \theta_2 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) / \ln \dot{\varepsilon}, \quad (4)$$

где θ_2 — экспериментальная константа материала, определяемая по формуле:

$$\theta_2 \cong \ln(K_d) / \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right). \quad (5)$$

Подставляя выражение (5) в выражение (4) получаем:

$$n = \ln(K_d) / \ln(\dot{\varepsilon}). \quad (6)$$

Из чего следует вывод, что коэффициент скоростного упрочнения зависит от коэффициента динамичности, определяемого материалом заготовки и скоростью деформирования заготовки.

Скорость деформаций при ЭГИ штамповке обычно находится в пределах от 10^2 до 10^4 с^{-1} из-за чего коэффициент n для одного и того же материала и вида технологического процесса варьируется в достаточно широком диапазоне (табл. 1). Большее значение коэффициента n соответствует меньшим скоростям деформации; меньшее значение коэффициента n соответствует большим скоростям деформации.

Таблица 1
Параметры коэффициента n при ЭГИ вытяжке-формовке

Table 1

Parameters of coefficient n during electro-hydraulic drawing

Материал заготовки	Коэффициент n
Латунь Л68	0.0242...0.0485
Алюминий 5754	0.0544...0.1087

Величина диапазона приводит к тому, что использование тех или иных значений коэффициента n влечет за собой широкий разброс получаемых значений эффективной пластической деформации. В связи с этим предлагается новая методика уточнения коэффициента скоростного упрочнения n через коэффициент динамичности K_d .

Методика уточнения коэффициента скоростного упрочнения металла. Методика уточнения коэффициента скоростного упрочнения n реализуется с помощью расчетов в КЭ комплексе LS-DYNA.

Предварительный компьютерный расчет проводится с целью определения диапазона скоростей эффективной деформации с учетом характера нагружения, свойств материала, а также формы и размеров заготовки, что позволит уточнить диапазон скоростей деформации, актуальных для конкретного исследуемого процесса. Полученные данные подставляются в выражение (6), что позволяет уточнить диапазон значений коэффициента скоростного упрочнения n с учетом специфики конкретного процесса.

Последовательность методики показана на примере расчета ЭГИ вытяжки-формовки тонколистовых металлов. Компьютерная модель для расчета создавалась следующим образом. Для заготовки, матрицы и прижима применялись оболочечные модели. Тип элемента для заготовки брался *Thin Shell 163*. Заготовка задавалась многослойной (21 слой) моментной оболочкой по типу *Belytschko-Wong*, который позволяет учитывать изгибающую жесткость. Фактор изгиба (Shear Factor) задавался равным

0.833. Интегрирование напряжений по слоям осуществлялось трапецеидальным законом. Оснастка задавалась двухслойной оболочкой типа *Belytschko*. Материалы заготовок задавались моделями *MPL* и *RSPL*. Материалы прижима и матрицы предполагались абсолютно жесткими и задавались моделью *RIGID* с запретом перемещения и вращения.

Геометрия заготовок и оснастки показана на рис. 1. Начальное положение заготовки – плоскость XY , приложение нагрузки задавалось по оси Z . Для эффективного использования вычислительных ресурсов в расчете задавалась 1/4 заготовки и оснастки. Для линии, ограничивающей заготовку по плоскости симметрии ZX , устанавливался запрет на перемещение и скорость по оси Y и вращение по оси X . Для линии, ограничивающей заготовку по плоскости симметрии ZY , устанавливался запрет на перемещение и скорость по оси X и вращение по оси Y . При контрольном расчете с целыми заготовкой и оснасткой, расхождения в значениях величин скоростей деформации и эффективных пластических деформаций при прочих равных исходных данных не отмечено.

Характеристики материала заготовок даны в табл. 2. Задавалось полусухое трение, которое при решении задач не варьировалось, а его влияние на расчет не оценивалось. Параметры кривой деформационного упрочнения B и m для обоих материалов были определены с помощью аппроксимации опытных данных степенным законом Холломана (1).

Форма импульса давления задавалась зависимостью:

$$p = p_0 N_p (t/\theta)^a \exp(-bt/\theta) \quad (7)$$

где p_0 – амплитудное значение давления, θ – характеристическое время, за которое давление уменьшается в e раз, t – время. Нормирующие величины N_p , a , b определяются соотношениями: $N_p = \exp(b - 1)$; $a = bc$; $b = 1/(1 - c + c \ln c)$, где $c = t_m/\theta$ – коэффициент жесткости фронта давления; t_m – время нарастания давления. В предварительном компьютерном расчете коэффициент жесткости фронта выбирался средним: $c = 0.3$.

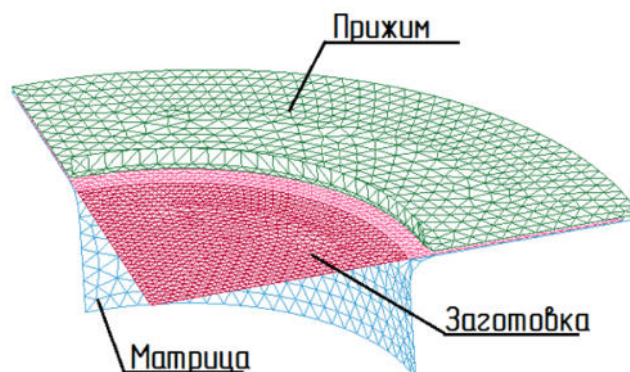


Рис. 1. Конечно-элементная модель матрицы, заготовки и прижима для ЭГИ вытяжки
 Fig. 1. Finite-element model of a die, workpiece and holder for an electro-hydraulic drawing

Таблица 2

Геометрические параметры и характеристики материала заготовки

Table 2

Geometric parameters and characteristics of the workpiece material

Материал заготовки	Латунь Л68	Алюминий 5754	
Диаметр заготовки, мм	110	124	
Толщина заготовки, мм	0.24	1	
Диаметр отверстия матрицы, мм	60	60	
Радиус скругления кромки матрицы, мм	3	5	
Модуль Юнга (E), ГПа	115	71	
Коэффициент Пуассона (ν)	0.34	0.3	
Плотность (ρ), кг/м ³	8600	2660	
Кулоновское трение	покоя	0.15	0.15
	движения	0.1	0.1
Параметры кривой деформационного упрочнения	B	742	414.7
	m	0.404	0.256
Коэффициент динамичности (K_d)	1.25	1.65	

Амплитудная величина импульса давления подбиралась таким образом, чтобы максимальная деформация была ниже кривой FLD, соответствующей началу потери устойчивости (рис. 2).

Результаты расчета представлены ниже. При помощи программного комплекса LS-DYNA выводились графики изменения скорости эффективной деформации во времени $\frac{d\epsilon_{eff}}{dt}$ для элементов в центре заготовки и ближайшей области (рис. 3).

Компьютерные расчеты показали, что максимальные скорости деформаций достигаются

в центральной части заготовок и снижаются в точках в зависимости от удаленности от центра. Для латуни Л68 максимальные скорости деформаций для выбранного процесса, а также геометрии оснастки и заготовки, достигают 6100 с^{-1} ; для алюминия – 3400 с^{-1} .

Полученные скорости позволяют рассчитать уточненные коэффициенты скоростного упрочнения металла n для процесса ЭГИ вытяжки-формовки тонколистовых заготовок (табл. 3). Полученные данные находятся в допустимых диапазонах значений коэффициента n для рассматриваемых технологических процессов.

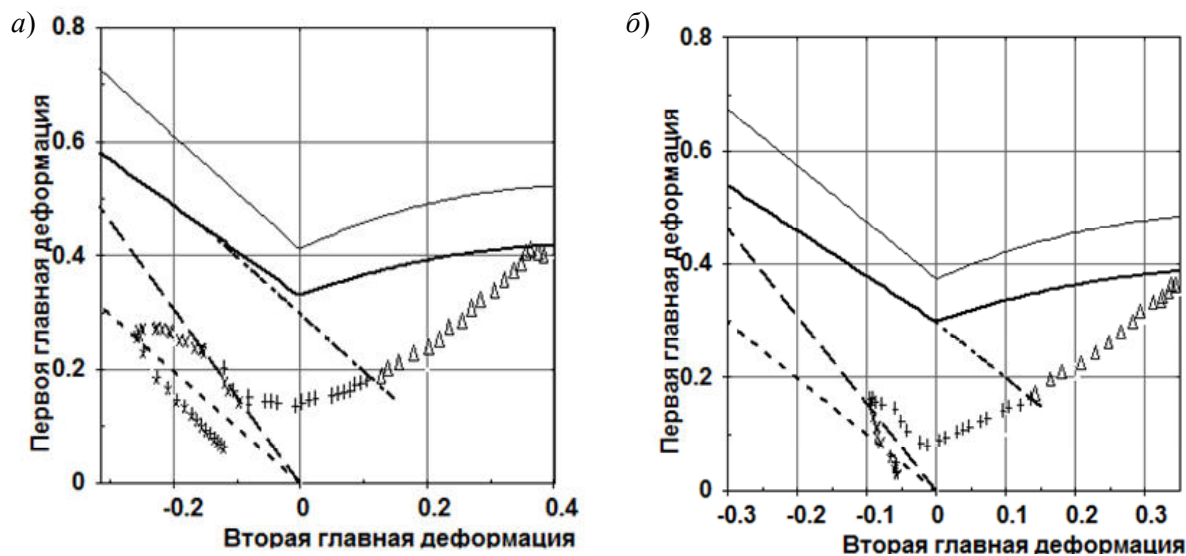


Рис. 2. Диаграмма предельных деформаций (FLD) заготовки, деформированной при ЭГИ вытяжке-формовке: *a* – для заготовки из латуни Л68; *b* – для заготовки из алюминия 5754

Fig. 2. Forming limit diagrams (FLD) of workpieces after electro-hydraulic drawing: *a* – CuZn33 brass; *b* – aluminum 5754

Результаты компьютерного моделирования с заданием разных видов кривой деформационного упрочнения. Для того, чтобы определить возможность использования описанных выше степенных законов и моделей материала для расчетов задач высокоскоростного деформирования тонколистовой заготовки, были проведены сравнительные расчеты процесса свободной ЭГИ вытяжки-формовки заготовок из латуни Л68 и алюминия 5754. Для расчетов с моделью материала *MPL* использовались те же данные, что и в предварительном расчете (табл. 2). Для расчетов с моделью материала *RSPL* добавлялся коэффициент скоростного упрочнения $n = 0.0257$ для латуни Л68 и $n = 0.0615$ для алюминия 5754. При работе с моделью материала *RSPL* коэффициент динамичности K_d при задании характеристик материала не использовался. Форма импульса давления задавалась зависимостью (7). Для пар расчетов амплитудное значение давления задавалось одинаковым.

По результатам компьютерных расчетов определялась относительная погрешность рас-

чета эффективных пластических деформаций (8). Сравнение проводилось по результатам расчетов, полученных с использованием рассмотренных моделей материала *MPL* и *RSPL*.

$$\delta_\epsilon = \frac{|\epsilon_{eff1}^p - \epsilon_{eff2}^p|}{\epsilon_{eff2}^p} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где ϵ_{eff1}^p – соответствует эффективным пластическим деформациям заготовки, рассчитанные по степенному закону *MPL*; ϵ_{eff2}^p – соответствует эффективным пластическим деформациям заготовки, рассчитанные по степенному закону *RSPL*.

Эффективная пластическая деформация близка к интенсивности тензора накопленных деформаций (эквивалентной деформации). Точнее, эффективная деформация – это интеграл по времени интенсивности тензора скоростей деформаций. Оба варианта вычисления эффективной деформации совпадают, когда тензоры накопленных деформаций и скоростей деформаций соосны, что практически имеет место в условиях данных расчетов.

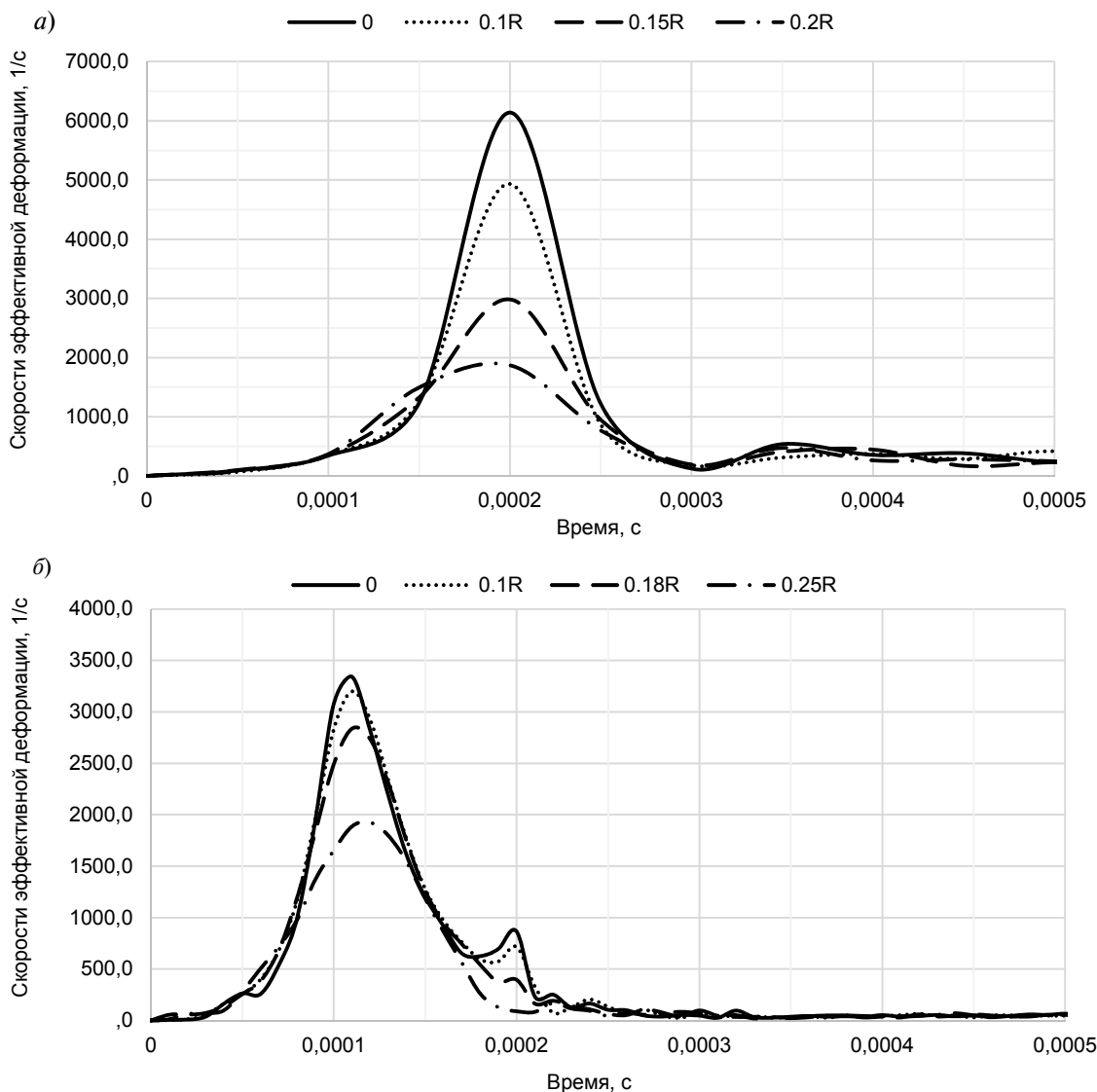


Рис. 3. График изменения скоростей деформации элементов центральной части заготовки с течением времени в зависимости от удаленности от центра (R – радиус заготовки): а) – латунь, б) – алюминий

Fig. 3. Changes of strain rates in time of workpiece elements depending on the element distance from the center (R – radius of the workpiece): a) – brass, b) – aluminum

Таблица 3

Параметры уточненного коэффициента n при ЭГИ вытяжке-формовке

Table 3

Parameters of the refined coefficient n during electro-hydraulic drawing

Материал заготовки	Коэффициент n
Латунь Л68	0.0257
Алюминий 5754	0.0615

На рис. 4 показаны относительные отклонения значений эффективных пластических деформаций, рассчитанных для модели материала MPL , от значений, рассчитанных для модели материала $RSPL$ для различных элементов заготовки.

Как видно из графиков, значения эффективных пластических деформаций, рассчитанных для модели материала MPL , имеют различные погрешности в зависимости от выбранного

элемента. Также следует отметить, что наибольшие отклонения наблюдаются в период времени до 100 мкс, который соответствует этапу начального разгона заготовки. При дальнейшем формоизменении наблюдаются отклонения в эффективных пластических деформациях менее 5 % для заготовки из латуни Л68 и менее 10 % для заготовки из алюминия 5754. К моменту остановки заготовки отличия в значениях эффективных пластических деформаций

для двух моделей материала не превышают 3 % (табл. 4), что свидетельствует о сопоставимости построенных моделей.

Также проводились сравнения по относительному профилю заготовок в момент останова. На рис. 5 показаны кривые для заготовок из латуни Л68. Как видно из графиков, отклонения по относительному профилю не превышают 1...3 %. Для заготовок из алюминия 5754 были получены аналогичные результаты.

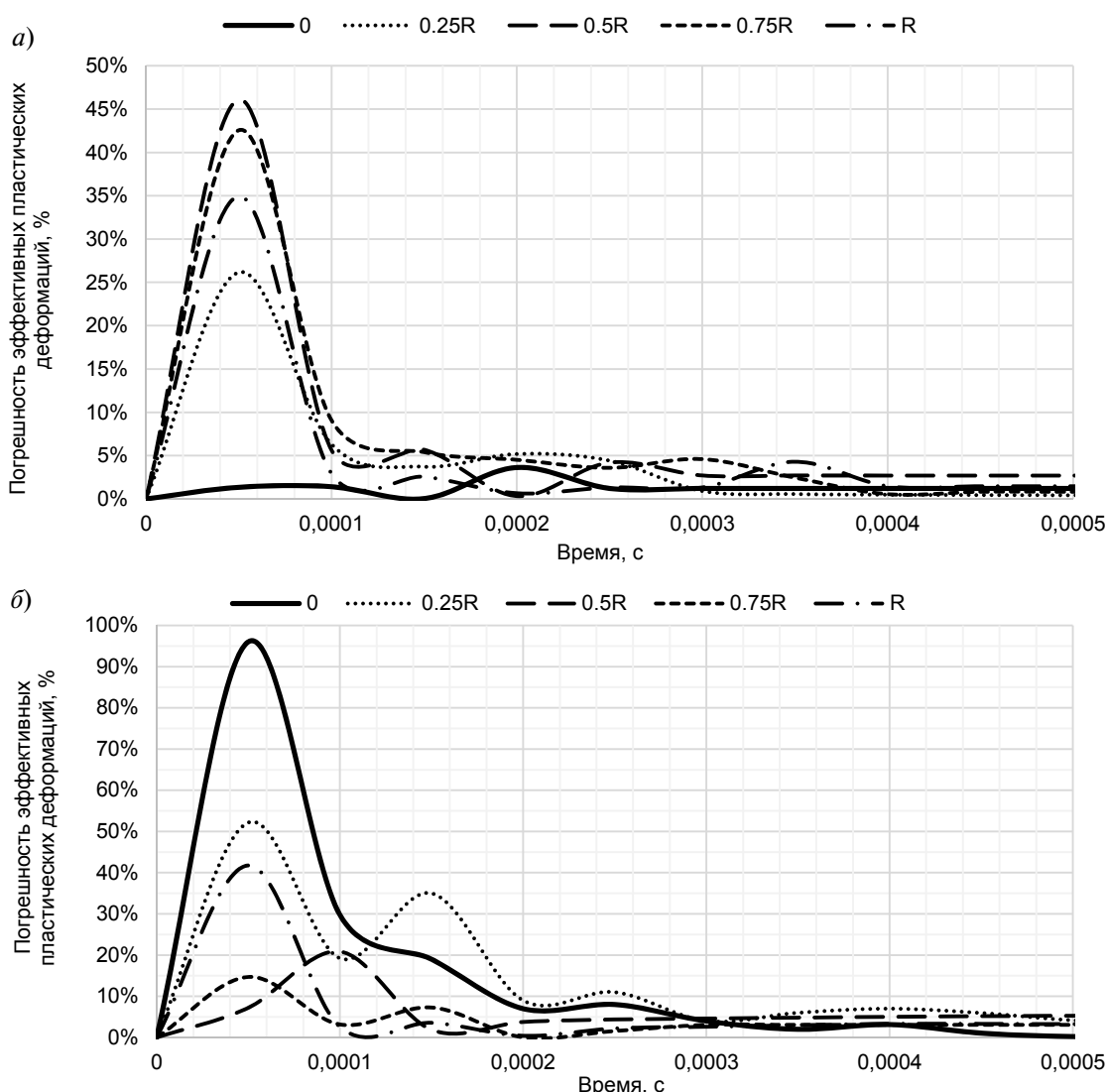


Рис. 4. Отклонения эффективных пластических деформаций для заготовки из латуни Л68 (а) и алюминия 5754 (б), рассчитанных для модели материала *MPL*, от значений, рассчитанных для модели материала *RSPL*

Fig. 4. Deviations of effective plastic strain for brass (a) and aluminum (b) workpieces, calculated for the *MPL* material model, from the values calculated for the *RSPL* material model

Таблица 4

Погрешность эффективных пластических деформаций δ_e в момент остановки заготовки

Table 4

The Error of effective plastic strain δ_e at the time of workpiece stopping

Материал	0	0,25R	0,5R	0,75R	R
Латунь Л68	1,22 %	0,42 %	2,71 %	0,82 %	1,47 %
Алюминий 5754	0,21 %	1,06 %	1,46 %	2,06 %	2,95 %

Примечание: R – радиус заготовки.

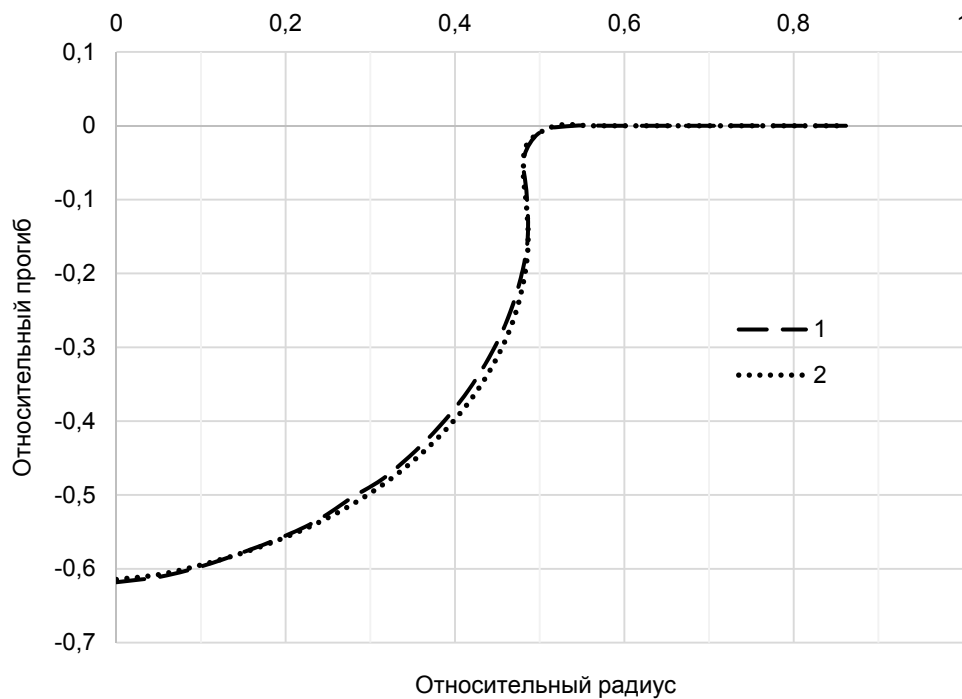


Рис. 5. Кривые относительного профиля заготовок из латуни Л68, полученных в момент остановки:
1 – MPL; 2 – RSPL

Fig. 5. Curves of the relative profile of brass workpieces obtained at the time of stopping: 1 – MPL; 2 – RSPL

Выводы

Были рассмотрены различные методы задания кривой деформационного упрочнения в компьютерных расчетах и соответствующие им модели материала заготовки. Отмечено, что для учета скоростей деформации в модели MPL используется коэффициент динамичности K_d , а в модели RSPL коэффициент скоростного упрочнения n . Разработана и представлена методика уточнения коэффициента скоростного

упрочнения n для процессов импульсной вытяжки-формовки тонколистового металла, которая учитывает геометрию заготовки и специфику процесса деформирования.

В рамках КЭ комплекса LS-DYNA разработаны компьютерные модели процессов вытяжки-формовки тонколистовых заготовок из латуни Л68 и алюминия 5754 при импульсном нагружении для моделей материала, учитывающих различные степенные законы деформационного упрочнения, и проведены соответ-

ствующие компьютерные расчеты свободной ЭГИ вытяжки-формовки тонколистовых заготовок.

Проведена оценка влияния выбора модели материала заготовки и соответствующего им вида кривой деформационного упрочнения на расчеты высокоскоростной вытяжки-формовки.

Модель материала *RSPL* и соответствующая ей кривая деформационного упрочнения (3) позволяет получать более точные результаты расчетов из-за применяемого вида степенного закона, однако использование данной модели связано с некоторыми трудностями. Во-первых, для использования модели требуется предварительный расчет, уточняющий коэф-

фициент скоростного упрочнения металла *n*. Во-вторых, применение данной модели в 2 – 2.5 раза увеличивает время счета одной задачи и использует больше компьютерных ресурсов, из-за чего зачастую необходимо укрупнять конечно-элементную сетку оснастки и заготовки, что может привести к погрешностям в расчетах.

Проведенное исследование позволяет сказать, что применение модели материала *MPL* и советующей кривой деформационного упрочнения (2) с коэффициентом динамичности дает погрешность расчетов 1...3 % в сравнении с моделью материала *RSPL* и является приемлемым для инженерных расчетов и исследования процессов импульсной вытяжки-формовки тонколистовых металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Здор Г.Н., Исаевич Л.А., Качанов И.В. Технологии высокоскоростного деформирования материалов. Минск: БНТУ, 2010. 456 с.
- [2] Linnemann M., Psyk V., Djakow E., Springer R., Landgrebe D. High-Speed Incremental Forming – New Technologies For Flexible Production Of Sheet Metal Parts // *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 27. P. 21–26.
- [3] Mehdi Zohoor, Seyed Meysam Mousavi. Experimental analysis and smoothed particle hydrodynamics modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts // *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. Vol. 35. P. 16–28.
- [4] Jia Cheng, Daniel E. Green, Sergey F. Golovashchenko. Formability enhancement of DP600 steel sheets in electro-hydraulic die forming // *Journal of Materials Processing Technology*. 2017. Vol. 244. P. 178–189.
- [5] Christopher Maris, Amir Hassannejadasl, Daniel E. Green, Jia Cheng, Yiteng Liang. Comparison of quasi-static and electrohydraulic free forming limits for DP600 and AA5182 sheets // *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 235. P. 206–219.
- [6] Radha Krishna Lal, Vikas Kumar Choubey, Dwivedi J.P., Shravan Kumar. Study of factors affecting Springback in Sheet Metal Forming and Deep Drawing Process // *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5, is. 2. P. 1. P. 4353–4358.
- [7] Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. 253 с.
- [8] Langstädtler L., Pegel H., Beckschwarte B., Herrmann M., Kuhfuss B. Flexible tooling for impulse forming // *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 27. P. 130–137.
- [9] Старков Н.В., Старков И.Н. Определение параметров разрядного контура электрогидравлического прессы при штамповке листовых деталей сложной формы // *Электронная обработка материалов*. 2017. 53(1). P. 108–113.
- [10] Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, 2006. 498 p.
- [11] Мамутов А.В., Мамутов В.С. Моделирование электрогидроимпульсной листовой формовки с применением комплекса LS-DYNA // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2014. Вып. 1 (190). С. 101–107.
- [12] Mamutov V.S., Mamutov A.V., Golovaschenko S.F. Simulation of High-Voltage Discharge Channel in Water at Electro-Hydraulic Forming Using LS-DYNA®. 1th International LS-DYNA® Users Conference, Metal forming, Dearborn, USA, 2014, p. 9.
- [13] Лепеш Г.В., Иванова Е.С., Егоров К.А. Применение CAD/CAE технологий для исследования работоспособности эластичного обтюлятора в условиях импульсного нагружения высоким давлением // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2016. № 1 (35). С. 24–29.
- [14] Arash Jenab, Daniel E. Green, Ahmet T. Alpas, Sergey F. Golovashchenko. Experimental and numerical



analyses of formability improvement of AA5182-O sheet during electro-hydraulic forming // Journal of Materials Processing Technology. 2018. Vol. 255. P. 914–926.

[15] **Третьяков А.В., Зюзин В.И.** Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1973. 224 с.

[16] **Мазуровский Б.Я., Сизев А.Н.** Электрогидравлический эффект в листовой штамповке. Киев: изд-во Наукова думка, 1983. 192 с.

[17] **Jitang Fan, Minqiang Jiang.** Strain hardenability of a gradient metallic alloy under high-strain-rate compressive loading // Materials & Design. 2019. Vol. 170. Article 107695.

[18] **Мамутов В.С., Мамутов А.В.** Теория обработки металлов давлением. Компьютерное моделирование процессов листовой штамповки. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 188 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АРСЕНТЬЕВА Ксения Сергеевна — кандидат технических наук ассистент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: xenia.ars@gmail.com

МАМУТОВ Вячеслав Сабайдинович — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: mamutov_vs@spbstu.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 15.11.2019

REFERENCES

[1] **G.N. Zdor, L.A. Isayevich, I.V. Kachanov,** Tekhnologii vysokoskorostnogo deformirovaniya materialov [Technologies of high-voltage deformation of materials: monograph]. Minsk: BNTU, 2010.

[2] **M. Linnemann, V. Psyk, E. Djakow, R. Springer, D. Landgrebe,** High-Speed Incremental Forming – New Technologies For Flexible Production Of Sheet Metal Parts, Procedia Manufacturing, 27 (2019) 21–26.

[3] Mehdi Zohoor, Seyed Meysam Mousavi. Experimental analysis and smoothed particle hydrodynamics modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts, Journal of Manufacturing Processes, 35 (2018) 16–28.

[4] **Jia Cheng, D.E. Green, S.F. Golovashchenko,** Formability enhancement of DP600 steel sheets in electro-hydraulic die forming, Journal of Materials Processing Technology, 244 (2017) 178–189.

[5] **Maris Christopher, Amir Hassannejadasl, D.E. Green, Jia Cheng, Yiteng Liang,** Comparison of quasi-static and electrohydraulic free forming limits for DP600 and AA5182 sheets, Journal of Materials Processing Technology, 235 (2016) 206–219.

[6] **Radha Krishna Lal, Vikas Kumar Choubey, J.P. Dwivedi, Shravan Kumar,** Study of factors affecting Springback in Sheet Metal Forming and Deep Drawing Process, Materials Today: Proceedings, 5 (2-1) (2018) 4353–4358.

[7] **L.A. Yutkin,** Elektrogidravlicheskiy effekt i yego primeneniye v promyshlennosti [Electro-hydraulic effect and its application in industry]. L.: Mashinostroyeniye, Leningr. otd-niye, 1986.

[8] **L. Langstädtler, H. Pegel, B. Beckschwarte, M. Herrmann, B. Kuhfuss,** Flexible tooling for impulse forming, Procedia Manufacturing, 27 (2019) 130–137.

[9] **N.V. Starkov, I.N. Starkov,** Opredeleniye parametrov razryadnogo kontura elektrogidravlicheskogo pressa pri shtampovke listovykh detaley slozhnoy formy [Determination of the parameters of the discharge circuit of an electro-hydraulic press during stamping of sheet parts of complex shape], Elektronnaya obrabotka materialov, 53(1) (2017) 108–113.

[10] **J.O. Hallquist,** LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, SA, 2006.

[11] **A.V. Mamutov, V.S. Mamutov,** Modelirovaniye elektrogidroimpulsnoy listovoy formovki s primeneniyyem kompleksa LS-DYNA, Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU, 1 (190) (2014) 101–107.

[12] **V.S. Mamutov, A.V. Mamutov, S.F. Golovaschenko,** Simulation of High-Voltage Discharge Channel in Water at Electro-Hydraulic Forming Using LS-DYNA®, 1th International LS-DYNA® Users Conference, Metal forming, Dearborn, USA, (2014) 9.

- [13] **G.V. Lepesh, Ye.S. Ivanova, K.A. Yegorov**, *Primeneniye CAD/CAE tekhnologiy dlya issledovaniya rabotosposobnosti elastichnogo obturatora v usloviyakh impulsnogo nagruzheniya vysokim davleniyem* [Application of CAD/CAE technologies for research of operability of the elastic obturator in conditions of shock loading by the high pressure], *Tekhniko-tekhnologicheskiye problemy servisa*, 1 (35) (2016) 24–29.
- [14] **Arash Jenab, D.E. Green, A.T. Alpas, S.F. Golovashchenko**, *Experimental and numerical analyses of formability improvement of AA5182-O sheet during electro-hydraulic forming*, *Journal of Materials Processing Technology*, 255 (2018) 914–926.
- [15] **A.V. Tretyakov, V.I. Zyuzin**, *Mekhanicheskiye svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniyem* [Mechanical properties of metals and alloys during pressure processing]. M.: Metallurgiya, 1973.
- [16] **B.Ya. Mazurovskiy, A.N. Sizev**, *Elektrohidravlicheskiy effekt v listovoy shtampovke* [Electrohydraulic effect in Sheet Forming]. Kiyev: izd-vo Naukova dumka, 1983.
- [17] **Jitang Fan, Minqiang Jiang**, *Strain hardenability of a gradient metallic alloy under high-strain-rate compressive loading*, *Materials & Design*, 170 (2019), Article 107695.
- [18] **V.S. Mamutov, A.V. Mamutov**, *Teoriya obrabotki metallov davleniyem. Kompyuternoye modelirovaniye protsessov listovoy shtampovki* [Theory of metal forming. Computer modeling of sheet metal stamping processes]. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2006.

THE AUTHORS

ARSENTYEVA Xenia S. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: xenia.ars@gmail.com

MAMUTOV Viacheslav S. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: mamutov_vs@spbstu.ru

Received: 15.11.2019

DOI: 10.18721/JEST.26104
УДК 544.6.076.324.4

Н.Е. Озерской, А.А. Попович, Б.С. Ермаков

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

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАНОДИСПЕРСНОГО ПОРОШКА КРЕМНИЯ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В КАЧЕСТВЕ АНОДА ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА.

В данной работе подробно исследован процесс получения наноразмерного сферического порошка кремния с использованием индуктивно-связанной аргоново-водородной плазмы из микронного порошка чистого кремния осколочной формы. Был разработан режим, имеющий наиболее высокий процент выхода годного для использования. Был изучен фазовый и гранулометрический состав полученного порошка, его морфология, а также площадь поверхности. Полученный порошок кремния был использован в качестве анодного материала для литий-ионного аккумулятора. Собранный макет аккумулятора был исследован с использованием процесса гальваностатического заряда/разряда, циклической вольтамперометрии. Рабочий электрод показал емкость 2056 мАч/г во время заряда и 1977 мАч/г во время разряда соответственно. Также была установлена зависимость количества циклов заряд/разряд от размера частиц полученного порошка кремния.

Ключевые слова: плазмохимический синтез, литий-ионный аккумулятор, анод литий-ионного аккумулятора, кремниевый анод, нанодисперсный кремниевый порошок

Ссылка при цитировании: Озерской Н.Е., Попович А.А., Ермаков Б.С. Плазмохимический синтез нанодисперсного порошка кремния и его использование в качестве анода литий-ионного аккумулятора // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2020. Т. 26, № 1. С. 41–52. DOI: 10.18721/JEST.26104

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

N.E. Ozerskoj, A.A. Popovich, B.S. Ermakov

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

PLASMACHEMICAL SYNTHESIS OF NANODISPERSED SILICON POWDER AND ITS USE AS ANODE IN LITHIUM-ION BATTERY

In the work we investigated in detail the process of obtaining nanosized spherical silica powder from micron powder fragmental forms using inductively coupled argon-hydrogen plasma. The mode with the highest percentage of usable yield was developed. In the course of research, the phase composition, the morphology of the particles, particle size distribution and specific surface area of the powder was studied. The resulting silicon powder was used as the anode material for the lithium-ion battery. The assembled model of the battery was investigated using the process of galvanostatic charge/discharge, cyclic voltammetry. The working electrode showed a capacity of 2056 mAh/g during charge and 1977 mAh/g during discharge, respectively. The dependence of the number of charge/discharge cycles on the particle size of the resulting silicon powder was also established.

Keywords: plasmachemical synthesis, lithium-ion battery, anode of lithium-ion battery, silicon anode, nanodispersed silicon powder

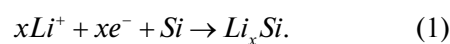
Citation: N.E. Ozerskoi, A.A. Popovich, B.S. Ermakov, Plasmachemical synthesis of nanodispersed silicon powder and its use as anode in lithium-ion battery, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 26 (01) (2020) 41–52. DOI: 10.18721/JEST.26104

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Технологический прогресс не стоит на месте. Человечество стремится заменить двигатели внутреннего сгорания, использующие в качестве топлива углеводороды, более экологически чистыми – источниками ЭДС многократного действия, основанными на обратимости внутренних химических процессов. Они имеют определённые преимущества по сравнению с двигателями внутреннего сгорания: отсутствие негативного воздействия на окружающую среду, низкая, по сравнению с углеводородным топливом, стоимость. Однако у них имеются и определённые недостатки такие как: высокая стоимость производства, ограниченный запас хода электромобилей, не налаженный процесс массовой утилизации батарей.

Одним из самых перспективных химических источников тока являются литий-ионные аккумуляторы. В настоящее время в качестве коммерческого анодного материала выступает графит, имеющий теоретическую ёмкость 372 мАч/г и высокую циклическую стабильность. В настоящее время графит используется повсеместно в качестве анодного материала, так как

не является лимитирующим компонентом в литий-ионном аккумуляторе, но уже сейчас научный мир рассматривает ему альтернативу: его различные наноразмерные модификации [1–3], а также комбинации графита с различными материалами, такими как: кремний, олово, германий, марганец, цинк и их оксидами [5–14]. Самым перспективным из них является кремний, который в самой литируемой модификации $\text{Li}_{4.4}\text{Si}$ ($\text{Li}_{22}\text{Si}_5$) имеет высокую теоретическую ёмкость 4200 мАч/г. Химическая реакция интеркаляции лития выглядит следующим образом:



На основе фазовой диаграммы системы литий-кремний [4] можно выделить следующие стабильные соединения, образующиеся в процессе получения кремниевых анодов: $\text{Li}_{3.75}\text{Si}$ ($\text{Li}_{15}\text{Si}_4$), $\text{Li}_{3.25}\text{Si}$ ($\text{Li}_{13}\text{Si}_4$), Li_7Si_3 , $\text{Li}_{12}\text{Si}_7$.

Наравне с этим кремний имеет существенный недостаток – это значительное увеличение в объёме (до 400 %) во время интеркаляции лития в его структуру. Увеличение объёма приводит к разрушению частицы кремния (рис. 1) [4],

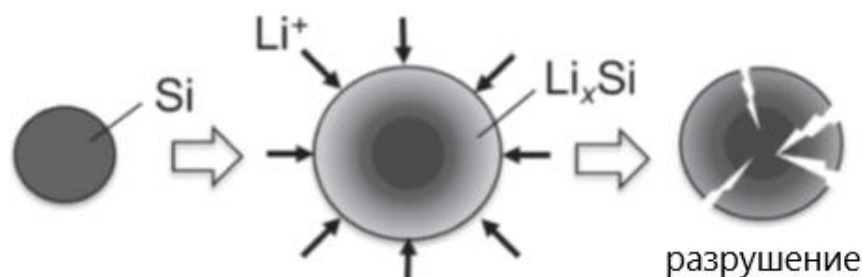


Рис. 1. Изменение морфологии частицы микронного размера в процессе заряда/разряда [8]

Fig. 1. Schematic representation of the process of casting silicon particles larger than 150 nm in the process of charge/discharge

Вследствие этого нарушается межфазная граница твёрдое-электролит (SEI), что приводит к необратимым последствиям и деградации аккумулятора. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что наноразмерные частицы кремния, имеющие размер меньший, чем 150 нм, могут эффективно решить проблему механических напряжений и, соответственно, избежать размельчения [9].

Для получения наноразмерных частиц кремния используется несколько различных методов: химическое осаждение из газовой фазы (CVD) [15, 16], лазерное осаждение [17], магниотермическое восстановление [18], а также распыление порошка в потоке низкотемпературной индуктивно-связанной плазмы [19–22].

Цель настоящей работы состоит в получении наноразмерного кремния методом распыления в пламени индуктивно-связанной плазмы, а также его использования в качестве анодного материала литий-ионного аккумулятора.

Экспериментальная часть

Синтез наноразмерного порошка кремния. Индуктивно-связанная плазма представляет собой газовый разряд, образующийся внутри разрядной камеры, возбуждающийся высокочастотным переменным магнитным полем при помощи индукционной катушки. Высокая температура плазмы ($\sim 10^3$ – 10^4 K) обеспечивает переход всех исходных веществ в газообразное ионизированное состояние, что, соответственно, приводит к высокой скорости взаимодействия и быстрому протеканию реакции. В данной работе синтез проводился с использованием установки с индуктивно-связанной плазмой TEKNA Tek-15 с установленным реактором для получения наноразмерных порошков TekNano. Схематичное изображение установки представлено на рис. 2.

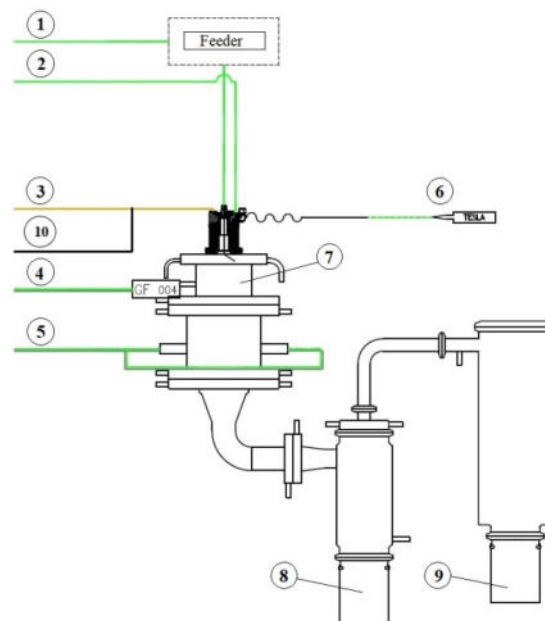


Рис. 2. Схематичное изображение реакторной системы установки TEKNA Tek-15. 1 – несущий газ; 2 – центральный газ; 3 – защитный газ; 4 – закалочный газ#1; 5 – закалочный газ#2; 6 – стартерная линия; 7 – нанореактор TekNano; 8 – сборочный контейнер циклона; 9 – сборочный контейнер фильтра; 10 – опциональный газ

Fig. 2. Schematic representation of the reactor setup system TEKNA Tek-15. 1 – Carrier gas; 2 – Central gas; 3 – Sheath gas; 4 – Quench gas#1; 5 – Quench gas#2; 6 – Starter; 7 – Nanoreactor TekNano; 8 – Cyclone canister; 9 – Filter canister; 10 – Option gas

В качестве исходного порошка был использован кремний (Xuzhou LingYun Silicon Industry Co.,Ltd, 99,99 %) имеющий размер частиц $D_{50}=12\mu\text{m}$. В газовой системе установки использовались такие газы как Ar (>99,999 %) и H_2 (>99,999 %). Аргон использовался в качестве несущего, центрального, защитного и закалочных#1#2 газов. Водород использовался в качестве опционального газа для поддержания горения аргоновой плазмы при работе установки на высокой мощности.

Исходный порошок кремния перед синтезом в установке был высушен в вакуумном шкафу при 80° в течение 12 ч. Загрузка порош-

ка составила 33 г. После загрузки газовая система установки была продута аргоном для удаления из системы воздуха. Затем была установлена скорость подачи порошка в плазмотрон, которая составила 495 г/час, путем подбора такта и частоты вибрации податчика порошка. Перед поджигом плазмы были установлены расходы газов: защитного – 35 ст.л./мин., центрального – 10 ст.л./мин. и закалочного #1 – 30 ст.л./мин. Затем, когда мощность установки достигла 1,4 кВт, был произведен поджиг плазмы. При достижении мощности 10 кВт, в газовую систему начали подавать водород при этом увеличивая мощность до максимально возможной. На максимальной мощности (15 кВт) расход водорода составлял 4 ст.л./мин. После этого в систему был подан закалочный газ #2 с расходом 50 ст.л./мин.. Давление в реакторе установки было установлено на уровне 1 атмосферы. Затем была активирована подача порошка с установкой расхода несущего газа 7 ст.л./мин. в зону низкотемпературной плазмы. Время синтеза составило 4 мин. После его окончания была проведена продувка системы аргоном для удаления остатков водорода. Затем были сняты сборочные контейнеры циклона и фильтра. Из первого было извлечено 10,3 г порошка, из второго 10,6 г.

Исследование полученного порошка. Морфология поверхности была исследована с использованием сканирующего электронного микроскопа (Tescan Maia 3) с детектором флуоресцентного излучения (Bruker X-Flash 6|10). Рентгеноструктурный анализ был проведен с использованием излучения Cu K α (1,5406 Å) в диапазоне углов 2 θ от 10° до 80° (Bruker D8 Advance). Лазерным дифрактометром было получено распределение частиц по размеру (Malvern Mastersizer 3000). Так же был проведен анализ площади поверхности полученного порошка (Micrometrics ASAP 2460).

Электрохимические испытания. Полученный порошок кремния был смешан с Super-P

и PVDF в NMP (67,5:13,2:19,3). Получившаяся суспензия была нанесена на медную фольгу (25 мкм) с помощью тестовой намазочной машины (ShangDong Zhong Yi Equipment Co.,Ltd). Рабочие электроды были собраны в coin-cell CR 2032 в перчаточном ящике с аргонной атмосферой (Vigor V-lab, O₂ and H₂O < 1 ppm). Раствор 1,1M LiPF₆ в этиленкарбонате, этилметилкарбонате и диметилкарбонате (в объёмном соотношении 1:1:1) был использован в качестве электролита. Celgard 2400 (25 мкм) был использован в качестве сепаратора. Металлический литий был использован как противодействующий электрод. Методом гальваностатического заряда/разряда была исследована ёмкость полученных электродов в диапазоне напряжений 0,01–1,5 В относительно Li/Li⁺. Плотность тока была установлена 1А/г без начальных стабилизационных циклов (NEWARE BTS CT-3008). Также было проведено исследование собранного макета с помощью циклической вольтамперометрии в диапазоне напряжений 0,01–1,5 В при скорости сканирования 0,1 мВ/сек (АМТЕК 1400).

Результаты и их обсуждение

Описание характеристик полученного порошка кремния.

Так как плазма является высокотемпературным теплоносителем, порошок кремния, попадая в неё, сначала плавится, а затем испаряется. Затем попадая в зону, где подаются закалочные газы, конденсируется и возвращается в твердое состояние. Процесс синтеза наноразмерного кремния представлен на рис. 3.

Гранулометрический анализ полученного в результате синтеза порошка кремния показал, что 90 % частиц имеют размер меньший, чем 600 нм. Однако из-за широкого распределения частиц по размеру, т. е. низкой селективности данного метода, в образце присутствуют частицы размером до 1 мкм. Распределение размеров частиц по объёму образца представлено на рис. 4.

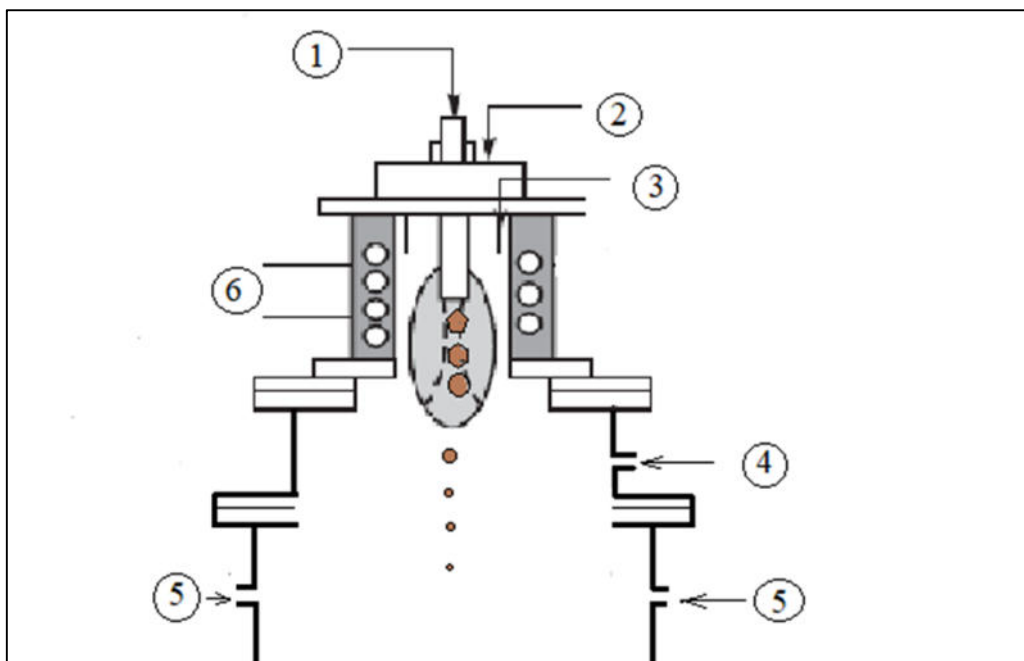


Рис. 3. Схематичное изображения процесса получения нанопорошка кремния: 1 – исходный порошок кремния + несущий газ, 2 – центральный газ, 3 – защитный + опциональный газы, 4 – закалочный газ#1, 5 – закалочный газ#2

Fig. 3. Schematic representation of silicon nanopowder production process: 1 – initial silicon powder + carrier gas, 2 – central gas, 3 – sheath + optional gases, 4 – quench gas#1, 5 – quench gas#2

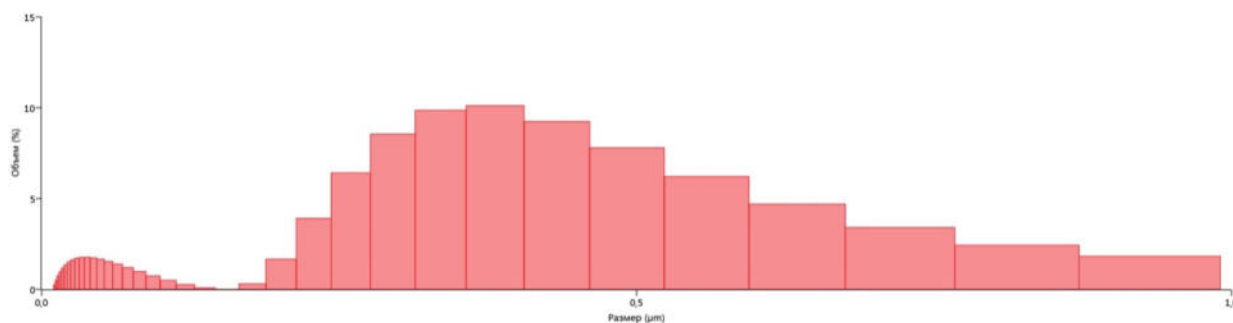


Рис. 4. Распределение размеров частиц полученного порошка по объему

Fig. 4. particle size distribution of the resulting powder by volume

В результате проведения рентгеноструктурного анализа была получена дифрактограмма полученного образца, представленная на рис. 5. Результаты анализа показали наличие только кубической решетки кремния типа алмаз при отсутствии примесей. Параметр решетки a составил $5,4337 \text{ \AA}$, а объем элементарной ячейки $160,4359 \text{ \AA}^3$. Параметры решетки образца, полученного в результате сфероидизации не отличаются от исходного порошка.

Исследование полученного образца, проведенного на сканирующем электронном микроскопе, показало, что в процессе синтеза все частицы приобрели сферическую форму. Из-за низкой электрической проводимости кремния, для более качественного анализа перед исследованием на полученный образец было нанесено покрытие из золота. Полученные изображения представлены на рис. 6.

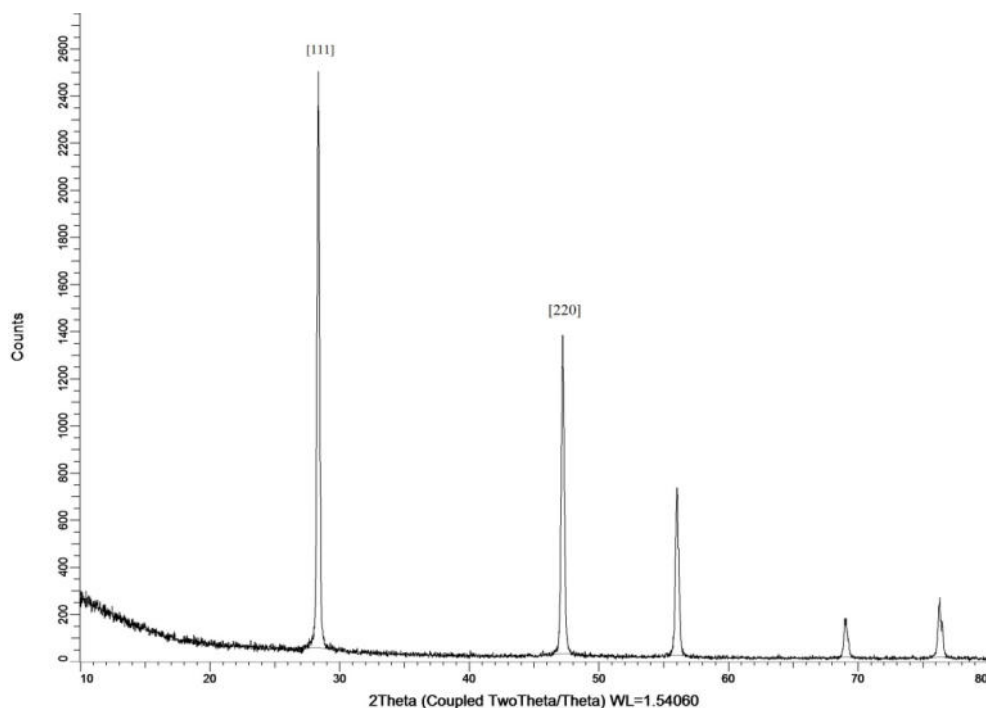


Рис. 5. Дифрактограмма полученного образца порошка кремния
 Fig. 5. XRD pattern of the obtained sample of silicon powder

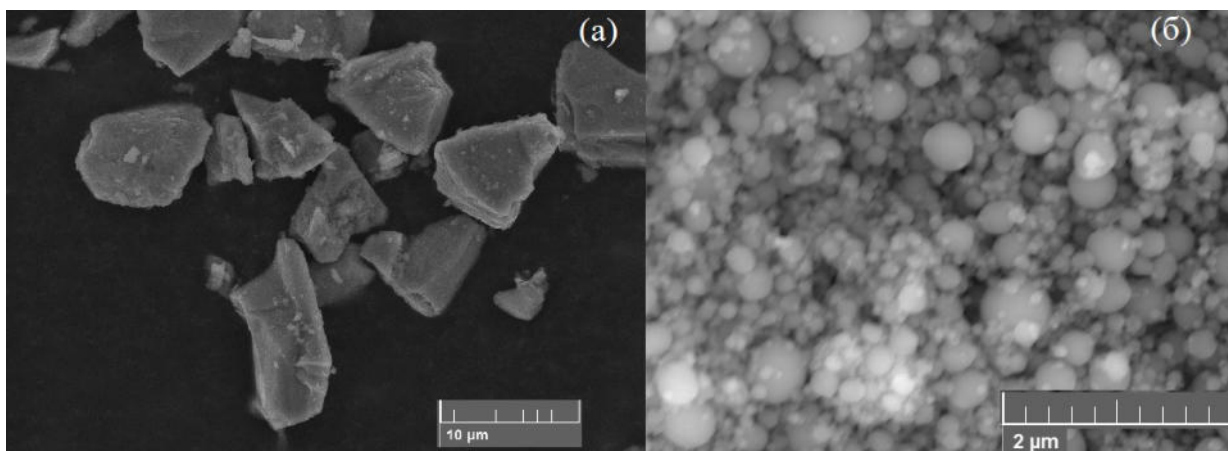


Рис. 6. Изображения порошка кремния, полученные с использованием сканирующего электронного микроскопа: а – до сфероидизации, б – после

Fig. 6. Morphology of silicon powder, obtained using scanning electron microscope:
 а – before spheroidization; б – after spheroidization

Анализ микрофотографий, полученных на сканирующем электронном микроскопе, показал, что средний размер частиц составил порядка 200–300 нм. Полученные результаты хорошо согласуются с данными полученными с использованием лазерного дифрактометра. Частицы имеют сферическую форму, гладкую поверхность, но

на поверхности некоторых крупных частиц имеются более мелкие, которые образовались в результате быстрого охлаждения в реакторе.

В результате исследования образца на анализаторе площади поверхности по методу Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ) было получено значение 38,70 м²/г.

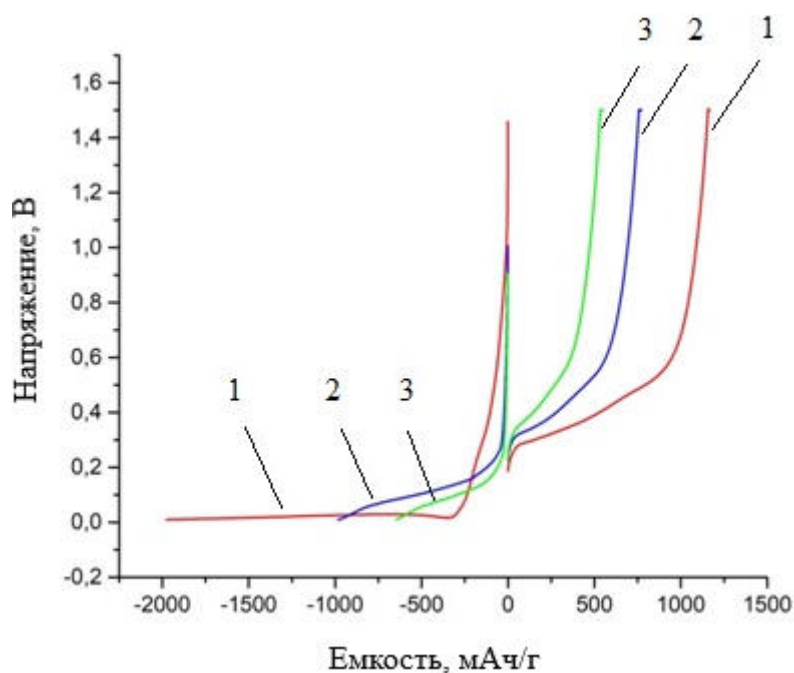


Рис. 7. Профили гальваностатического заряда/разряда были исследованы в диапазоне напряжений 0,01–1,5 В с плотностью тока 1 А/г

Fig. 7. Profiles of galvanostatic charge/discharge were investigated in the voltage range 0,01–1,5 V with a current density of 1 A/g

Электрохимические характеристики исследуемого электрода, на основе полученного порошка кремния.

Характеристики интеркаляции/деинтеркаляции лития в структуру кремния были исследованы при помощи циклической вольтамперометрии в диапазоне напряжений 0,01–1,5 В относительно Li/Li^+ . Скорость сканирования составляла 0,1 мВ/сек.

Профили гальваностатического заряда/разряда были исследованы в диапазоне напряжений 0,01–1,5 В с плотностью тока 1 А/г (рис. 7). Первые зарядные и разрядные ёмкости составили 2056 мАч/г и 1977 мАч/г, соответственно. Потеря ёмкости на первом цикле может быть обусловлена образованием интерфазы на границе твёрдое-электролит и образованием аморфного Li_xSi . Во время гальваностатического циклирования электрод демонстрировал плато литирования в диапазоне

0–0,15 В, а плато делитирования находилось в диапазоне 0,25–0,5 В относительно Li/Li^+ . Ёмкость испытываемого образца стремительно снижалась и после 15 циклов составляла 75 мАч/г и 67 мАч/г во время заряда и разряда соответственно. Кулоновская эффективность также снижалась с каждым последующим циклом. Это связано с тем, что в порошке, который использовался в качестве активного материала, находилось слишком много частиц, размер которых составлял более 150 нм, что стало причиной увеличения объема частиц кремния и, соответственно, причиной деградации исследуемого макета.

Для изучения процесса интеркаляции/деинтеркаляции лития в кремниевый анод был использован метод циклической вольтамперометрии (ЦВА) со скоростью развертки 0,1 мВ/с в диапазоне потенциалов от 0,01 до 1,5 В против Li/Li^+ (рис. 8).

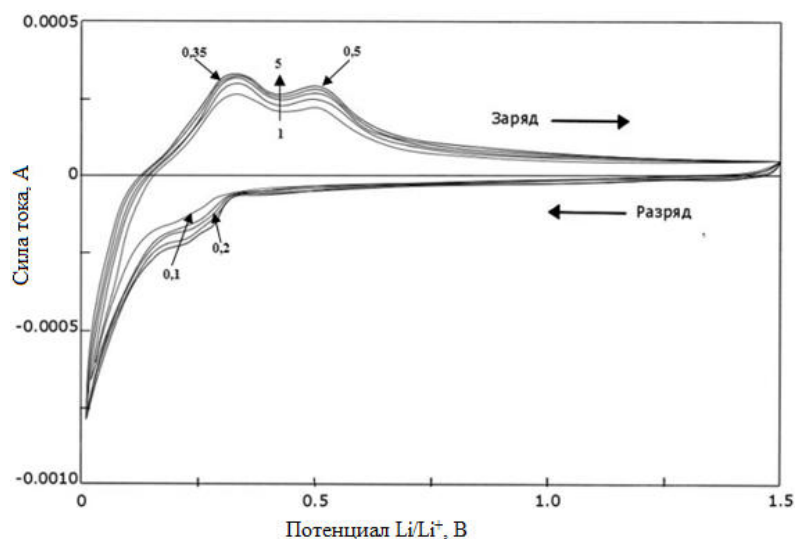
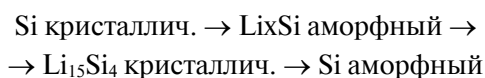


Рис. 8. Профили циклической вольтамперометрии в процессе интеркаляции/деинтеркаляции лития в кремниевый анод

Fig. 8. Profiles of cyclic voltammetry during intercalation/deintercalation of lithium into silicon anode

Присутствие на первом цикле уширенного катодного пика в области 0,1 В соответствует взаимодействию кремния с литием и образованию кристаллической фазы $\text{Li}_{15}\text{Si}_4$ [17]. На втором цикле выделяется еще один катодный пик на 0,2 В, свидетельствующий о том, что процессу образования стабильной кристаллической фазы, предшествует появление аморфных Li-Si сплавов различного состава, с общей формулой Li_xSi [7, 18]. На всех циклах ЦВА наблюдаются два анодных пика на 0,35 В и 0,5 В, соответствующие процессу делиитирования $\text{Li}_{15}\text{Si}_4$ с образованием аморфного кремния. Все наблюдаемые окислительно-восстановительные пики описаны следующими реакциями преобразования:



Стоит отметить, что при дальнейшем циклировании катодные и анодные пики постепенно усиливаются и сближаются. Этот эффект можно объяснить активацией кремния и стабилизацией кинетики в процессе зарядки и разрядки.

Исследование электрода после процесса циклирования. После проведенного эксперимента

макет, содержащий кремниевый электрод, был разобран для получения изображений анодного материала, деградировавшего во время проведения циклических испытаний. На рис. 10 представлены изображения, полученные на сканирующем электронном микроскопе до (10(a)) и после циклирования (10(б)).

После использования энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии было получено распределение химических элементов по поверхности (рис. 11). Как видно из рисунка, на некоторых участках поверхности отсутствуют углеродистые фазы или их площадь незначительно мала по сравнению с кремниевой фазой. Это также указывает на начало формирования слоя SEI на фазе кремния при разрушении анодного материала. Кроме того, были обнаружены и другие элементы, такие как фосфор, фтор, азот, которые появились в процессе циклирования и образования SEI. На основании изображений, полученных методом сканирующей электронной и энергодисперсионной рентгеновской микроскопии, можно сделать вывод, что структура анодного материала сильно деградирует после процесса циклирования.

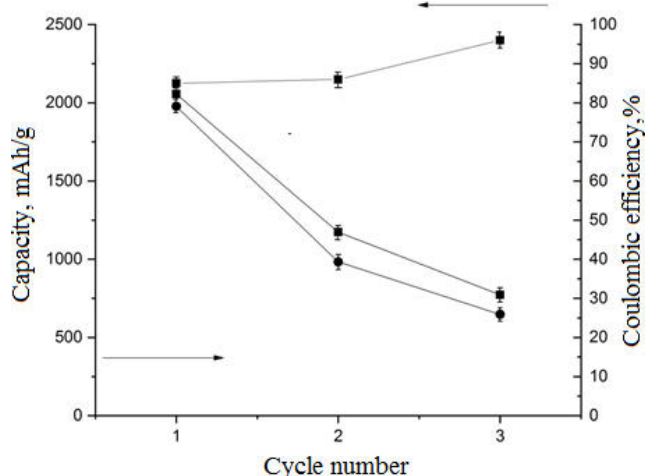


Рис. 9. Зависимость разрядной (нижняя) и зарядной (средняя) ёмкости исследуемого электрода, а также его кулоновская эффективность (верхняя) относительно цикла

Fig. 9. Dependence of the discharge (lower) and charge (middle) capacitance of the electrode, as well as its Coulomb efficiency (upper) relative to the cycle

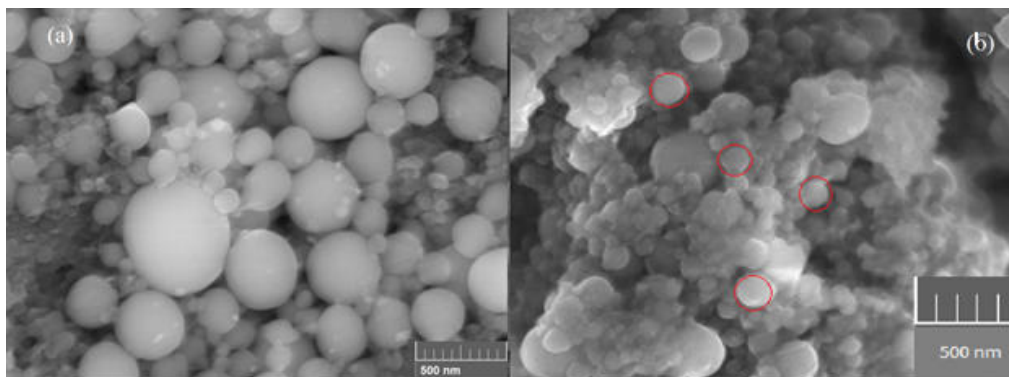


Рис. 10. Изображения, полученные на сканирующем электронном микроскопе до (а) и после (б) циклирования

Fig. 10. Images obtained by scanning electron microscope before (a) and after (b) cycling

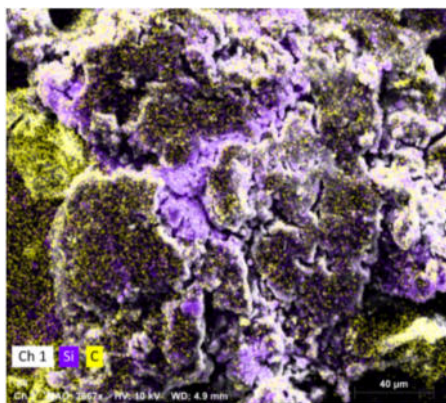


Рис. 11. Изображение исследуемого рабочего электрода с использованием РФА

Fig. 11. Image of the working electrode with the use of energy dispersive X-ray spectroscopy

Заклучение

1. Наноразмерный порошок кремния получали путем испарения и конденсации в потоке индуктивно связанной плазмы с использованием полупромышленного оборудования Текна с установленным реактором для производства нанопорошков.

2. Средний размер частиц синтезированного порошка составил 200 нм, порошок имеет сферическую форму, удельная поверхность (метод БЭТ) составила 38,7 м²/г, что не менее чем в 10 раз превышает удельную поверхность исходного кремния.

3. Исследования фазового состава показали, что полученный порошок имеет кубиче-

скую решетку алмазного типа (Fd3m). Параметр решетки a составлял $5,4337 \text{ \AA}$, объем единичной ячейки – $160,4359 \text{ \AA}^3$. По сравнению с оригинальным порошком различия были не большими, структура не является дефектной.

4. Зарядная и разрядная емкости составили 2056 мАч/г и 1977 мАч/г соответственно,

в результате циклирования до $1,5 \text{ В}$ происходит деградация анодного материала, что подтверждается исследованиями, проведенными до и после электрохимических испытаний. Установлено, что частицы размером более 150 Нм разрушаются при циклировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Dong J., Zhang T., Zhang D., Zhang W., Zhang H., Liu R., Yao M., Liu B. Remarkable cycle-activated capacity increasing in onion-like carbon nanospheres as lithium battery anode material // *Nanotechnology*. 2017. 28(3). P. 035704. DOI: 10.1088/1361-6528/28/3/035704.
- [2] Li T., Wei C., Wu Y.-M., Han F.-D., Qi Y.-X., Zhu H.-L., Lun N., Bai Y.-J. Simple Preparation of Carbon Nanofibers with Graphene Layers Perpendicular to the Length Direction and the Excellent Li-Ion Storage Performance // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2015. 7(9). P. 5107–5115. DOI: 10.1021/am508862e.
- [3] Sun Z., Song X., Zhang P., Gao L. Template-assisted synthesis of multi-shelled carbon hollow spheres with an ultralarge pore volume as anode materials in Li-ion batteries // *RSC Advances*. 2015. 5(5). P. 3657–3664. DOI: 10.1039/C4RA10591E
- [4] Nikolaev V.P., Morachevskii A.G., Demidov A.I., Bairachnyi E.V. *Journal of applied chemistry*. 1980. Vol. 53(9). P. 2088–2090.
- [5] Zhao Y. Structure and Electrochemical Properties of Hierarchically Porous Silicon Film Prepared with the Combination of Magnetron Sputtering Deposition and Metal-Assisted Chemical Etching // *International Journal of Electrochemical Science*. 2017. P. 8591–8598. DOI: 10.20964/2017.09.16.
- [6] Nazarov D.V., Maximov M.Y., Novikov P.A., Popovich A.A., Silin A.O., Smirnov V.M., Bobrysheva N.P., Osmolovskaya O.M., Osmolovsky M.G., Rumyantsev A.M. Atomic layer deposition of tin oxide using tetraethyltin to produce high-capacity Li-ion batteries. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. 2017. 35(1). Pp. 01B137. DOI: 10.1116/1.4972554.
- [7] Zhao Y., Liu Z., Zhang Y., Mentbayeva A., Wang X., Maximov M.Y., Liu B., Bakenov Z., Yin F. Facile Synthesis of SiO₂@C Nanoparticles Anchored on MWNT as High-Performance Anode Materials for Li-ion Batteries // *Nanoscale Research Letters*. 2017. 12(1). P. 459. DOI: 10.1186/s11671-017-2226-2.
- [8] Popovich A.A., Maximov M.Y., Novikov P.A., Silin A.O., Nazarov D.V., Rumyantsev A.M. Cyclic stability of the anode material based on tin(IV) oxide for thin-film current sources // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2016. 89(4). P. 679–681. DOI: 10.1134/S1070427216040236
- [9] Inaba M., Haruta M., Saito M., Doi T. Silicon Nano-flake Powder as an Anode for The Next Generation Lithium-ion Batteries: Current Status and Challenges // *Electrochemistry*. 2017. 85(10). P. 623–629. DOI: 10.5796/electrochemistry.85.623.
- [10] Lee B., Liu T., Kim S.K., Chang H., Eom K., Xie L., Chen S., Jang H.D., Lee S.W. Submicron silicon encapsulated with graphene and carbon as a scalable anode for lithium-ion batteries // *Carbon*. 2017. 119. P. 438–445. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.04.065.
- [11] Stenina I.A., Kulova T.L., Skundin A.M. A.B.Y. Carbon composites as anode materials for lithium-ion batteries // *Reviews on Advanced Material Science*. 2017. 49. P. 140–149.
- [12] Zhao L., Dvorak D.J., Obrovac M.N. Layered amorphous silicon as negative electrodes in lithium-ion batteries // *Journal of Power Sources*. 2016. 332. P. 290–298. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.09.124.
- [13] Xu R., Wu S., Du Y., Zhang Z. A facile route to dually protected Ge@GeO₂ composites as anode materials for lithium ion battery // *Chemical Engineering Journal*. 2016. 296. P. 349–355. DOI: 10.1016/j.cej.2016.03.126.
- [14] Zheng F., Xia G., Yang Y., Chen Q. MOF-derived ultrafine MnO nanocrystals embedded in a porous carbon matrix as high-performance anodes for lithium-ion batteries // *Nanoscale*. 2015. 7(21). P. 9637–9645. DOI: 10.1039/C5NR00528K
- [15] Wi S., Woo H., Lee S., Kang J., Kim J., An S., Kim C., Nam S., Kim C., Park B. Reduced graphene oxide/carbon double-coated 3-D porous ZnO aggregates as high-performance Li-ion anode materials // *Nanoscale Research Letters*. 2015. 10(1). P. 204. DOI: 10.1186/s11671-015-0902-7.

- [16] **Ko M., Chae S., Jeong S., Oh P., Cho J.** Elastic a-Silicon Nanoparticle Backboned Graphene Hybrid as a Self-Compacting Anode for High-Rate Lithium Ion Batteries // *ACS Nano*. 2014. 8(8). P. 8591–8599. DOI: 10.1021/nn503294z.
- [17] **Magasinski A., Dixon P., Hertzberg B., Kvit A., Ayala J., Yushin G.** High-performance lithium-ion anodes using a hierarchical bottom-up approach // *Nature Materials*. 2010. 9(4). P. 353–358. DOI: 10.1038/nmat2725.
- [18] **Kasavajjula U., Wang C., Appleby A.J.** Nano- and bulk-silicon-based insertion anodes for lithium-ion secondary cells // *Journal of Power Sources*. 2007. 163(2). P. 1003–1039. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.09.084.
- [19] **Popovich A.A., Razumov N.G., Grigoriev A.V., Samokhin A.V., Sufiiarov V.S., Goncharov I.S., Fadeev A.A., Sinaiskii M.A.** Fabrication of the Nb–16Si Alloy Powder for Additive Technologies by Mechanical Alloying and Spheroidization in Electric-Arc Discharge Thermal Plasma // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2018. 59(6). P. 671–676. DOI: 10.3103/S1067821218060160.
- [20] **Razumov N.G., Wang Q.S., Popovich A.A., Shamshurin A.I.** Fabrication of spherical high-nitrogen stainless steel powder alloys by mechanical alloying and thermal plasma spheroidization, 2018. P. 020001.
- [21] **Razumov N.G., Popovich A.A., Wang Q.** Thermal Plasma Spheroidization of High-Nitrogen Stainless Steel Powder Alloys Synthesized by Mechanical Alloying. *Metals and Materials International*. 2018. 24(2). P. 363–370. DOI: 10.1007/s12540-018-0040-8.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ОЗЕРСКОЙ Николай Евгеньевич – инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: nikolaiozerskoi@yandex.ru

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич – доктор технических наук директор ИММиТ Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: popovicha@mail.ru

ЕРМАКОВ Борис Сергеевич – доктор технических наук ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: ermakov55@bk.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 18.10.2019

REFERENCES

- [1] **J. Dong, T. Zhang, D. Zhang, W. Zhang, H. Zhang, R. Liu, M. Yao, B. Liu,** Remarkable cycle-activated capacity increasing in onion-like carbon nanospheres as lithium battery anode material, *Nanotechnology*, 28 (3) (2017) 035704. DOI: 10.1088/1361-6528/28/3/035704.
- [2] **T. Li, C. Wei, Y.-M. Wu, F.-D. Han, Y.-X. Qi, H.-L. Zhu, N. Lun, Y.-J. Bai,** Simple Preparation of Carbon Nanofibers with Graphene Layers Perpendicular to the Length Direction and the Excellent Li-Ion Storage Performance, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7 (9) (2015) 5107–5115. DOI: 10.1021/am508862e.
- [3] **Z. Sun, X. Song, P. Zhang, L. Gao,** Template-assisted synthesis of multi-shelled carbon hollow spheres with an ultralarge pore volume as anode materials in Li-ion batteries, *RSC Advances*. 5 (5) (2015) 3657–3664. DOI: 10.1039/C4RA10591E
- [4] **V.P. Nikolaev, A.G. Morachevskii, A.I. Demidov, E.V. Bairachnyi,** *Journal of applied chemistry*, 53 (9) (1980) 2088–2090.
- [5] **Y. Zhao,** Structure and Electrochemical Properties of Hierarchically Porous Silicon Film Prepared with the Combination of Magnetron Sputtering Deposition and Metal-Assisted Chemical Etching, *International Journal of Electrochemical Science*, (2017) 8591–8598. DOI: 10.20964/2017.09.16.
- [6] **D.V. Nazarov, M.Y. Maximov, P.A. Novikov, A.A. Popovich, A.O. Silin, V.M. Smirnov, N.P. Bobrysheva, O.M. Osmolovskaya, M.G. Osmolovsky, A.M. Rumyantsev,** Atomic layer deposition of tin oxide using tetraethyltin to produce high-capacity Li-ion batteries. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 35 (1) (2017) 01B137. DOI: 10.1116/1.4972554.
- [7] **Y. Zhao, Z. Liu, Y. Zhang, A. Mentbayeva, X. Wang, M.Y. Maximov, B. Liu, Z. Bakenov, F. Yin,**

Facile Synthesis of SiO₂@C Nanoparticles Anchored on MWNT as High-Performance Anode Materials for Li-ion Batteries, *Nanoscale Research Letters*, 12 (1) (2017) 459. DOI: 10.1186/s11671-017-2226-2.

[8] **A.A. Popovich, M.Y. Maximov, P.A. Novikov, A.O. Silin, D.V. Nazarov, A.M. Rumyantsev**, Cyclic stability of the anode material based on tin(IV) oxide for thin-film current sources, *Russian Journal of Applied Chemistry*, 89 (4) (2016) 679–681. DOI: 10.1134/S1070427216040236

[9] **M. Inaba, M. Haruta, M. Saito, T. Doi**, Silicon Nano-flake Powder as an Anode for The Next Generation Lithium-ion Batteries: Current Status and Challenges, *Electrochemistry*, 85 (10) (2017) 623–629. DOI: 10.5796/electrochemistry.85.623.

[10] **B. Lee, T. Liu, S.K. Kim, H. Chang, K. Eom, L. Xie, S. Chen, H.D. Jang, S.W. Lee**, Submicron silicon encapsulated with graphene and carbon as a scalable anode for lithium-ion batteries, *Carbon*, 119 (2017) 438–445. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.04.065.

[11] **I.A. Stenina, T.L. Kulova, A.M. Skundin, A.B.Y.** Carbon composites as anode materials for lithium-ion batteries, *Reviews on Advanced Material Science*, 49 (2017) 140–149.

[12] **L. Zhao, D.J. Dvorak, M.N. Obrovac**, Layered amorphous silicon as negative electrodes in lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources*, 332 (2016) 290–298. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.09.124.

[13] **R. Xu, S. Wu, Y. Du, Z. Zhang**, A facile route to dually protected Ge@GeO₂ composites as anode materials for lithium ion battery, *Chemical Engineering Journal*, 296 (2016) 349–355. DOI: 10.1016/j.cej.2016.03.126.

[14] **F. Zheng, G. Xia, Y. Yang, Q. Chen**, MOF-derived ultrafine MnO nanocrystals embedded in a porous carbon matrix as high-performance anodes for lithium-ion batteries, *Nanoscale*, 7 (21) (2015) 9637–9645. DOI: 10.1039/C5NR00528K

[15] **S. Wi, H. Woo, S. Lee, J. Kang, J. Kim, S. An, C. Kim, S. Nam, C. Kim, B. Park**, Reduced graphene oxide/carbon double-coated 3-D porous ZnO aggregates as high-performance Li-ion anode materials, *Nanoscale Research Letters*, 10 (1) (2015) 204. DOI: 10.1186/s11671-015-0902-7.

[16] **M. Ko, S. Chae, S. Jeong, P. Oh, J. Cho**, Elastic a-Silicon Nanoparticle Backboned Graphene Hybrid as a Self-Compacting Anode for High-Rate Lithium Ion Batteries, *ACS Nano*, 8 (8) (2014) 8591–8599. DOI: 10.1021/nn503294z.

[17] **A. Magasinski, P. Dixon, B. Hertzberg, A. Kvit, J. Ayala, G. Yushin**, High-performance lithium-ion anodes using a hierarchical bottom-up approach, *Nature Materials*, 9 (4) (2010) 353–358. DOI: 10.1038/nmat2725.

[18] **U. Kasavajjula, C. Wang, A.J. Appleby**, Nano- and bulk-silicon-based insertion anodes for lithium-ion secondary cells, *Journal of Power Sources*, 163 (2) (2007) 1003–1039. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.09.084.

[19] **A.A. Popovich, N.G. Razumov, A.V. Grigoriev, A.V. Samokhin, V.S. Sufiiarov, I.S. Goncharov, A.A. Fadeev, M.A. Sinaiskii**, Fabrication of the Nb–16Si Alloy Powder for Additive Technologies by Mechanical Alloying and Spheroidization in Electric-Arc Discharge Thermal Plasma, *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 59 (6) (2018) 671–676. DOI: 10.3103/S1067821218060160.

[20] **N.G. Razumov, Q.S. Wang, A.A. Popovich, A.I. Shamshurin**, Fabrication of spherical high-nitrogen stainless steel powder alloys by mechanical alloying and thermal plasma spheroidization, (2018) 020001.

[21] **N.G. Razumov, A.A. Popovich, Q. Wang**, Thermal Plasma Spheroidization of High-Nitrogen Stainless Steel Powder Alloys Synthesized by Mechanical Alloying. *Metals and Materials International*, 24 (2) (2018) 363–370. DOI: 10.1007/s12540-018-0040-8.

THE AUTHORS

OZERSKOI Nikolai E. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university
E-mail: nikolaiozerskoi@yandex.ru

POPOVICH Anatolii A. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university.
E-mail: popovicha@mail.ru

ERMAKOV Boris S. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university
E-mail: ermakov55@bk.ru

Received: 18.10.2019



DOI: 10.18721/JEST.26105
УДК 621.762:669.71:004.94

А.А. Григорьев¹, А.И. Дмитрюк²

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

2 – Концерн «Росэнергоатом», Ленинградская АЭС, г. Сосновый Бор, Россия

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСТРУЗИИ БРИКЕТОВ ПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ

Разработан алгоритм расчета усилия экструзии на протяжении процесса прессования брикетов порошка алюминия. Алгоритм позволяет предварительно определить энергосиловые параметры процесса, особенно на начальном этапе: усилие, мощность, скорость. Исходными параметрами для расчетов являются характеристики материала: плотность брикета (насыпная плотность), размеры брикета; степень деформации (вытяжки), сопротивление деформации в зависимости от скорости деформации и температуры; а также геометрические и скоростные параметры процесса: вид прессования (прямое или обратное), размеры прессовой оснастки (длина, диаметр), размеры матрицы (вплоть до размеров калибрующего пояса), коэффициент трения (учет смазки для прессования), скорость движения пресс-блока. Показано, что наличие нестационарных участков прессования и зависимость сопротивления от скорости деформации приводят к нестабильности процесса, а соответственно, к неравномерности свойств получаемых прутков. Однако представленный алгоритм позволяет рассчитать и снизить этот отрицательный эффект при применении систем автоматизации (стабилизирующих систем скорость-усилие) с соответствующей регулировкой.

Ключевые слова: порошковая металлургия, экструзия, алюминий, технология, моделирование.

Ссылка при цитировании:

Григорьев А.А., Дмитрюк А.И. Расчет технологических параметров экструзии брикетов порошков алюминия // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2020. Т. 26, № 1. С. 53–61. DOI: 10.18721/JEST.26105

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

A.A. Grigoriev¹, A.I. Dmitryuk²

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

2 – Rosenergoatom, Leningradskaya AES, *Sosnoviy Bor*, Russia

CALCULATION OF TECHNOLOGY PARAMETERS OF ALUMINUM POWDER EXTRUSION

An algorithm has been developed for calculating the extrusion force during the process of pressing briquettes of aluminum powder. The algorithm allows you to pre-determine the energy-power parameters of the process, especially at the initial stage: effort, power, speed. The initial parameters for the calculations are material characteristics: briquette density (bulk density), briquette dimensions; degree of deformation (drawing), deformation resistance depending on the strain rate and temperature; as well as geometric and speed parameters of the process: the type of pressing (direct or reverse), the dimensions of the press tool (length, diameter), the dimensions of the matrix (up to the size of the calibrating girdle), the friction coefficient (taking into account the lubricant for pressing), the speed of the press block. It is shown that the presence of unsteady pressing sections and the dependence of the resistance on the strain rate lead to

process instability and, consequently, to the uneven properties of the resulting bars. However, the presented algorithm allows us to calculate and reduce this negative effect when using automation systems (stabilizing speed-force systems) with appropriate adjustment.

Keywords: powder metallurgy, extrusion, aluminum, technology, simulation.

Citation:

A.A. Grigoriev, A.I. Dmitryuk, Calculation of technology parameters of aluminum powder extrusion, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 26 (01) (2020) 53–61 DOI: 10.18721/JEST.26105

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Развитие машиностроения в настоящее время в значительной степени происходит за счет использования новейших материалов, полученных путем применения современных технологий, в том числе порошковой металлургии и нанотехнологий [1–5]. В таких материалах происходят структурные и физико-химические изменения на уровне, сопоставимом с размерами отдельных молекул, что обеспечивает высокие технологические, эксплуатационные, а также специальные свойства [6–9]. В технологическую схему порошковой металлургии часто входят операции интенсивной деформации [10–12]: прессования, выдавливания, прокатки, штамповки и т. д. При этом происходит уплотнение [13–14] и компактирование материала при высоких температурах и степенях деформации [15, 16]. Для проведения экспериментов и выпуска ограниченных партий деталей машин из наноматериалов может быть применено уже имеющееся оборудование для деформирования литых, классических материалов [17]. Однако, при внедрении в серийное производство, относительно высокие прочностные свойства деформируемых материалов вызывают ряд проблем, связанных с необходимостью применения специализированного оборудования и оснастки, позволяющих обрабатывать материалы с наибольшей экономической эффективностью [18]. Без этого, получается дорогостоящий продукт, не выдерживающий конкуренции в рыночных условиях.

Целью настоящего исследования является построение алгоритма расчета усилия от хода пуансона при прессовании и сравнение теоретически и практически полученных данных. Основная задача – исследование первого пика как результата среза в начале процесса прессования.

Методика исследования

Исследование процесса прессования при высоких температурах показало, что типичная кривая зависимости усилия от хода пуансона имеет два характерных пика (рис. 1).

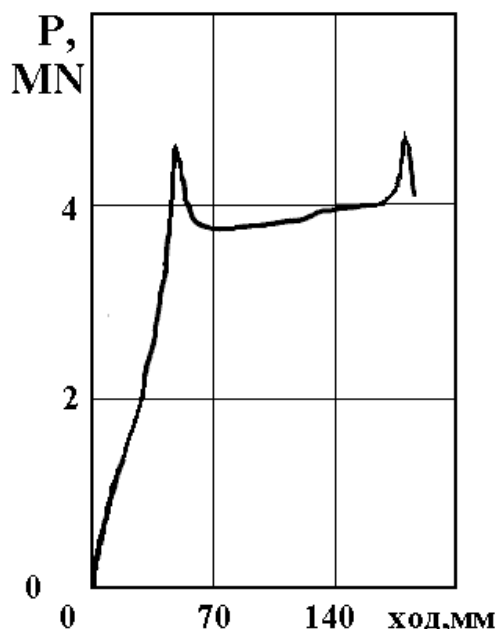


Рис. 1. Общий вид кривой зависимости усилия прессования от хода пресса

Fig. 1. General view of the curve of the dependence of the pressing force on the stroke of the press

Исследование и предварительное моделирование величин этих пиков является весьма актуальным, так как соответствующие пикам наибольшие усилия оказывают влияние на выбор деформирующего оборудования (мощности пресса, которая является основным параметром деформирующих прессов), также на величину пресс-остатка, который определяется величиной конечного давления. В случае прессования алюминиевых материалов на практике применяются плоские матрицы (фильеры), что объясняется большой склонностью алюминия к налипанию, и в этом случае предварительный расчет в зависимости от возможностей (усилия пресса) позволяет уменьшить пресс-остаток и соответственно повысить коэффициент использования материала.

Наличие первого пика на кривой зависимости усилия от хода пуансона объясняется рядом причин:

1. переход от контактного трения покоя к трению скольжения, который всегда связан с понижением напряжения трения;
2. формирование «мертвых» зон выдавливаемого материала и срез его по границам этих зон, требующий дополнительных затрат энергии прессования;
3. при прессовании со смазкой – более равномерное по сравнению с начальной стадией распределение смазки по всей поверхности скольжения и вовлечение смазки на поверхность раздела упругой и пластической зоны;
4. холодное упрочнение прессуемого материала с дальнейшим тепловым эффектом деформации, снижающим сопротивление деформации;
5. различные температуры по стенке матрицы;
6. изменение схемы деформации: в начале – схема осадки цилиндрической заготовки, а затем – выдавливание; при этом меняется степень и скорость деформации.

Второй пик связан с изменением схемы деформации и соответствует мертвой зоне.

При использовании фильеров образуются застойные зоны материала в углах между матрицей и контейнером, и при достижении пуансоном застойной зоны она сокращается, что приводит к уменьшению угла скольжения выдавливаемого материала по материалу мертвой зоны (рис. 2).

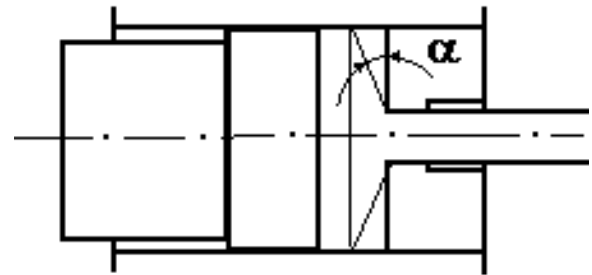


Рис. 2. Уменьшение угла скольжения выдавливаемого материала по материалу «мертвой зоны» при достижении ее пресс-шайбой

Fig. 2. Reducing the sliding angle of the extruded material on the material of the «dead zone» when it reaches the press washer

В настоящее время имеется много работ, посвященных проблеме моделирования процессов прессования (выдавливания) материалов как в холодном, так и в горячем состояниях [17]. Однако, как правило, исследователи используют сложный, громоздкий математический аппарат, исследующий схемы напряженного состояния и не позволяющий в ряде случаев точно учитывать физико-механические характеристики материала. В основном, зависимость сопротивления деформации от таких важных, измеряемых при горячем прессовании технологических параметров, как температура, степень и скорость деформации. Результаты таких теоретических исследований сложно сравнить с результатами экспериментов. По этой причине возникает необходимость использования некоторых эмпирических коэффициентов. Кроме того, сложные модели трудно использовать для прогнозирования параметров прессования в конкретных промышленных условиях.

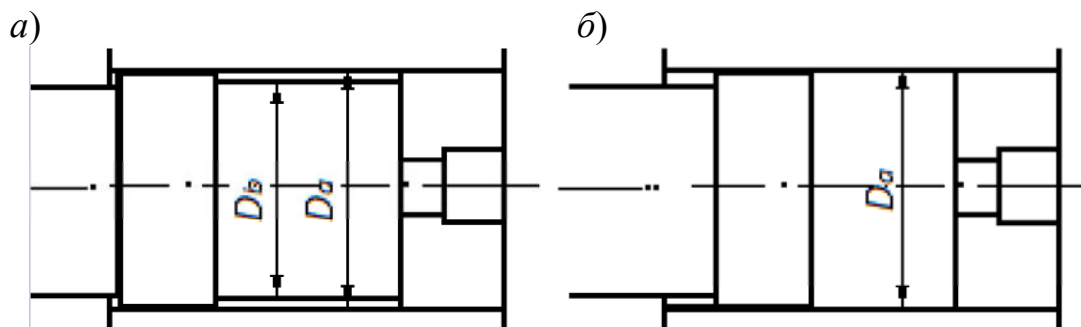


Рис. 3. Первый этап прессования: распрессовка и осадка заготовки до начала истечения материала через матрицу: диаметр заготовки меньше диаметра пресс-блока (а), объем блока заполнен материалом заготовки (б). Пористость заготовки близка к пористости компактного материал

Fig. 3. The first stage of pressing: pressing and settling of the workpiece before the material flows through the matrix: the diameter of the workpiece is less than the diameter of the press block (a), the volume of the block is filled with the workpiece material (b). The porosity of the workpiece is close to the porosity of a compact material

Настоящая работа посвящена созданию математической модели, описывающей типичную кривую прессования (выдавливания) пористой заготовки и основанной на аппроксимации участков подобной экспериментальной кривой классическими зависимостями, описывающими процессы, прохождения которых соответствует участкам этой кривой.

Для рассмотрения и описания процессов при выдавливании, учитывая вид типичной зависимости «усилие – ход пуансона», ход пуансона условно разделен на три участка:

1. Осадка со стартовым пиком.
2. Установившейся этап (стабильное прессование).
3. Конечный этап (нестабильное прессование).

Экспериментальные результаты

1 участок. Осадка со стартовым пиком

На этом участке начинается осадка заготовки. Диаметр заготовки изменяется от своей величины (до прессования) до диаметра матрицы (рис. 3).

В случае использования пористой заготовки можно предположить, что на первом этапе происходит изменение пористости от

исходной до практически нулевой с дальнейшей деформацией материала как компактного.

Усилие на штампе P_{kd} рассчитывается по формуле:

$$P_{kd} = \frac{\sigma_s \cdot p \cdot (D_b)^2}{4}, \quad (1)$$

где σ_s – сопротивление деформации, D_b – диаметр заготовки.

Сопротивление деформации σ_s является функцией температуры, вытяжки и скорости деформации. В данном случае значение этой величины взято на основе литературных данных [19]. При этом для использования в расчётах выбраны экспериментальные данные для простой схемы напряженного состояния-осадки.

Ход (T) 1 этапа (длина участка в мм) рассчитан в предположении о том, что он заканчивается при заполнении заготовкой всего объёма блока от пресс-штемпера до матрицы и пористость заготовки достигает значения пористости компактного материала:

$$\frac{L_b \cdot (D_b)^2 \cdot \theta}{4} = \frac{L \cdot (D_a)^2 \cdot \pi}{4}. \quad (2)$$

Откуда:

$$L = L_b \cdot \frac{(D_b)^2 \cdot \theta}{(D_a)^2 \cdot \pi}, \quad (3)$$

где L_b – длина заготовки, D_b – диаметр заготовки, D_a – внешний диаметр матрицы (равен внутреннему контейнера), L – длина заготовки при окончании 1-го этапа прессования, θ – относительная плотность заготовки до начала прессования.

Величина хода осадки:

$$T = L_b - L = L_b - L_b \cdot \frac{(D_b)^2 \cdot \theta}{(D_a)^2}. \quad (4)$$

Описание стартового усилия. Предполагается, что на резкое повышение усилия прессования (образование пика) оказывают влияние следующие составляющие:

усилие, расходуемое на деформирование объема материала (P_{kd});

усилие на трение по стенкам контейнера (P_{kr});

усилие на срез по границам зоны застоя (P_{ks}).

При этом предполагается, что срез происходит под углом 45° . Этот угол является для прохождения среза оптимальным, что подтверждается предварительными расчетами, которые были выполнены путём построения зависимости усилия от угла среза. Формируется зона застоя. После начального этапа происходит проникновение смазки со стенок контейнера в пространство между материалом и зоной застоя.

Расчет стартового усилия

$$P_{sd} = P_{kd} + P_{kr} + P_{ks}. \quad (5)$$

Здесь:

$$P_{kd} = \frac{\sigma_s \cdot \pi \cdot (D_a)^2}{4}, \quad (6)$$

$$P_{ks} = \frac{\sigma_s \cdot (\sqrt{3})}{2 \cdot F}, \quad (7)$$

где $\sigma_s \cdot (\sqrt{3}) / 2$ – напряжение среза; F – площадь поверхности среза по «мертвой зоне».

Поверхность среза представляет собой боковую поверхность усечённого прямого кругового конуса. Площадь этой поверхности равна:

$$F = \frac{\rho \cdot ((D_a)^2 - (D_m)^2)}{(4 \cdot \cos \alpha)}, \quad (8)$$

где α – угол мертвой зоны, D_m – внутренний диаметр матрицы (очка).

Величина напряжения среза τ_s на поверхности «мертвой» зоны равна:

$$\tau_s = \frac{\sigma_s \cdot (\sqrt{3})}{2 \cdot \sin \alpha}. \quad (9)$$

В итоге:

$$P_{ks} = \frac{\sigma_s \cdot \Psi_k \cdot \pi \cdot (\sqrt{3}) \cdot ((D_a)^2 - (D_m)^2)}{2 \cdot \cos \alpha \cdot 8 \cdot \sin \alpha}, \quad (10)$$

где P_{kr} – усилие трения о стенки контейнера рассчитывается как:

$$P_{kr} = \sigma_s \cdot \Psi_k \cdot F_a, \quad (11)$$

где Ψ_k – коэффициент трения, который в настоящей модели принят равным коэффициенту трения скольжения на протяжении всего процесса, за исключением пикового участка, где идет предполагаемый срез материала и $\Psi_k = 1$; F_a – площадь поверхности трения материала о стенки контейнера:

$$F_a = \pi \cdot D_a \cdot (T_1 - T_2), \quad (12)$$

где T_1 – координата хода пресс-штемпеля, соответствующая концу 1 этапа (осадка + допрессовка) прессования; T_2 – координата пресс-штемпеля, соответствующая началу этапа деформации «мертвой» зоны. Иначе, T_2 – длина «мертвого» угла, равная при его величине 45° :

$$T_2 = \frac{(D_a - D_m)}{2}. \quad (13)$$

2 участок. Установившийся процесс экструзии. Как было описано выше, на этом этапе происходит истечение материала через отвер-

ствие матрицы. При этом происходит снижение усилия прессования за счет уменьшения поверхности трения о стенки контейнера.

Усилие прессования рассчитывается, как и на стартовом этапе, но коэффициент трения равен не единице (так как считается, что предполагаемый срез материала закончился), а величине коэффициента трения при установившемся процессе скольжения. Данный этап рассчитывается и описывается на протяжении хода пуансона до координаты T_2 , при достижении которой начинается деформация материала «мертвой» зоны.

3. Конечный этап прессования. Формирование пресс-остатка

На этом этапе пуансон достигает начала зоны застоя и при этом принимается, что схема деформации будет происходить так, как показано на рис. 2. Это приводит к значительному возрастанию требуемого усилия прессования. Несмотря на некоторое уменьшение площади трения по поверхности зон застоя, происходит увеличение составляющей выдавливания P_{ks} из-за резкого увеличения угла скольжения.

Конечное усилие P_{ek} :

$$P_{ek} = P_{kd} + P_{ks}, \quad (14)$$

где P_{ks} рассчитывается, как и в формуле (10), но необходимо учитывать уменьшение угла «мертвой» зоны:

$$a = a \cdot \operatorname{tg}(a), \quad (15)$$

где $a = \frac{w}{0,5 \cdot (D_a - D_m)}$; w – координата хода пресс-штемпеля. Она изменяется от T_2 до T_{pr} – величины заданного пресс-остатка.

Программа для расчета усилия при процессе экструзии составлена с учетом всех вышеописанных предполагаемых зависимостей. Принцип пользования состоит в задании запрашиваемых параметров пресс-оснастки и прессования. Результатом расчета является

выводимый на экран график предполагаемой зависимости типа «усилие прессования – ход пуансона». Диаметр блока в программе не подлежит варьированию и принят равным 110 мм. Также не введено никаких ограничений по уровням вводимых параметров, что предполагает работу с программой пользователя, имеющего представление об описываемом процессе.

Сравнение экспериментальной и теоретической зависимостей усилия выдавливания от хода пуансона было проведено для опытной зависимости усилия прессования порошковых заготовок сплава $AlSi_{18}CuMgNi$ диаметром 107,6 мм и длиной 220 мм при следующих технологических параметрах: диаметр пресс-блока 110 мм, диаметр матрицы 30 мм, величина пресс-остатка 20 мм, температура прессования 420 °С, скорость прессования 2 см/сек. В результате, получена диаграмма прессования в осях «усилие пресса – ход пресс-штемпеля». Эти же параметры были введены в построенную математическую модель. Для выполнения программы требуется введение величины сопротивления деформации, зависящей от скорости и температуры прессования. Эта величина была выбрана на основании экспериментальных данных полученных в [20] и составляет для порошкового сплава $AlSi_{18}CuMgNi$ 240 МПа (для перечисленных выше параметров). Представляет сложность выбор коэффициента трения. Поскольку не существует четких зависимостей и рекомендаций для выбора этой величины с учетом всех параметров прессования, она была рассчитана по значениям усилия второго участка экспериментальной кривой прессования по принятой в модели зависимости, описывающей этот участок. Эта величина составляет 0,17 для выбранных условий прессования.

На рис. 4 представлены экспериментальная и смоделированная зависимости с учетом среза на начальной стадии прессования.

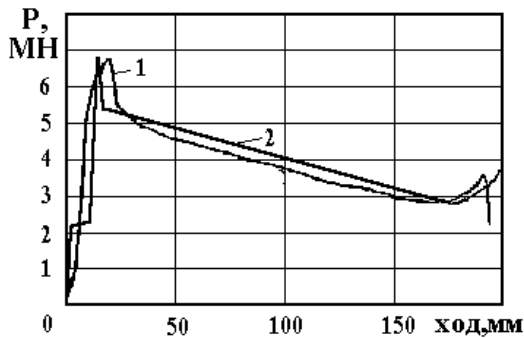


Рис. 4. Сравнение экспериментальной (1) и рассчитанной (2) по предлагаемой модели зависимостей усилия выдавливания при горячей экструзии

Fig. 4. Comparison of the experimental (1) and calculated (2) according to the proposed model of dependences of the extrusion force during hot extrusion

При наложении кривых зависимостей, полученных опытным путем и при помощи моделирования, выявлен близкий характер их поведения. Наибольший интерес представляет совпадение абсолютных значений величин усилия на начальном этапе прессования, что свидетельствует о правомерности предположения причины наличия стартового пика из-за образования «мертвой зоны».

Заключение

Разработан алгоритм расчета усилия экструзии на протяжении процесса прессования бри-

кетов порошка алюминия. Алгоритм позволяет предварительно определить энергосиловые параметры процесса, особенно на начальном этапе, — усилие, мощность, скорость.

Исходными параметрами для расчетов являются:

характеристики материала: плотность брикета (насыпная плотность), размеры брикета; степень деформации (вытяжки), сопротивление деформации в зависимости от скорости деформации и температуры;

геометрические и скоростные параметры процесса: вид прессования (прямое или обратное), размеры прессовой оснастки (длина, диаметр), размеры матрицы (вплоть до размеров калибрующего пояска), коэффициент трения (учет смазки для прессования), скорость движения пресс-блока.

Показано, что наличие нестационарных участков прессования и зависимость сопротивления от скорости деформации приводят к неустойчивости процесса, а соответственно, к неравномерности свойств получаемых прутков. Однако представленный алгоритм позволяет рассчитать и снизить этот отрицательный эффект при применении систем автоматизации (стабилизирующих систем скорости-усилие) с соответствующей регулировкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Рудской А.И., Волков К.Н., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Физические процессы и технологии получения металлических порошков из расплава. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 610 с.
- [2] Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю., Лукьянов А.А. Получение изделий из композиционных материалов методом электронно-лучевого синтеза и исследование их свойств // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 2. С. 35–41.
- [3] Доан Ван Фук, Цеменко В.Н., Ганин С.В. Моделирование процесса осадки порошкового материала в оболочке // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2015. 3 (226). С. 30–39. DOI: 10.5862/JEST.226.4
- [4] Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Новый подход к синтезу порошковых и композиционных материалов электронным лучом. Ч. 1. Технологические особенности процесса // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 1 (727). С. 30–35.
- [5] Кокорин В.Н., Рудской А.И., Филимонов В.И., Бульжев Е.М., Кондратьев С.Ю. Теория и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2012. 236 с.
- [6] Демьянов Г.В., Григорьев А.А., Шалашов Е.В. Экранирование от ионизирующего излучения модулями на основе реакторного графита, порошка обедненного урана и компактного алюминия // Неделя науки СПбПУ: матер. науч. конф. с междунар. участием, лучшие доклады. СПб., 2019. С. 113–116.
- [7] Кондратьев С.Ю., Пташник А.В., Анастасидади Г.П., Петров С.Н. Анализ превращений карбидных фаз в сплаве 25Cr35Ni методом количественной элек-

тронной микроскопии // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2015. № 7 (721). С. 36–43.

[8] **Цеменко В.Н.** Деформирование порошковых сред. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2001. 104 с.

[9] **Рудской А.И., Белов И.М., Гордеев С.К., Барзинский О.В., Кондратьев С.Ю.** Углеродные наноструктурные имплантаты для замещения костных дефектов и технология их изготовления // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2018. № 1 (751). С. 20–25.

[10] **Кокорин В.Н., Филимонов В.И., Григорьев А.А., Сизов Н.А., Кокорин А.В.** Теоретические исследования процесса интенсивного уплотнения гетерофазных механических смесей // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2014. № 11 (119). С. 3–7.

[11] Способ получения защитной оксидной пленки на металлической поверхности / **Кокорин В.Н., Кокорин А.В., Кокорин М.В., Григорьев А.А., Мертенс К.К.** // Патент на изобретение RU 2638869 11.10.2016.

[12] **Рудской А.И., Кокорин В.Н., Кондратьев С.Ю., Филимонов В.И., Кокорин А.В.** Прессование гетерофазных увлажненных железных порошков при использовании метода интенсивного уплотнения // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2013. № 5 (23). С. 13–20.

[13] **Рудской А.И., Григорьев А.А.** Уплотнение пористой упругопластической заготовки при обработке давлением // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 1984. № 9. С. 78–82.

[14] **Кондратьев С.Ю., Горьнин В.И., Попов В.О.** Оптимизация параметров поверхностно-упрочненного

слоя при лазерной закалке деталей // *Сварочное производство*. 2011. № 3. С. 11–15.

[15] **Григорьев А.А.** Разработка технологии получения заготовок электродов для машин контактной сварки на основе порошковой композиции Cu_2O_3 // *Металлообработка*. 2009. № 4 (52). С. 32–34.

[16] **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А., Копаев В.Н.** Особенности моделирования процесса послойного синтеза изделий электронным лучом // *Журнал технической физики*. 2015. Т. 85. № 11. С. 91–96.

[17] **Котов С.А., Музафарова С.-В.Р., Батурова Л.П., Береснева Ю.С.** Оценка методов формования порошков терморасширенного графита с различными исходными свойствами // *Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТТ-2019): тез. докл. Междунар. науч. конф.*, 2019. С. 57.

[18] **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Алгоритм и технологические процессы синтеза порошковых деталей электронным лучом в вакууме // *Технология машиностроения*. 2015. № 1. С. 11–16.

[19] **Ганин С.В., Замоздра М.Ю., Цеменко В.Н.** Определение реологических характеристик и моделирование процесса экструзии порошковых материалов // *Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТТ-2019): тез. докл. Междунар. науч. конф.*, 2019. С. 97.

[20] **Гоппиенко В.Г., Смагоринский М.Е., Григорьев А.А. [и др.]** Спеченные материалы из алюминиевых порошков / Под ред. Смагоринского М.Е. М.: Металлургия, 1993. 320 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГРИГОРЬЕВ Андрей Анатольевич – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

E-mail: zhurnal-grig.2020@yandex.ru

ДМИТРИЮК Артём Игорьевич – инженер Концерна «Росэнергоатом», Ленинградская АЭС

E-mail: kral27@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 23.03.2020

REFERENCES

[1] **A.I. Rudskoy, K.N. Volkov, S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov**, Fizicheskiye protsessy i tekhnologii polucheniya metallicheskih poroshkov iz rasplava. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2018.

[2] **Yu.A. Sokolov, S.Yu. Kondratyev, A.A. Lukyanov**, Polucheniye izdeliy iz kompozitsionnykh materialov metodom elektronno-luchevogo sinteza i issledovaniye

ikh svoystv, Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii, 2 (2015) 35–41.

[3] **Doan Van Fuk, V.N. Tsemenko, S.V. Ganin**, Modelirovaniye protsessa osadki poroshkovogo materiala v obolochke, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 3 (226) (2015) 30–39. DOI: 10.5862/JEST.226.4

- [4] **A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov**, Novyy podkhod k sintezu poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov elektronnykh luchom. Ch. 1. Tekhnologicheskiye osobennosti protsessa, Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov, 1 (727) (2016) 30–35.
- [5] **V.N. Kokorin, A.I. Rudskoy, V.I. Filimonov, Ye.M. Bulzhev, S.Yu. Kondratyev**, Teoriya i praktika protsessa pressovaniya geterofaznykh uvlazhnennykh mekhanicheskikh smesey na osnove zheleza. Ulyanovsk: Izd-vo UIGTU, 2012.
- [6] **G.V. Demyanov, A.A. Grigoryev, Ye.V. Shalashov**, Ekranirovaniye ot ioniziruyushchego izlucheniya modulyami na osnove reaktornogo grafita, poroshka obednennogo urana i kompaktnogo alyuminiya, Nedelya nauki SPbPU. Materialy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, luchshiy doklady. Sankt-Peterburg, (2019) 113–116.
- [7] **S.Yu. Kondratyev, A.V. Ptashnik, G.P. Anastasiadi, S.N. Petrov**, Analiz prevrashcheniy karbidnykh faz v splave 25Cr35Ni metodom kolichestvennoy elektronnoy mikroskopii, Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov, 7 (721) (2015) 36–43.
- [8] **V.N. Tsemenko**, Deformirovaniye poroshkovykh sred. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2001.
- [9] **A.I. Rudskoy, I.M. Belov, S.K. Gordeyev, O.V. Barzinskiy, S.Yu. Kondratyev**, Uglerodnyye nanostrukturnyye implantaty dlya zameshcheniya kostnykh defektov i tekhnologiya ikh izgotovleniya, Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov, 1 (751) (2018) 20–25.
- [10] **V.N. Kokorin, V.I. Filimonov, A.A. Grigoryev, N.A. Sizov, A.V. Kokorin**, Teoreticheskiye issledovaniya protsessa intensivnogo uplotneniya geterofaznykh mekhanicheskikh smesey, Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya, 11 (119) (2014) 3–7.
- [11] Sposob polucheniya zashchitnoy oksidnoy plenki na metallicheskoj poverkhnosti / Kokorin V.N., Kokorin A.V., Kokorin M.V., Grigoryev A.A., Mertens K.K., Patent na izobreteniyе RUS 2638869 11.10.2016.
- [12] **A.I. Rudskoy, V.N. Kokorin, S.Yu. Kondratyev, V.I. Filimonov, A.V. Kokorin**, Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh zheleznykh poroshkov pri ispolzovanii metoda intensivnogo uplotneniya, Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii, 5 (23) (2013) 13–20.
- [13] **A.I. Rudskoy, A.A. Grigoryev**, Uplotneniye poristoy uprugoplasticheskoy zagotovki pri obrabotke davleniyem, Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy, Chernaya metallurgiya, 9 (1984) 78–82.
- [14] **S.Yu. Kondratyev, V.I. Gorynin, V.O. Popov**, Optimizatsiya parametrov poverkhnostno-uprochnennogo sloya pri lazernoy zakalke detaley, Svarochnoye proizvodstvo, 3 (2011) 11–15.
- [15] **A.A. Grigoryev**, Razrabotka tekhnologii polucheniya zagotovok elektrodov dlya mashin kontaktnoy svarki na osnove poroshkovoy kompozitsii Cu₂O₃, Metalloobrabotka, 4 (52) (2009) 32–34.
- [16] **A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov, V.N. Kopayev**, Osobennosti modelirovaniya protsessa posloynogo sinteza izdeliy elektronnykh luchom, Zhurnal tekhnicheskoy fiziki, 85 (11) (2015) 91–96.
- [17] **S.A. Kotov, S.-V.R. Muzafarova, L.P. Baturova, Yu.S. Beresneva**, Otsenka metodov formovaniya poroshkov termorasshirennoy grafita s razlichnymi iskhodnymi svoystvami, V kn.: Sovremennyye materialy i peredovyye proizvodstvennyye tekhnologii (SMPPT–2019). Tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, (2019) 57.
- [18] **A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov**, Algoritm i tekhnologicheskiye protsessy sinteza poroshkovykh detaley elektronnykh luchom v vakuume, Tekhnologiya mashinostroyeniya, 1 (2015) 11–16.
- [19] **S.V. Ganin, M.Yu. Zamozdra, V.N. Tsemenko**, Opredeleniye reologicheskikh kharakteristik i modelirovaniye protsessa ekstruzii poroshkovykh materialov, Sovremennyye materialy i peredovyye proizvodstvennyye tekhnologii (SMPPT–2019). Tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, (2019) 97.
- [20] **V.G. Gopiyenko, M.Ye. Smagorinskiy, A.A. Grigoryev idr.**, Spechennyye materialy iz alyuminiyevykh poroshkov / Pod red. Smagorinskogo M.Ye. M.: Metallurgiya, 1993.

THE AUTHORS

GRIGORIEV Andrei A. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: zhurnal-grig.2020@yandex.ru

DMITRYUK Artem I. – *Rosenergoatom, Leningradskaya AES*

E-mail: kral27@mail.ru

Received: 23.03.2020

DOI: 10.18721/JEST.26106
УДК 620.193.6

Д.А. Кончус, А.В. Сивенков, А.В. Михайлов, Е.И. Пряхин

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Широкое применение из коррозионностойкой стали получили бытовые предметы и промышленное оборудование для продуктов питания, которые успешно маркируют с помощью лазерных систем. Перечисленные изделия регулярно подвергаются агрессивному воздействию сильных щелочей, кислот и ПАВ из состава различных бытовых моющих и дезинфицирующих средств. Исследование посвящено изучению коррозионной стойкости стали марки 08X18H10, обработанной системой лазерной маркировки «МиниМаркер2 – М20А4». Лазерное воздействие при маркировке металлических изделий заключается в изменении структуры оплавленной зоны. Были проведены испытания образцов на стойкость и считываемость после воздействия кислот и щелочей, различных химических сильнодействующих средств; оценивалась склонность к МКК, для практического применения важен случай, когда скорость растворения приграничных областей на несколько порядков превышает величины скорости растворения основного металла.

Ключевые слова: Коррозионностойкая сталь, лазерная маркировка, QR-код, межкристаллитная коррозия, питтинг-коррозия

Ссылка при цитировании:

Кончус Д.А., Сивенков А.В., Михайлов А.В., Пряхин Е.И. Влияние лазерной маркировки на коррозионную стойкость нержавеющей стали // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2020. Т. 26, № 1. С. 62–74. DOI: 10.18721/JEST.26106

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

D.A. Konchus, A.V. Sivenkov, A.V. Mikhajlov, E.I. Pryakhin

Saint-Petersburg mining university, Saint-Petersburg, Russia

THE LASER MARKING INFLUENCE ON THE STAINLESS STEEL CORROSION RESISTANCE

The research describes to the corrosion resistance study of AISI 304 steel treated with a MiniMarker2 – M20A4 laser marking system. The steel was marked with a 35 × 35 mm QR code containing 305 typewritten characters. Samples were tested on stability and readability after exposure to acids and alkalis, various chemical potent household detergents and disinfectants. To assess the durability of the applied laser marking, the sample with the marking is exposed to boiling tap water at 100 ° C for 3 hours. The intercrystalline corrosion tendency was estimated. The tests for the intercrystalline corrosion resistance were carried out according to the AMU method without provoking heating for unstabilized steel (GOST 6032–2003)

Keywords: Corrosion Resistant Steel, laser marking, QR-code, intercrystalline corrosion, pitting corrosion

Citation:

D.A. Konchus, A.V. Sivenkov, A.V. Mikhajlov, E.I. Pryakhin, The laser marking influence on the stainless steel corrosion resistance, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 26 (01) (2020) 62–74. DOI: 10.18721/JEST.26106

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Лазерная маркировка металлических изделий важна сегодня как для производителя, который с ее помощью может контролировать качество и объем работ, так и для потребителя, нуждающегося в информации о продукции. Чаще всего применяется перспективный метод лазерной маркировки, заключающийся в обработке поверхности материала промышленным лазерным маркером [1].

Лазерное воздействие при маркировке металлических изделий заключается в изменении структуры оплавленной зоны [2–4]. Поэтому влияние лазерной маркировки на стойкость к МКК, химической и электрохимической коррозии требует отдельного изучения

Если рассматривать коррозионностойкую хромистую сталь, то окисленный слой металла состоит из оксидов железа и хрома (остальные элементы выгорают с поверхности) [5–8], которые образуют пленки, удовлетворяющие условию сплошности. Пористость оксидов, а также рельеф металла после нанесения маркировки неоднороден [9, 10], что может также привести к нарушению сплошности пленки, провоцируя коррозию.

Межкристаллитной коррозии (МКК) подвержены хромоникелевые коррозионностойкие стали. Для практического применения важен случай, когда скорость растворения приграничных областей на несколько порядков превышает величину скорости растворения основного металла. Существуют факторы вызывающие ускоренное растворение металла по границам зерен в коррозионностойких сталях. Одним из таких факторов из-за высокого нагрева является обеднение приграничных зон хромом. Второй же фактор связан с возникновением скопления примесей, что происходит в связи с оплавлением металла и, соответственно, с нарушением распределения компонентов, в указанных областях, что приводит к способствующим резкому росту скорости коррозии [11–13]. Таким образом лазерная маркировка может спровоцировать образование МКК.

Широкое применение из коррозионностойкой стали получили бытовые предметы: столовые приборы, сантехнические узлы, а также предметы и оборудование, применяемое в пищевой промышленности, как промышленное, так и бытовое, используемое для хранения и переработки. Все эти изделия успешно маркируют, используя лазерные системы. В связи с назначением данной продукции, она регулярно подвергается агрессивному воздействию сильных кислот, щелочей, ПАВ, которые входя в состав разных моющих и дезинфицирующих средств бытового назначения. В работах [14, 15] было выявлено, что в кипящей воде и средах с присутствием ионов хлора использование изделий из коррозионностойкой стали с лазерной маркировкой не желательна.

Цель настоящей работы – оценить влияние и склонность к коррозии образцов из коррозионностойкой стали с нанесенными методом лазерной маркировки QR-кодами.

Материалы и методы исследования

В данной работе были использованы холоднокатаные листы толщиной 1,5 мм из стали 08X18H10 (химический состав стали по ГОСТ 5632–2014). Данная марка стали является коррозионностойкой и жаростойкой аустенитного класса. Химический состав исследуемой стали 08X18H10 приведен в табл. 1.

Сталь может быть склонна к МКК даже в закаленном состоянии. Нагрев до 600–650 °С приводит сталь в склонное к МКК состояние.

Шероховатость поверхности листовой заготовки составляет $R_a = 0,112$ мкм.

В работе использовалась система прецизионной лазерной маркировки «МиниМАРКЕР 2-20A4», предназначенная для нанесения текстовых и графических изображений на поверхность изделий методом лазерной маркировки. Сталь маркировалась QR-кодом размером 35×35 мм содержащим 305 знаков машинописного текста в несколько проходов с формированием подложки и кода, режим нанесения маркировки представлен в табл. 2.

Таблица 1

Химический состав стали 08X18H10

Table 1

The chemical composition of steel AISI 304

№ пп	Марка стали	Содержание элемента, мас. %							
		C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Ti
1	08X18H10	0,08	0,8	2	9–11	0,02	0,035	17–19	0,5

Таблица 2

Параметры лазера при нанесении маркировки

Table 2

Laser parameters for marking

Вид нанесения	Длина импульса, нс	Частота, кГц	Мощность, %	Скорость, мм/с	Линиатура, л/мм	Количество проходов
Подложка	100	100	30	600	60	2
Код	100	60	30	5	20	1

Для изучения микроструктуры использовались металлографические микроскопы Leica DM ILM HC и Zeiss Observer A1m¹ с программами обработки изображения.

Исследования на коррозионную стойкость к межкристаллитной коррозии проводились по ГОСТ 6032–2003 (метод АМУ) без провоцирующего нагрева для нестабилизированной стали аустенитного класса.

МКК вызвана объединением границ зерен хромом в результате выпадения по границам зерен богатых хромом фаз: карбидов хрома, σ -фазы, интерметаллических включений при выдержки сталей или сплавов при температуре 500–1000 °С.

В зависимости от химического состава стали и сплава, а также назначения выбирают один из следующих методов испытаний на стойкость металла к МКК: АМУФ, АМУ, ДУ, ВУ, Б, В.

В условном обозначении метода АМУ буквы обозначают: А – наименование метода,

М – присутствие в растворе для испытаний металлической меди, У – ускоренные испытания.

Испытаниям на стойкость к МКК подвергались 2 образца размером 80×30 мм для каждого режима маркировки.

После эксперимента образцы по ГОСТ 14019–2003 были загнуты на угол 90±5°. Радиус закругления зависит от класса стали и вида металлопродукции, из которой изготовлены образцы и толщины образца. Для листа толщиной 1,5 мм из аустенитной стали радиус составляет не более толщины образца (в данном случае он составил 1 мм).

Сущность метода АМУ заключается в выдержке образцов в кипящем водном растворе сернистой меди в присутствии металлической меди (стружки).

Осмотр изогнутых образцов производили с помощью лупы при увеличении ×7–12. Отсутствие трещин на образцах (продольные и трещины непосредственно на кромках присутствуют) свидетельствует о стойкости стали. О склонности стали к МКК показывает присутствие поперечных трещин на образцах и отсутствие на контрольных.

¹ Leica microsystems. URL: <https://www.leica-microsystems.com/products/light-microscopes/inverted-microscopes/> (дата обращения 16.09.2019).

Таблица 3

Массы компонентов для приготовления необходимых растворов

Table 3

Masses of components for the preparation of the necessary solutions

Необходимый конечный раствор	Исходные вещества, конц.						
	Дист. вода	H ₂ SO ₄ , 96 %	NaOH, крист.	Уксусная к- та, 9 %	HNO ₃ , 65 %	HCl, 38 %	NaCl, крист.
10 % раствор серной кислоты	179 г	21 г	–	–	–	–	–
10 % раствор хлорида натрия	180 г	–	–	–	–	–	20 г
10 % раствор соляной кислоты	147 г	–	–	–	–	53 г	–
10 % раствор гидроксида натрия	180 г	–	20 г	–	–	–	–
10 % раствор азотной кислоты	169 г	–	–	–	31 г	–	–
9 % раствор уксусной кислоты	–	–	–	200 г	–	–	–

Исследования на устойчивость изображения к воздействию растворов кислот и щелочей, и солевому раствору проводились в: 10 % растворах серной, азотной, соляной кислот; 9 % растворе уксусной кислоты, 10 % растворах солей гидроксида натрия, хлорида натрия.

Для испытаний использовался 9 % раствор уксусной кислоты (ГОСТ Р 55982–2014), 96 % раствор серной кислоты H₂SO₄ (ГОСТ 4204–77), 65 % раствор азотной кислоты HNO₃ (ГОСТ 4461–77), 38 % раствор соляной кислоты HCl (ГОСТ 3118–77), гидроокись натрия химически чистая NaOH (ГОСТ 4328–77), хлорид натрия NaCl (ГОСТ 4233–77), вода дистиллированная (ГОСТ 6709–72).

Требуемые массы исходных веществ для приготовления испытательных растворов приведены в табл. 3.

В приготовленных растворах испытания проводились 100 ч. По истечению времени выдержки образцы промывались в проточной воде и подвергались визуальному контролю и проверке на считываемость QR-кода.

Исследования на устойчивость маркировки воздействию сильных щелочей, кислот и ПАВ из состава различных бытовых моющих и дезинфицирующих средств с различной степенью кислотности pH от 0 до 12 проводилась

с целью оценки устойчивости к считыванию QR-кода.

Образцы поделили на три группы для выдержки в растворах. В первую группу вошли растворы, среда которых считается кислой с pH = 0–3 (Туалетный утенок (ТУ У 00146137.009-94), Sarma (ТУ 2383-089-75086864-2010), Санокс Ультра (ТУ 2383-011-00335215-96)). Вторую группу составили растворы с нейтральной средой – Химитек универсал – ПД (ТУ 2381-105-46907113-2011) с pH = 6. К щелочным моющим средствам относятся вещества с pH = 10–12, такие как Чистин сток (ТУ 2389-118-70864601-2007), Sanfor Universal (ТУ 2383-182-70864601-2008), Sanfor Белизна (ТУ 2382-110-70864601-2007).

Продолжительность эксперимента выбрали, предположив частоту использования указанных средств в быту. Одно применение в 3 дня, с обработкой в течение от 5 до 15 мин. В итоге годовое воздействие средств на поверхность будет вычисляться по следующей формуле [16]:

$$T_{\text{год}} = \frac{N \cdot t}{4} = \frac{365 \cdot 0,25}{4} = 22,81 \text{ ч}, \quad (1)$$

где N – количество дней в году; t – время выдержки средства, ч.

Приблизительный гарантийный срок службы бытовых изделий составляет 5–7 лет в

связи с чем, эксперимент проводился в течение 168 ч (7 дней).

Сталь 08X18H10 используется для изготовления сварных и сборных конструкций практически в пищевой промышленности для изготовления оборудования по переработке продуктов. Из нее производят трубы, емкости и детали всевозможных агрегатов, работающих при высоких температурах и различных давлениях. Листы из этой стали применяются в качестве декоративных элементов, каркасов и т. п.

Сталь 08X18H10 имеет устойчивый запас противостояния окислительным процессам даже при нагревании. Однако при длительном нагревании в водной среде при повышенных давлениях может окисляться.

Для оценки стойкости нанесенной лазерной маркировки образец с маркировкой подвергается воздействию кипящей водопроводной воды при 100°C в течение 3 часов. Согласно эталонам, участки образца без нанесенной маркировки не должны менять цвет.

Результаты и их обсуждение

Испытание на стойкость к МКК. Повышенная коррозионная стойкость различных металлов и сплавов может быть обусловлена различными причинами, в том числе и инертностью металла. Хромовые, никелевые и хромоникелевые коррозионностойкие стали, обладают своими свойствами благодаря входящим в их состав легирующим элементам, в частности хромом и никелем. При этом коррозионная стойкость наступает при определенном содержании данных элементов. Но несмотря на выше сказанное, коррозионностойкие стали, при определенных условиях, все же подвержены некоторым видам коррозии, таким как межкристаллитная и точечная коррозия.

Для выявления МКК после кипячения в реактиве образец загнули на угол $90 \pm 5^\circ$. Трещины на образце не обнаружены (в том числе и продольные, и трещины на кромках). Это

свидетельствует о том, что нанесение лазерной маркировки не спровоцировало образование МКК.

После испытаний образец был исследован с помощью микроскопа. При увеличении в 50 раз на вершинах борозд маркировки заметны утолщения межзеренных границ, это свидетельствует о воздействии лазерной маркировки на свойства стали. Однако, данный факт не является основанием для отрицательной оценки результатов эксперимента. Сдаточной характеристикой подтверждения стойкости к МКК по ГОСТ 6032–2003 является визуальный контроль с применением лупы (увеличение 7–12 раз). При металлографическом контроле признаком стойкости является разрушение на максимальную глубину (до 30 мкм) границ зерен. Очевидно, что данные критерии соблюдены.

Испытания на устойчивость маркировки к воздействию кислотных и щелочных растворов и растворов солей. Образцы, помещенные в 9 %-й водный раствор уксусной кислоты, визуально не подвергаются воздействию раствора кислоты (рис. 1, а). Считываемость QR-кода сохранилась.

Образцы, помещенные в 10 %-й солевой раствор (NaCl), подвергаются воздействию солевого раствора (рис. 1, б). По границам лазерной маркировки наблюдается ярко выраженный коррозионный процесс образования окислов железа ярко-рыжего цвета. QR-код не считывается.

Образцы, помещенные в 10 %-й раствор гидроксида натрия (NaOH), визуально не подвергаются воздействию щелочи (рис. 1, в). Считываемость QR-кода сохранилась.

Образцы, помещенные в 10 %-й раствор серной кислоты (H_2SO_4), подвергаются воздействию раствора (рис. 2, а). Прошла химическая реакция с растворением сплава. Раствор приобрел голубой оттенок. QR-код не считывается.

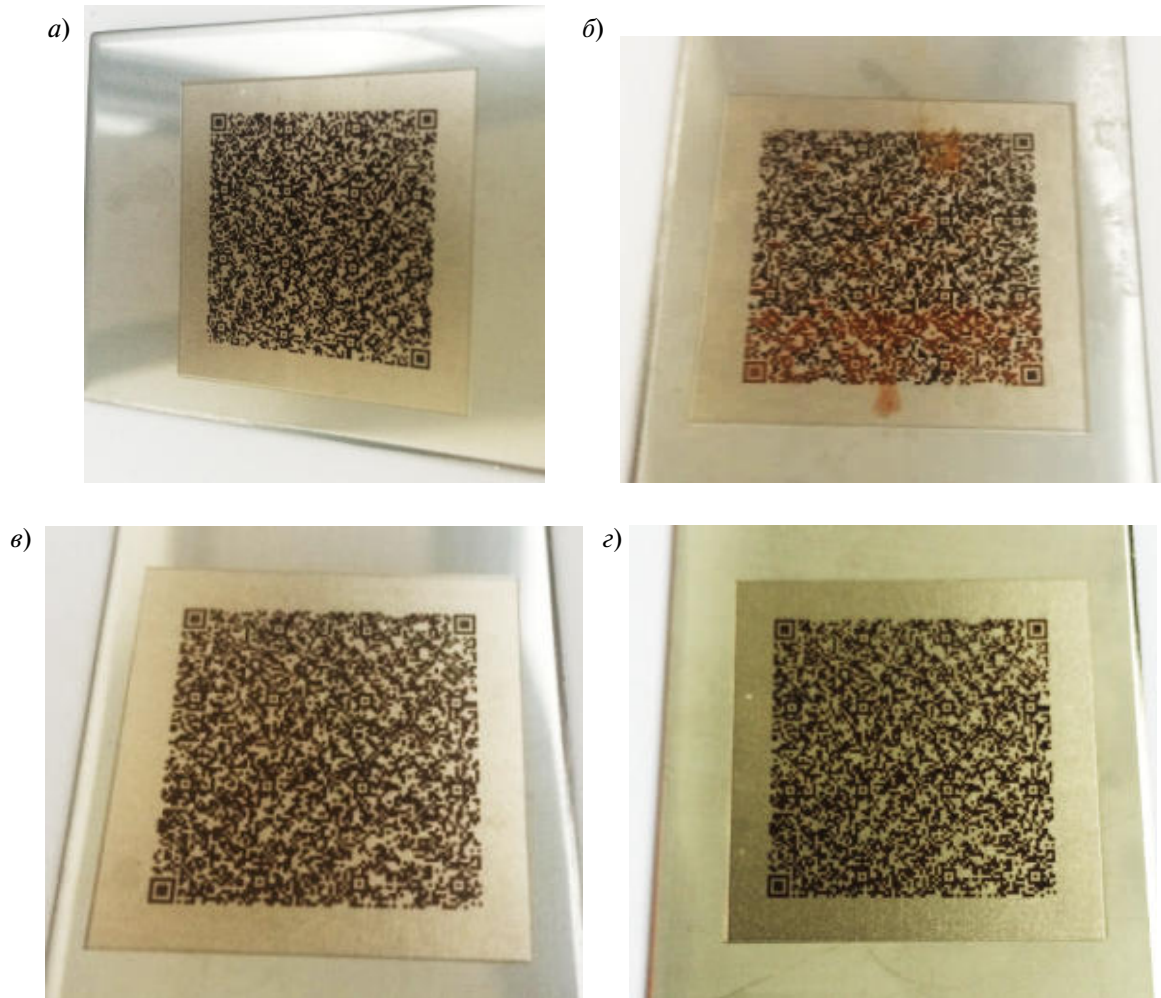


Рис. 1. Образцы с QR-кодом после воздействия: а) раствора уксусной кислоты; б) солевого раствора; в) щелочного раствора гидроксида натрия; г) исходный образец

Fig. 1. Samples with a QR code after influence: а) acetic acid solution; б) saline solution; в) alkaline sodium hydroxide solution; г) initial sample

Образцы, помещенные в 10 %-й раствор азотной кислоты (HNO_3), визуально подвергаются воздействию раствора: QR-код стал менее ярким и контрастным, но считываемость QR-кода не изменилась (рис. 2, б).

Образцы (рис. 3, а), помещенные в 10 %-й раствор соляной кислоты (HCl), подвергаются воздействию раствора (рис. 3, б). Прошла химическая реакция с самим металлом, растворился исходный металл. QR-код не считывается из-за осветления.

Изучение стойкости лазерной маркировки к температурному воздействию в водной среде.

Сталь 08X18H10 имеет устойчивый запас противостояния окислительным процесса даже при нагревании. Однако при длительном нагревании в водной среде при повышенных давлениях может окисляться. Образцы помещались на 3 ч в кипящую ($100\text{ }^\circ\text{C}$) водопроводную воду. В ходе проверки считываемость QR-кода сохранилась, подложка несколько потемнела, но сама маркировка цвет не меняла.

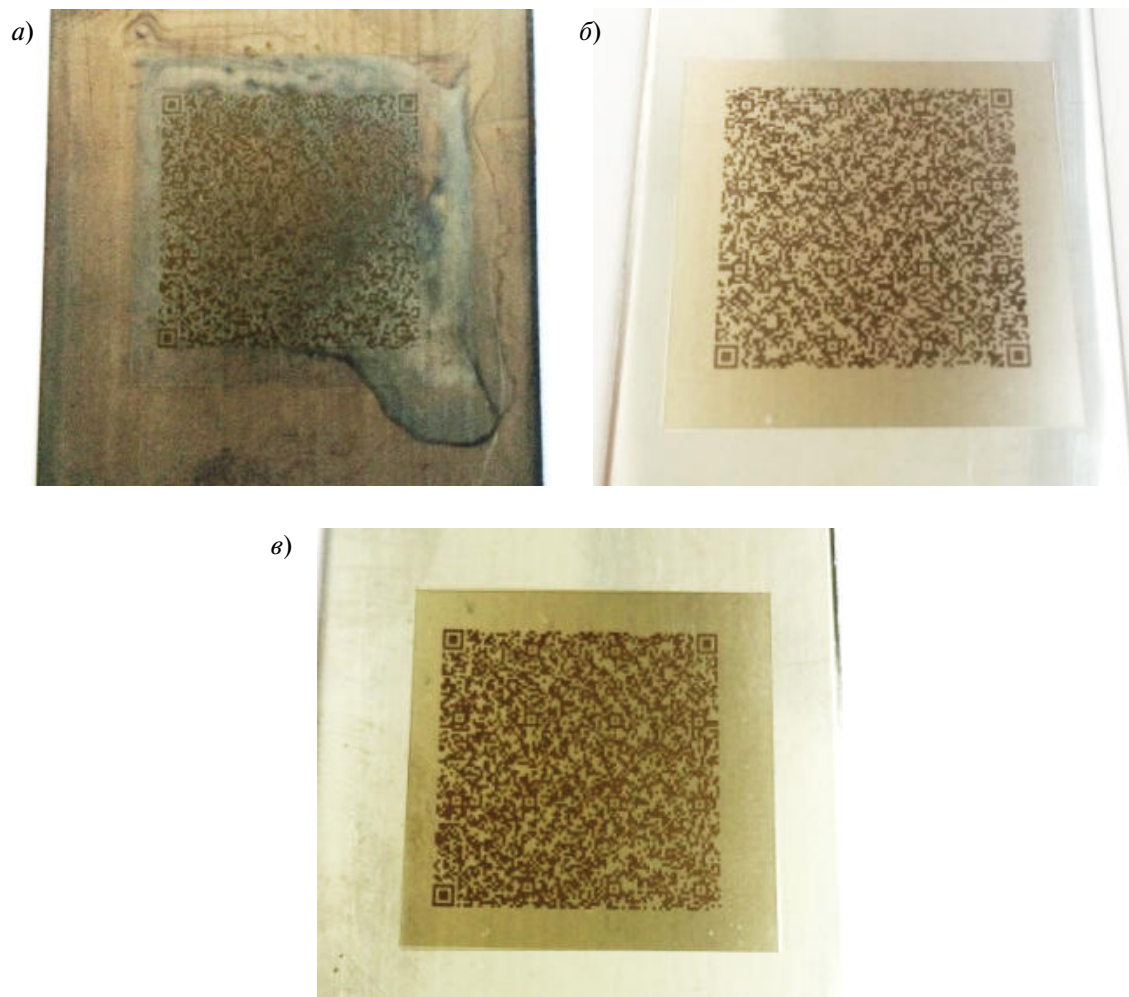


Рис. 2. Образцы с QR-кодом после воздействия раствора: а) серной кислоты, б) азотной кислоты; в) исходный образец

Fig. 2. Samples with a QR code after solution influence: а) sulfuric acid; б) nitric acid; в) initial sample

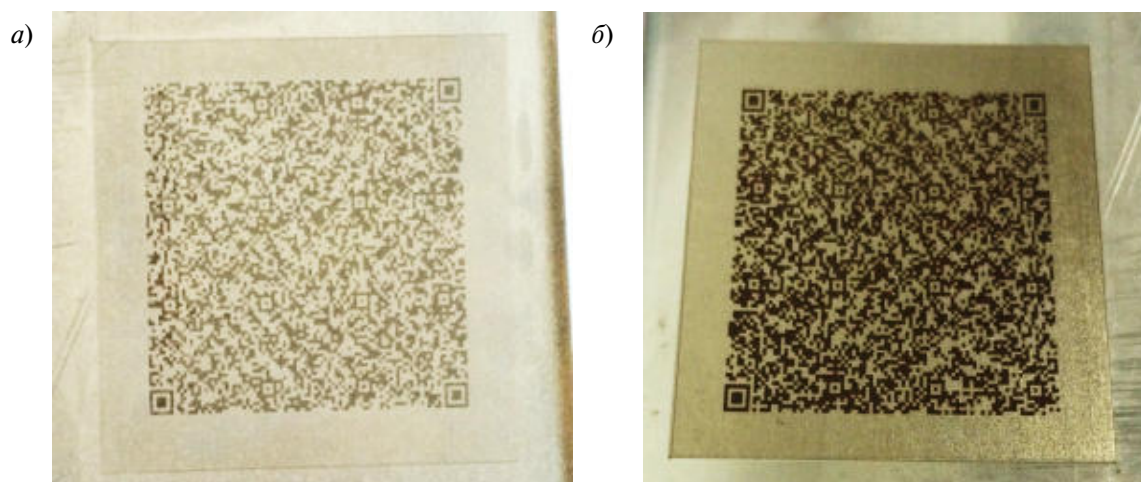


Рис. 3. Образцы с QR-кодом после воздействия: а) раствора соляной кислоты; б) исходный образец

Fig. 3. Samples with a QR code after influence: а) hydrochloric acid solution; б) initial sample

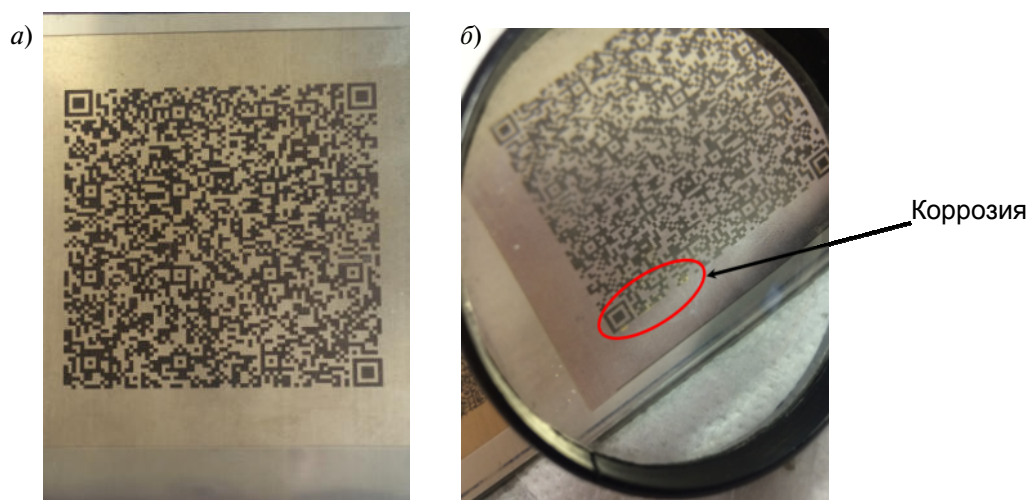


Рис. 4. Образцы с QR-кодом: а) исходный до кипячения; б) после кипячения в воде при 100 °С, 3 ч
 Fig. 4. Samples with a QR code: а) before boiling; б) after boiling in water at 100 °С, 3 hours

Вместе с тем по границам маркировки (рис. 4, б) после просушки образцов появилась коррозия.

Таким образом, на стойкость лазерной маркировки на коррозионностойкой стали влияет химический состав раствора. При наличии в одной среде ионов-активаторов (Cl^- , SO_4^{2-}) происходит нарушение сплошности пассивирующей пленки оксида и наблюдается химическая реакция и частичное растворение сплава на отдельных участках. Оксид, который возникает при лазерной маркировке, получается пористым и дефектным или недостаточно плотным, и не является защитой для слоев металла от дальнейшего окисления, лежащих под ним.

Сводные результаты испытаний образцов с QR-кодом в растворах кислот, щелочей и соляном растворе в течение 100 ч представлены в табл. 4.

Вид коррозии, который также поражает в основном коррозионностойкие стали – точечная или, иными словами, питтинговая коррозия. Точечная коррозия наблюдается в тех случаях, когда коррозии подвержены небольшие участки поверхности, что приводит к образованию глубоких повреждений – точечных язв или питтингов. Питтинг может возникать в слабых местах пассивной пленки по достижении определенного потенциала питтингообра-

зования за счет окислителя или анодной поляризации в присутствии активирующих ионов в растворе, которые вытесняют адсорбированный кислород или, взаимодействуя, разрушают оксидную пленку.

Любое изделие вне зависимости от сферы применения, то есть в быту или в производстве требует должного ухода, при этом уход этот заключается не только в техническом обслуживании и ремонте, но и в банальном мытье и чистке деталей агрегатов и машин. Таким образом, различные изделия и детали из коррозионностойких сталей подвергаются воздействию со стороны специальных чистящих и моющих средств.

Исследования на устойчивость маркировки к воздействию разных дезинфицирующих, моющих бытовых средств, в состав которых входят ПАВ, сильные кислоты и щелочи проводились течение 168 ч.

Лазерная маркировка, есть ни что иное, как локальное изменение поверхности материала, при этом меняется рельеф, а следовательно и шероховатость поверхности, нарушая сплошность пассивных пленок, также возможно изменение структуры металла на небольшую глубину. Эти факторы с большой вероятностью могут спровоцировать локальный рост точечной коррозии на поверхностях коррозионностойких сталей, обработанных лазерными системами.

Таблица 4

Результаты испытаний образцов в растворах кислот, щелочей и соляном растворе в течение 100 ч.

Table 4

The samples test results in solutions of acids, alkalis and saline for 100 hours

№ опыта	Среда испытания (водные растворы)	Результат воздействия	Примечание
1	9 %-й раствор уксусной кислоты	Нет	Считываемость сохранилась
2	10 %-й раствор поваренной соли	Есть	Коррозия по границам кода. Код не считывается
3	10 %-й раствор гидроксида натрия	Нет	Считываемость сохранилась
4	10 %-й раствор серной кислоты	Есть	Растворение самого металла. Код не считывается.
5	10 %-й раствор азотной кислоты	Есть	Код менее яркий и контрастный. Считываемость сохранилась
6	10 %-й раствор соляной кислоты	Есть	Растворение самого металла. Код не считывается.

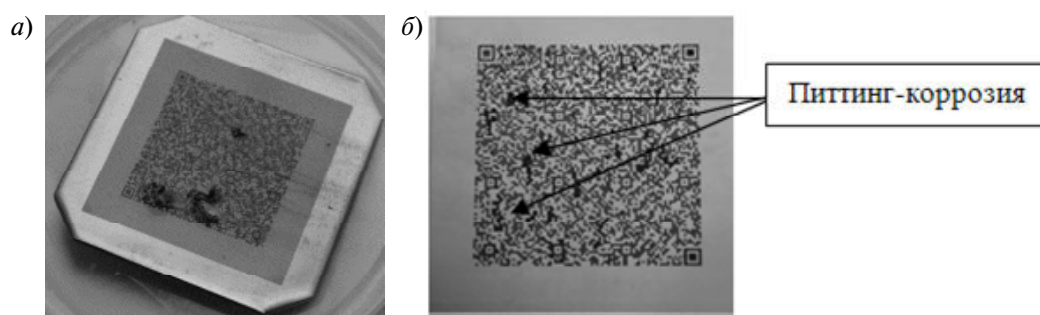


Рис. 5. Вид коррозионного поражения QR-кода при выдержке в средстве «Чистин сток» с рН 10 на стали 08X18H10: а) до промывки водой; б) после промывки водой

Fig. 5. Corrosion damage type of the QR code during aging in an alkaline agent with pH 10: а) before wash off water; б) after wash off water

В результате эксперимента большинство образцов были поражены коррозией. На рис. 5 представлены образцы со следами коррозии. Образцы, находившиеся в щелочных растворах, которые вызвали питтенговую коррозию, подверглись наибольшему воздействию. Сгустки черных окислов видны в местах поражений.

Для проверки считывания QR-кода с образцов использовали мобильное устройство.

Поскольку произошло снижение контрастности из-за образования соляной пленки на поверхности образца с маркировкой, QR-коды на пластинах из группы с кислотными

моющими средствами считывались с ощутимой задержкой. Образцы, выдержанный в нейтральной среде, считываемость сохранили, не смотря на то, что были выявлены значительные задержки, связанные с не полным удалением кристаллов солей с поверхности кода. При оценке образцов из щелочных растворов зафиксировано ошибочное считывание кода, на ряду со считыванием с задержками.

На микроскопах Leica DM ILM и Zeiss Observer A1m. осуществлялись металлографические исследования микроструктуры поперечных шлифов.

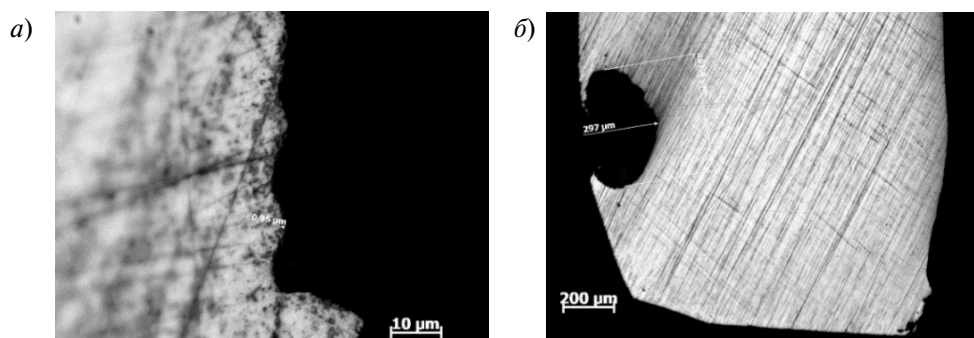


Рис. 6. Маркированная микроструктура поверхности: а) окисный слой; б) зона с коррозионной язвой
 Fig. 6. Marked surface microstructure: a) oxide layer; б) area with a corrosion ulcer

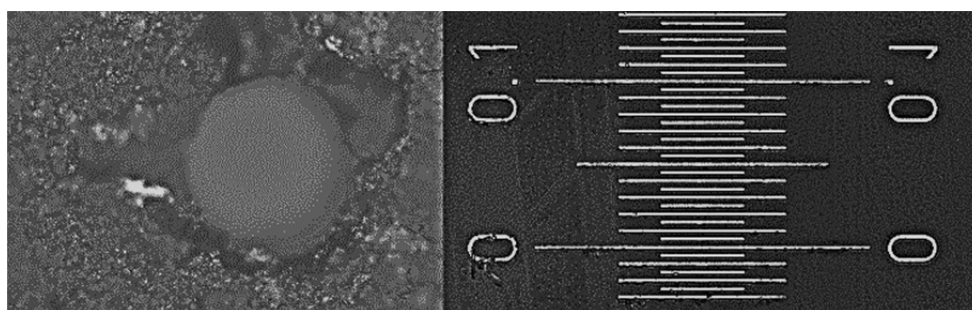


Рис. 7. Питтинг и «объект-микрометр»
 Fig. 7. Pitting and micrometer object

На поверхности промаркированного образца (рис. 6) идентифицировали рыхлую, пористую структуру, слой толщиной 0,95 мкм металлических окислов. Хорошо видна одна из язв, представляющая собой сферу с глубиной 297 мкм при диаметре 461 мкм.

Степень коррозионного поражения на образцах, находившихся в растворах щелочи, оценивалась по ГОСТ 9.908–85.

На образцах, которые выдерживались в щелочном моющем средстве «Sanfor Белизна» (рН 12), были выявлены максимальные поражения (рис. 7). Так среднее число зафиксированных очагов коррозии на поверхности образцов, обработанных щелочными средствами, 8. Степень поражения составила $6,25 \times 10^{-7}$ % при площади питтингов 0,785 мкм². Площадь, которую занимает QR-кодом, считалась площадью поверхности, равную 1024 мм².

Появление коррозии по границам маркировки при воздействии кипящей водной среды можно объяснить наличием в водопроводной воде агрессивных ионов хлора. Следовательно, нежелательно применение деталей с лазерной маркировкой в данных условиях работы.

Таким образом, лазерная маркировка с локальным нагревом и оплавлением поверхностных слоев металлических сплавов провоцирует неблагоприятное изменение химического состава и, соответственно, коррозионной стойкости.

Химический состав бытовых и моющих средств, в частности, содержащих ионы Cl⁻, оказывает воздействие на коррозионную стойкость металла, вызывая пробивание пассивного состояния металлов и образования очагов питтинговой коррозии. Изменение шероховатости и возможная неравномерность оксидов,

определяющих цвет маркировки, относится к важным факторам.

Поскольку имеется пиковый лазерный импульс в начале прохода, что обнаруживает локальные изменения структуры и химического состава поверхности, наблюдается рост питтингов из крайних областей маркировки [17]. Изменение структуры подтверждается тем, что коррозионностойкие стали, не подвергнутые другим воздействиям и структурным изменениям, характеризуются возрастанием пассивности в интервале показателей pH 11–13 и высокой стойкостью к щелочным растворам.

Выводы

1. В данной работе выполнен комплексный метод оценки влияния лазерной маркировки на структуру аустенитной стали марки 08X8H10. Исследования показали, что лазерная маркировка не провоцирует склонность стали к МКК.

2. Стойкость лазерной маркировки к воздействию растворов кислот, щелочей и солей определяется не только химическим составом реактива, но и химическим составом самой стали. Так, например, раствор гидроксида натрия и уксусной кислоты не оказывает воздействия на маркировку, раствор азотной кис-

лоты вызывает осветление маркировки, растворы соляной и серной кислот растворяют сам металл, а в растворе поваренной соли наблюдаются коррозионные процессы. Также после кипячения в водопроводной воде маркировка спровоцировала коррозию на самой маркировке.

3. Кислотные средства, а также средства на основе ПАВ не провоцируют коррозионных изменений в области маркировки на образцах из стали 08X18H10.

4. Сильнодействующие моющие средства на щелочной основе провоцируют рост питтинг-коррозии в области маркировки, в местах начала лазерного воздействия, поэтому не следует применять моющие и чистящие средства, содержащие ионы Cl^- , для промышленных и бытовых изделий из коррозионностойкой стали с нанесенной лазерной маркировкой.

5. Лазерная маркировка провоцирует локальное изменение структуры коррозионностойкой стали, что увеличивает риск возникновения очагов коррозии. В дальнейшем рекомендуется уделить большее внимание оптимизации режимов маркировки, с возможным снижением пиковой (начальной) мощности лазера, чтобы повысить стойкость лазерной маркировки на поверхности стали 08X18H10.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Валиулин А., Горный С., Гречко Ю., Патров М., Юдин К., Юревич В. Лазерная маркировка материалов // Фотоника. 2007. № 3. С. 16–22.
 [2] Григорьев А.М., Патров М.И., Соловьев В.Д., Туричин Г.А. Горный С.Г. Специфика поверхностной обработки металла сериями лазерных импульсов наносекундной длительности // Квантовая электроника. 2002. № 10. С. 929–932.
 [3] Кузнецов П.М., Федоров В.А., Васильева С.В., Барышев Г.А. О некоторых механизмах воздействия лазерного излучения на металлы // Вестник ТГУ. 2010. № 1 (15). С. 249–250.
 [4] Бирюков В. Лазерные технологии в машиностроении // Фотоника. 2013. № 2. С. 46–53
 [5] Ганзуленко О.Ю., Ларионова Е.В., Петкова А.П. Технология маркировки серийных изделий из

металлических и полимерных материалов посредством импульсного лазерного излучения // Неделя науки СПбГПУ: Сб. научных трудов. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. С. 178–181
 [6] Ганзуленко О.Ю., Петкова А.П. Выбор состава сталей с целью получения изображений полной цветовой гаммы на поверхности изделий при импульсном лазерном излучении // Записки Горного института. 2014. Т. 209. С. 216–219
 [7] Петкова А.П., Ганзуленко О.Ю. Технологические аспекты маркировки изделий машиностроения прецизионным импульсным лазером // Современное машиностроение. Наука и образование. 2014. № 4. С. 1177–1187
 [8] Ганзуленко О.Ю., Ларионова Е.В., Петкова А.П. Технология лазерной маркировки серийных



изделий из металлических и полимерных материалов в целях их учета и идентификации // *Металлообработка*. 2014. № 1 (79). С. 21–26.

[9] **Pryakhin E.I., Ganzulenko O.Y., Petkova A.P.** Development of polygraphic program-controlled hardware system for applying high-density coding on surface of products made from varied materials // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol 194. P. 42020.

[10] **Sivenkov A.V., Konchus D.A., Chirkova O.S., Priahin E.I.** Assessment of laser marking contrast with profilometer // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol/ 194. P. 42022.

[11] **Popov G., Kasyanov A., Bolobov V., Krivokrysenko E.** Study of factors enabling initiation and behavior of grooving corrosion // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol/ 121. P. 3004.

[12] **Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М.** Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии. // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2(35). С. 76–87

[13] **Ермаков Б.С., Вологжанина С.А., Иголкина Е.В., Ермаков С.Б.** Причины коррозионной по-

вреждаемости оборудования холодильной техники // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Холодильная техника и кондиционирование*. 2017. № 4(27). С. 3–12.

[14] **Сивенков А.В., Зверькова Е.И., Демидова Т.И.** Влияние лазерной маркировки на изменение структуры и свойств стали аустенитного класса // *Будущее машиностроения России: Сб. научных трудов*. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. С. 316–320.

[15] **Sivenkov A., Kononov K., Zverkova E.** Influence laser marking on structure and properties steel // *International Scientific Review*. 2016. Vol 11 (21). С. 38–40.

[16] **Михайлов А.В., Сивенков А.В., Кончус Д.А.** Исследование свойств коррозионностойкой стали, обработанной системой лазерной маркировки «Минимаркер2 –М20А4» // *Современные тенденции развития естественных и технических наук: Сб. научных трудов*. Белгород: Изд-во АПНИ, 2018. С. 218–221

[17] **Васильев О.С., Горный С.Г.** Технология создания поверхностных микроструктур на листовых материалах с использованием волоконного лазера // *Металлообработка*. 2016. № 3 (93). С. 20–25.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНЧУС Дарина Александровна – аспирант Санкт-Петербургского горного университета

E-mail: pelagia@bk.ru

СИВЕНКОВ Алексей Валентинович – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского горного университета

E-mail: sivenkov@mail.ru

МИХАЙЛОВ Андрей Владимирович – аспирант Санкт-Петербургского горного университета

E-mail: tiger9595@mail.ru

ПРЯХИН Евгений Иванович – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского горного университета

E-mail: mthi@spmi.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 31.01.2020

REFERENCES

[1] **S.G. Valiulin, Yu. Grechko, M. Patrov, K. Yudin, V. Yurevich**, Laser material marking, *Photonics*, 3 (2007) 16–22.

[2] **A.M. Grigoriev, M.I. Patrov, V.D. Soloviev, G.A. Turichin, S.G. Gorny**, Specific features of metal surface processing by nanosecond laser pulse trains, *Quantum Electronic*, 32(10) (2002) 929–932.

[3] **P.M. Kuznetsov, V.A. Feodorov, S.V. Vasilyeva, G.A. Baryshev**, About some mechanisms of influence of laser radiation on metals, *Tomsk State University Journal*, 1(15) (2010) 249–250.

[4] **V. Biryukov**, Laser systems and technologies in engineering industry, *Photonics*, 2(38) (2013) 46–53

- [5] **O.Y. Ganzulenko, E.V. Larionova, A.P. Petkova**, Tehnologiya markirovki serijnyh izdelij iz metallicheskih i polimernyh materialov posredstvom impulsnogo lazernogo izlucheniya [Technology for marking serial products from metal and polymer materials by pulsed laser radiation], Science week: Proceedings of St. Petersburg State Polytechnical University, Saint Petersburg, St. Petersburg State Polytechnical University, (2014) 178–181.
- [6] **O.Y. Ganzulenko, A.P. Petkova**, Selection of alloying elements in steels for obtaining images full range of colors on the surface of the products by means of a pulsed laser radiation, Journal of Mining Institute, 209 (2014) 216–219.
- [7] **A.P. Petkova, O.Y. Ganzulenko**, Tehnologicheskie aspekty markirovki izdelij mashinostroeniya precizionnym impulsnym lazerom [Technological aspects of marking engineering products with precision pulsed laser], Modern engineering. Science and education, Saint Petersburg, St. Petersburg State Polytechnical University Journal, 4 (2014) 1172–1187.
- [8] **O.Y. Ganzulenko, E.V. Larionova, A.P. Petkova**, Laser marking technology for serial products made from metallic and polymeric materials with a view to their policies and identification, Metalworking, 1(79) (2014) 21–26.
- [9] **E.I. Pryakhin, O.Y. Ganzulenko, A.P. Petkova**, Development of polygraphic program-controlled hardware system for applying high-density coding on surface of products made from varied materials, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 194 (2018) 42020.
- [10] **A.V. Sivenkov, D.A. Konchus, O.S. Chirkova, E.I. Priahin**, Assessment of laser marking contrast with profilometer, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 194 (2018) 42022.
- [11] **G. Popov, A. Kasyanov, V. Bolobov, E. Krivokrysenko**, Study of factors enabling initiation and behavior of grooving corrosion, E3S Web of Conferences, 121 (2019) 3004.
- [12] **E.N. Kablov, O.V. Startsev, I.M. Medvedev**, Review of international experience on corrosion and corrosion protection, Aviacionnye Materialy and Tehnologii, 2(35) (2015) 76–87.
- [13] **B.S. Ermakov, S.A. Vologjanina, E.V. Igolkina, S.B. Ermakov**, Reasons of corrosion damageability of the equipment refrigerating equipment The ITMO University’s scientific journal Refrigeration and Air Conditioning, 4(27) (2017) 3–12.
- [14] **A.V. Sivenkov, E.I. Zverkova, T.I. Denidova**, Influence Laser Marking on Structure and Properties Steel AISI 304, The future of Russian engineering: Proceedings of Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Bauman Moscow State Technical University. (2016) 316–320.
- [15] **Sivenkov, K. Konovalov, E Zverkova**, Influence laser marking on structure and properties steel, International Scientific Review, 11 (21) (2016) 38–40.
- [16] **A.V. Mikhajlov, A.V. Sivenkov, D.A. Konchus**, Issledovania svojstv korrozionnostojkoj stali, obrabotannoj sistemoj lazernoj markirovki “Minimarker2-M2A4” [The investigation of the corrosion-resistant steel properties treated with a laser marking system “Minimarker2 –M20A4”], Modern trends in the development of natural and technical sciences, Proceedings of Advanced Research Agency, Belgorod, (2018) 218–221.
- [17] **O.S. Vasilev, S.G. Gorniy**, Technology of creating microstructures on the surface of sheet materials, Metalworking, 3(93) (2016) 20–25.

THE AUTHORS

KONCHUS Darina A. – *Saint-Petersburg mining university*

E-mail: pelagia@bk.ru

SIVENKOV Aleksei V. – *Saint-Petersburg mining university*

E-mail: sivenkov@mail.ru

MIKHAILOV Andrei V. – *Saint-Petersburg mining university*

E-mail: tiger9595@mail.ru

PRYAKHIN Evgenii I. – *Saint-Petersburg mining university*

E-mail: mthi@spmi.ru

Received: 31.01.2020

DOI: 10.18721/JEST.26107
УДК 546.3

А.Г. Морачевский

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

ДМИТРИЙ ИВАНОВИЧ МЕНДЕЛЕЕВ. 150 ЛЕТ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕМЕНТОВ

2019 год Организация Объединенных Наций провозгласила «Международным годом Периодической таблицы химических элементов». Прошло 150 лет со времени открытия великим российским ученым Д.И. Менделеевым Периодического закона и Периодической системы элементов. Имевшиеся к тому времени (1869 г.) сведения о 63 элементах были приведены в стройную систему и позволили предсказать свойства ряда тех элементов, которые еще не были открыты. Сам Д.И. Менделеев высказывался о своем открытии так: «...Периодическому закону будущее не грозит разрушением, а только надстройка и развитие обещаются». Надстройка оказалась очень значительной – к настоящему времени число элементов достигло 118, причем появившийся в 1955 г. элемент получил название менделеевий (Md, зарегистрирован под номером 101). Еще при жизни ученого ряд предсказаний сбылись: в 1875 г. был открыт галлий, в 1879 г. – скандий, в 1886 г. – германий. Все они ранее получили названия с учетом их сходства с известными элементами: экаалюминий, экабор и экасилиций («эка» – от санскритского слова «один»), были предсказаны их свойства и оставлены места в периодической системе элементов. Открытие предсказанных элементов и то, что определенные экспериментально свойства новых элементов совпали с предсказанными, привело к мировому признанию Периодического закона. В 2007 г. на Международном материаловедческом конгрессе (TMS -2007) Периодическая система химических элементов была названа в числе десяти главных достижений человечества в области материаловедения и наук, занятых разработкой и изучением свойств новых материалов.

Ключевые слова: Д.И. Менделеев, Периодическая система химических элементов, Периодический закон Д.И. Менделеева, русский химик, периодическая зависимость.

Ссылка при цитировании:

Морачевский А.Г. Дмитрий Иванович Менделеев. 150 лет периодической системе элементов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2020. Т. 26, № 1. С. 75–83. DOI: 10.18721/JEST.26107

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

A.G. Morachevskij

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

DMITRI IVANOVICH MENDELEEV. 150 YEARS OF THE PERIODIC SYSTEM OF ELEMENTS

2019, the United Nations proclaimed the «International Year of the Periodic Table of the Chemical Elements». 150 years have passed since the discovery by the great Russian scientist D.I. Mendeleev of the Periodic Law and the Periodic System of Elements. The information on 63 elements available by that time (1869) was brought into a

harmonious system and made it possible to predict the properties of a number of those elements that had not yet been discovered. D.I. Mendeleev himself spoke of his discovery as follows: «... The future does not threaten destruction with a periodic law, but only a superstructure and development are promised.» The superstructure turned out to be very significant – to date, the number of elements has reached 118, and the element that appeared in 1955 was called Mendeleev (Md, registered under number 101). Even during the life of the scientist, a number of predictions came true: gallium was discovered in 1875, scandium in 1879, and Germanium in 1886. All of them were previously named because of their similarity with the known elements: ecaaluminium, ecaabor and ecasilicium («eca» – from the Sanskrit word «one»), their properties were predicted and places were left in the periodic system of elements. The discovery of the predicted elements and the fact that the experimentally determined properties of the new elements coincided with the predicted ones led to the worldwide recognition of the Periodic Law. In 2007, at the International Materials Science Congress (TMS -2007), the Periodic System of Chemical Elements was named among the ten major achievements of mankind in the field of materials science and sciences, engaged in the development and study of the properties of new materials.

Keywords: D.I. Mendeleev, Periodic system of chemical elements, Periodic law of D.I. Mendeleev, Russian chemist, periodic dependence.

Citation:

A.G. Morachevskij, Dmitri Ivanovich Mendeleev. 150 years of the periodic system of elements, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 26 (01) (2020) 75–83. DOI: 10.18721/JEST.26107

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Дмитрий Иванович Менделеев родился 8 февраля 1834 г. в г. Тобольске, был семнадцатилетним ребенком в семье директора Тобольской гимназии и одновременно преподавателя словесности Ивана Павловича Менделеева (1783–1847). После окончания гимназии в 1850 г. Д.И. Менделеев поступил в Главный педагогический институт в Петербурге, где химию преподавал профессор А.А. Воскресенский (1809–1880), известный русский химик, «дедушка русских химиков» [1]. Он оказал большое влияние на молодого Менделеева [2]. В 1855 г. Д.И. Менделеев закончил институт с золотой медалью и званием старшего учителя. После короткого пребывания на Юге России (Симферополь, Одесса) уже в апреле 1856 г. он успешно сдал все полагающиеся в то время магистерские экзамены на физико-математическом факультете Петербургского университета и в сентябре того же года защитил магистерскую диссертацию на тему «Удельные объемы». В январе 1857 г. молодой ученый был утвержден в звании приват-доцента Петербургского университета.

В апреле 1859 г. Д.И. Менделееву по его просьбе была предоставлена заграничная командировка, он выбрал Гейдельбергский университет в Германии, где в те годы работал Р. Бунзен (1811–1899), известный химик с очень широким кругом научных интересов. Он, в частности, с помощью спектрального анализа открыл два новых элемента: цезий и рубидий (1861). Однако Д.И. Менделеев проявил редкую самостоятельность – устроил в Гейдельберге собственную небольшую лабораторию, закупил необходимые приборы и реактивы, работал по своей программе. Преимущественно он изучал физико-химические свойства различных жидкостей [3].

В 1860 г. Д.И. Менделеев принял участие в работе первого Международного конгресса химиков, который проходил в г. Карлсруэ (Германия) 3-5 сентября. Инициатором созыва съезда был Ф.А. Кекуле (1829–1896), в то время профессор Гентского университета (Бельгия). Его научные интересы, в основном, лежали в области теоретической органической химии и синтеза органических соединений. Инициативу Кеку-



ле поддержало большое число химиков разных стран. В работе съезда приняли участие 127 ученых со всего мира. Из России, кроме Д.И. Менделеева, были А.П. Бородин, Н.Н. Зинин, Л.Н. Шишков. Как отмечается в очерках М.И. Усановича [4], активное участие в работе съезда приняли молодые химики: Ф. Бейльштейну и К. Винклеру было 22 года, А. Байеру и Й. Вислиценусу 25 лет, Д. Менделееву 26 лет, А. Бородину и Г. Роско по 27 лет, Л. Мейеру и Л. Шишкову – 30 лет, Ф. Кекуле 31 год.

Съезд продолжался 3 дня, центральным событием этого исторического собрания явился доклад С. Канницаро (1826–1910), итальянского химика, профессора университета в Палермо. Доклад был в третий день съезда. Впервые абсолютно четко были разграничены фундаментальные понятия: атома, молекулы, эквивалента. Его выступлению предшествовала опубликованная в 1858 г. статья «*Sunto di un corso di filosofia chimica*» (Очерк развития философии химии), в которой анализировалось развитие атомно-молекулярного учения от Дж. Дальтона и А. Авогадро до Ш. Жерара и О. Лорана. Основываясь на законе своего соотечественника Авогадро, Канницаро определил молекулу как наименьшее количество простого или сложного вещества, вступающего в реакцию, а атом как наименьшее количество элемента, входящего в состав молекулы. Он рассматривал атом как некую мельчайшую «элементную единицу». Приняв атомную массу водорода равной единице, ученый вычислил и обосновал правильные атомные веса многих элементов. Д.И. Менделеев впоследствии писал: «...Решающим моментом в развитии моей мысли о Периодическом законе я считаю 1860 г. – съезд химиков в Карлсруэ, в котором я участвовал, и на этом съезде идеи, высказанные итальянским химиком Канницаро». Съезд сыграл роль настоящего катализатора в поступательном ходе химической мысли [4].

В феврале 1861 г. Д.И. Менделеев вернулся в Россию и сразу же получил заказ на написа-

ние учебника «Органическая химия». Он очень быстро справился с этой работой, и книга была издана уже в конце того же года. В апреле 1862 г. Академия наук присудила Д.И. Менделееву за книгу свою высшую награду – Демидовскую премию.

Уже в 1863 г. вышло второе издание учебника. В январе 1864 г. Д.И. Менделеев был утвержден в должности штатного доцента Петербургского университета и профессора Технологического института. 31 января 1865 г. ученый защитил на заседании Совета физико-математического факультета университета докторскую диссертацию на тему «О соединении спирта с водой» [5]. В декабре 1865 г. он был утвержден в должности профессора Петербургского университета по кафедре технической химии, а в октябре 1867 года переведен на кафедру общей химии в той же должности.

В 1867–1868 годах Д.И. Менделеев активно участвует в создании Русского химического общества (с 1876 года – Русское физико-химическое общество).

17 февраля (1 марта) 1869 года считается днем открытия Периодического закона. В этот день утром Д.И. Менделеев сделал наброски первого сопоставления элементов различных групп по атомным весам и уже вечером отправил в типографию «Опыт системы элементов, основанный на их атомном весе и химическом сходстве». 6 марта на заседании Русского химического общества Н.А. Меншуткин от имени Д.И. Менделеева сделал сообщение об «Опыте системы элементов...». Предварительно отпечатанные в типографии листки с текстом сообщения были разосланы многим отечественным и зарубежным химикам.

Отдельные ученые до и после Менделеева пытались также систематизировать химические элементы. К ним, в частности, относятся немецкий химик Деберейнер (1780–1849), автор «закона триад», английский химик Ньюлендс (1837–1898), разбивший элементы на «октавы» (1865 г.), немецкий химик Мейер

(1830–1895), опубликовавший уже после Менделеева статью «Природа химических элементов как функция их атомных весов» (март 1870 г.). В первых двух работах при систематизации элементов авторы исходили из эквивалентных весов, что не могло привести к какому-либо успеху. В статье Мейера есть ссылка на работу Менделеева, немецкий ученый обсуждает сделанные Менделеевым исправления атомных весов некоторых элементов, вводит нумерацию элементов, приводит кривую зависимости атомных объемов от атомной массы (кривая Мейера). По существу Мейер не вносит в своей статье ничего нового по сравнению с публикацией Менделеева. Свой приоритет Мейер видит в более ранней работе (1864 г.), где он располагает 44 элемента по возрастанию атомных весов и выделяет шесть вертикальных групп. Однако ни о какой периодической зависимости речи не идет и никаких предсказаний не делается.

Вскоре после своего открытия Менделеев дает четкую и лаконичную его формулировку: «Свойства элементов, а потому и свойства образуемых ими простых и сложных тел стоят в периодической зависимости (т.е. правильно повторяются) от их атомного веса».

В 1870 г. Менделеевым была опубликована обширная статья «Естественная система элементов и применение ее к указанию свойств неоткрытых элементов». Автор уже не ограничивается оставлением пустых мест для неизвестных элементов, а, руководствуясь периодичностью элементов, указывает их свойства (экабор, экаалюминий, экасилиций).

В 1875 г. сбылось первое предсказание, когда французский химик Лекок де Буабодран открыл новый элемент, названный им галлием. Свойства его хорошо совпадали со свойствами экаалюминия. В 1879 г. Нильсон в Швеции открыл элемент, названный им скандием, свойства которого были близки к свойствам экабора. В 1886 г. немецкий химик Винклер открыл новый элемент — германий,

названный ранее Менделеевым экасилицием. Это был полный триумф Периодической системы, венец славы автора. Большинство академий наук всего мира избрали его в число своих членов, целый ряд университетов назвал ученого своим почетным доктором. Лондонское королевское общество в 1882 г. присудило золотые медали Дэви Менделееву и Мейеру «За открытие периодических соотношений атомных весов» [6]. Кроме того, Менделеев был удостоен чести выступить на очередном Фарадеевском чтении в Лондоне.

Открытие и изучение британскими учеными У. Рамзаем и Дж.У. Рэлеем в конце XIX века инертных газов дополнило Периодическую систему нулевой группой. Менделеев писал: «...Я считаю Рамзая утвердителем справедливости периодического закона, так как он открыл He, Ar, Kr, Xe, определил их атомные веса, и эти числа вполне подходят к требованиям Периодической системы элементов» [4]. В 1904 г. Рамзаю была присуждена нобелевская премия по химии «в знак признания открытия им в атмосфере различных инертных газов и определения их места в периодической системе». Рэлею в том же году присуждена нобелевская премия по физике «за исследование плотностей наиболее распространенных газов и за открытие аргона в ходе этих исследований». Открытие аргона способствовало открытию Рамзаем гелия и других благородных газов. Инертные газы логично вписались в Периодическую систему, составив нулевую группу.

В 1876 г. Д.И. Менделеев был избран членом-корреспондентом Императорской (Петербургской) академии наук. Существенной роли в дореволюционной Академии это звание не имело, никого ни к чему не обязывало. В то время химия в Академии наук была представлена двумя кафедрами: химия («чистая» химия) и технология и химия, приспособленные к искусствам и ремеслам (химическая технология). Их занимали выпускники Казанского университета, химики-органики А.М. Бутле-



ров (1828–1886), профессор Санкт-Петербургского университета, и Н.Н. Зинин (1812–1880), профессор Медико-хирургической (Военно-медицинской) академии в Санкт-Петербурге. После кончины Зинина открылась вакансия и ряд академиков во главе с А.М. Бутлеровым и известным математиком П.Л. Чебышевым представили в Академию наук записку с изложением заслуг Д.И. Менделеева и предложением избрать его на вакантное место [7]. Отмечалось, что «...ученые труды Менделеева приобрели в России и за границей столь огромную знаменитость – имя его пользуется таким общим уважением в науке, что русская химия может справедливо гордиться...». Записка заканчивалась следующими словами: «Проф. Менделеев первенствует в русской химии, и мы смеем думать, разделяя общее мнение русских химиков, что ему принадлежит по праву место в первенствующем ученом сословии Российской империи...».

Кандидатура Д.И. Менделеева вызвала упорное сопротивление со стороны неперменного секретаря Академии наук академика К.С. Веселовского, опирающегося на мнение большинства членов Академии. Его попытки уговорить президента Академии наук графа Ф.П. Литке (1797–1882, президент с 1864 г.) воспользоваться своим правом отменить выборы Менделеева ни к чему не привели. 11 ноября 1880 г. на очередном заседании физико-математического отделения при голосовании за избрание Д.И. Менделеева действительным членом Академии наук было подано 9 голосов, против – 10.

Как отмечается в работе [7] возмущению, поднявшемуся в среде ученых и во всем образованном русском обществе не было пределов. Хотя баллотировка была закрытой, назывались в печати фамилии голосовавших против избрания Менделеева. Газеты старались объяснить произошедшее «... засильем в Академии немцев». Президент Академии наук в связи с

очень преклонным возрастом не мог правильно оценить ситуацию В работе [7] приводится такая характерная позиция прессы: «История многих академических выборов с очевидностью показала, что в среде этого учреждения голос людей науки подавляется противодействием темных сил, которые ревниво затворяют двери Академии перед русскими талантами». Каких-либо комментариев результатов выборов со стороны руководства Академии не было.

В 1881 г. на оставшееся вакантным место академика в области химической технологии был представлен профессор Технологического института Ф.Ф. Бейльштейн (1838–1906). Он происходит из обрусевших немцев, родился в Петербурге, учился в Германии, окончил Геттингенский университет, стажировался в ряде других немецких университетов, вернулся в Россию и с 1867 г. профессор Технологического института. По своему научному уровню он вполне соответствовал званию действительного члена Академии наук, но, конечно, его заслуги не сопоставимы с заслугами Менделеева. Среди зарубежных историков химии распространено мнение, что Россия дала мировой науке три великих химика: М.В. Ломоносова в XVIII веке, Д.И. Менделеева в XIX и В.Н. Ипатьева в XX веке.

Бутлеров не согласился с представленной кандидатурой, считая более достойным профессора Харьковского университета Н.Н. Бекетова (1827–1911). На заседании физико-математического отделения 19 января 1882 г. Бейльштейн был избран, но после вторичного протеста Бутлерова забаллотирован на Общем собрании Академии наук 5 марта 1882 г.

В 1886 г. скончался А.М. Бутлеров (1828–1886) и Академия наук назначила новые выборы уже на две вакансии, были избраны Бейльштейн и Бекетов. Научные заслуги Н.Н. Бекетова рассмотрены в очерке [8]. Судя по приводимым в работе [7] документальным сведениям, о кандидатуре Д.И. Менделеева

речи не шло. В патриархальную среду Академии наук семидесятых годов XIX в. не вписывались мировая известность Менделеева, его демократические убеждения, резкие высказывания.

В 1889 г. президентом Академии наук стал великий князь К.К. Романов [9]. Среди многих задач, которые ему пришлось решать, было и «обрусение» Академии наук. Известно, что он предлагал Д.И. Менделееву баллотироваться в Академию наук, для этого могла быть получена дополнительная вакансия [10]. Будучи членом почти всех иностранных академий, Менделеев отклонил это предложение.

В 1889 г. у Менделеева вышло из печати пятое издание «Основ химии» с существенными дополнениями автора. С этого издания были сделаны переводы на английский, французский и немецкий языки.

В 1890 году Д.И. Менделеев прекратил педагогическую деятельность в Университете. Непосредственным поводом для этого был конфликт с министром народного просвещения графом И.Д. Деляновым. Еще раньше Д.И. Менделеев прекратил преподавание в других учебных заведениях. В 1890–1895 годах Менделеев – консультант Научно-технической лаборатории Морского министерства, где занимался разработкой технологии производства бездымного пороха.

В 1891–1892 гг. он принял активное участие в составлении Энциклопедического словаря по заказу издателей Ф.А. Брокгауза и И.А. Ефрона и продолжал этим заниматься в последующие годы. В 1893 году ученый был назначен Управляющим Главной палатой мер и весов – метрологического центра России.

В 1895 году выходит из печати 6-е издание «Основ химии», а в 1902-м – 7-е издание. В оба издания автор внес дополнения в интересующие его разделы. В эти же годы Д.И. Менделеев уделяет большое внимание экономическим проблемам России, он неоднократно встречался с С.Ю. Витте и, особенно, с В.И. Кова-

левским, готовил по их просьбам соответствующие записки. Еще в июле 1899 года Д.И. Менделеев с группой помощников совершил поездку на Урал, ознакомился с состоянием промышленных предприятий. В целом ряде публикаций суммируются идеи ученого, связанные с его общественно-политической, научной и экономической деятельностью.

При жизни ученого «Основы химии» переиздавались восемь раз, почти всегда с дополнениями автора, неоднократно переиздавались они и после его кончины, переводились за границу. На изучении «Основ химии» Д.И. Менделеева выросло не одно поколение русских и зарубежных химиков.

Сам ученый писал: «Основы химии» – любимое дитя мое. В них мой образ, мой опыт педагога, мои задушевные мысли» [2].

Имел ли шансы Менделеев получить за открытие Периодического закона нобелевскую премию, которые начали присуждать в 1901 г. [11]? Как известно, право выдвигать кандидатуры на присуждение нобелевской премии предоставляется отдельным ученым по приглашению Нобелевского комитета, а также лауреатам Нобелевской премии в соответствующей области науки, членам Шведской Королевской академии. Посмотрим кому присуждались премии в 1901–1906 гг. (Д.И. Менделеев скончался 2.02.1907 г., посмертно премии не присуждаются). В 1901 г. премию получил нидерландский химик Я. Вант-Гофф «в знак признания огромной важности открытия им законов химической динамики и осмотического давления в растворах» [11]. Это был один из основателей физической химии как научной дисциплины, его рекомендовали 12 ученых (номинаторов). В 1902 г. лауреатом стал немецкий ученый Э. Фишер за «особые заслуги в синтезе глюкозидов». Он был 4 раза номинирован в 1901 г., 5 раз в 1902 г. В 1903 г. лауреатом стал шведский ученый О. Аррениус «ввиду важного значения его теории электролитической диссоциации для развития хи-



мии». Он был номинирован по химии 4 раза в 1901 г., 5 раз в 1902 и 12 раз в 1903 гг. В эти же годы он номинировался и по физике. Как уже упоминалось, в 1904 г. премия была присуждена У. Рамзаю из Великобритании за открытие им в атмосфере различных инертных газов. Он был номинирован 3 раза в 1902 г., 4 раза в 1903 г. и 23 раза в 1904 г. В 1905 г. лауреатом стал немецкий химик А. Байер за заслуги в развитии органической химии и химической промышленности. Он был номинирован в 1905 г. 10 раз, неоднократно номинировался и в предыдущие годы. В 1906 г. Нобелевская премия была присуждена французскому ученому А. Муассану за большой объем проведенных им исследований, получение фтора, за конструкцию промышленной электродуговой печи [12]. Он был номинирован в 1903 г. 3 раза, в 1904 г. 6 раз, в 1905 г. 21 раз, в 1906 г. 8 раз. Все упомянутые выше лауреаты были широко известными учеными, имели поддержку со стороны ученых как своей страны, так и других стран (в 1901–1906 гг. общее число номинаторов по химии в год колебалось в широких пределах: от 18 до 40). Все данные о числе номинаций взяты из справочного руководства [13], в котором они заимствованы из монографии [14].

Вернемся к Д.И. Менделееву. Он был впервые номинирован в 1905 г. 3 раза и затем в 1906 г. 4 раза. Все номинаторы были иностранными учеными, среди них оба года был председатель Нобелевского комитета по химии Отто Петтерссон, который высоко ценил открытие Д.И. Менделеева. В 1906 г. Нобелевский комитет по химии проголосовал за присуждение премии Д.И. Менделееву (4 голоса «за», 1 – «против») «в знак признания его заслуг в деле развития науки благодаря открытию Периодической системы элементов». Альтернативной была кандидатура А. Муассана. Королевская академия наук Швеции присудила премию А. Муассану. Главная причина этого заключается в том, что согласно завещанию

А. Нобеля премия должна присуждаться за работы, выполненные в предшествующем году. Хотя выполнять это условие оказалось практически невозможным, в первые 2–3 десятилетия новизна открытия играла большую роль. Несмотря на всеми признаваемое величие открытия Д.И. Менделеева, оно условию новизны не удовлетворяло. Это очень подробно рассмотрено в монографии А. Блоха [15], более кратко – в предисловии к книге [6].

Среди российских химиков было крайне мало тех, кто приглашался Нобелевским комитетом по химии к участию в номинировании. За рассматриваемые шесть лет из 165 номинаций на долю российских химиков приходится 3, номинировали они иностранных ученых. Тем не менее есть достаточные основания полагать, что если бы Менделеев прожил хотя бы еще два года, он премию бы получил, его кандидатура была «в ближнем резерве» у Нобелевского комитета по химии. Следует, однако, иметь в виду, что в те годы присуждению премии не придавалось слишком уж большого значения.

Д.И. Менделеев так оценивал результаты своей деятельности: «Всего более четыре предмета составили мое имя: периодический закон, исследование упругости паров, понимание растворов как ассоциации и «Основы химии» [2, 5].

Прошло 150 лет со времени открытия Периодического закона. Объяснение причин его началось в 1913 г., когда английский физик Г. Мозли (1887–1915), изучая рентгеновские спектры элементов, показал, что порядковые номера элементов численно равны заряду ядер их атомов. Другой английский физик Д. Чедвик (1891–1974), ученик Э. Резерфорда, экспериментально подтвердил это. В связи с такими открытиями формулировка Периодического закона изменилась: «Свойства простых веществ, а также свойства соединений элементов находятся в периодической зависимости от заряда ядер атомов элементов». При-

чина периодичности, как показал Н. Бор (1885–1962), заключается в периодическом повторении строения внешних электронных

уровней атома. Выдвинутая Д.И. Менделеевым идея химической периодичности получила физическое обоснование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Морачевский А.Г.** Профессор Александр Абрамович Воскресенский (к 200-летию со дня рождения) // Ж. прикл. химии. 2009. Т. 82. № 11. С. 1929–1931.
- [2] **Морачевский А.Г.** Дмитрий Иванович Менделеев и его научные связи с профессорами Политехнического института // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2014. № 1(190). С. 19–25.
- [3] Летопись жизни и деятельности Д.И. Менделеева / Р.Е. Добротин, Я.Г. Карпило, Л.С. Керова, Д.Н. Трифонов / отв. ред. А.В. Сторонкин. Л.: Наука, 1984. 531 с.
- [4] **Усанович М.И.** Из истории химии. Очерки из жизни и деятельности выдающихся ученых. Алматы: Казахский университет, 2004. 328 с.
- [5] **Макареня А.А.** Д.И. Менделеев и физико-химические науки. Опыт научной биографии Д.И. Менделеева. М.: Атомиздат, 1972. 256 с.
- [6] Менделеев Дмитрий Иванович. Периодический закон. М.: Изд-во АСТ, 2018. 368 с. Предисловие А.И. Курамшина.
- [7] **Князев Г.А.** Д.И. Менделеев и Императорская академия // Вестник АН СССР. 1931. № 3. С. 27–34.
- [8] **Морачевский А.Г.** Академик Николай Николаевич Бекетов (К столетию со дня смерти) // Ж. прикл. химии. 2011. Т. 84. № 12. С. 2071–2075.
- [9] **Морачевский А.Г.** Президент Академии наук Константин Константинович Романов (к 160-летию со дня рождения) // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 2. С. 199–206.
- [10] **Басаргина Е.Ю.** Вице-президент Императорской Академии наук Н.В. Никитин. Из истории русской науки (1867–1916). СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. ин-та истории РАН «Нестор-История», 2004. 468 с.
- [11] **Морачевский А.Г.** К столетию присуждения первой Нобелевской премии по химии. 1901–2001 гг. // Ж. прикл. химии. 2011. Т. 74. № 7. С. 1205–1210.
- [12] **Морачевский А.Г.** Анри Муассан (к 150-летию со дня рождения) // Ж. прикл. химии. 2002. Т. 75, № 10. С. 1754–1757.
- [13] **Зеленин К.Н., Ноздрачев А.Д., Поляков Е.Л.** Нобелевские премии по химии за 100 лет. СПб.: Гуманистика, 2003. 873 с.
- [14] **Crawford E.** The Nobel Population 1901–1950. A Census of the Nominators and Nominees for the Prizes in Physics and Chemistry. Tokyo, 2002
- [15] **Блох М.А.** Советский Союз в интерьере Нобелевских премий. Факты. Документы. Различные комментарии / под ред. проф. А.И. Моруа. СПб.: Гуманистика, 2001. 608 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МОРАЧЕВСКИЙ Андрей Георгиевич – доктор технических наук главный научный сотрудник Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: morachevski@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 18.12.2019

REFERENCES

- [1] **A.G. Morachevskiy**, Professor Aleksandr Abramovich Voskresenskiy (k 200-letiyu so dnya rozhdeniya), Zh. prikl. Khimii, 82 (11) (2009) 1929–1931.
- [2] **A.G. Morachevskiy**, Dmitriy Ivanovich Mendeleev i yego nauchnyye svyazi s professorami Politekhnicheskogo institute, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 1 (190) (2014) 19–25.
- [3] Letopis zhizni i deyatelnosti D.I. Mendeleeyeva / R.Ye. Dobrotin, Ya.G. Karpilo, L.S. Kerova, D.N. Trifonov. Otv. red. A.V. Storonkin. L.: Nauka, 1984.



- [4] **M.I. Usanovich**, Iz istorii khimii. Ocherki iz zhizni i deyatelnosti vydayushchikhsya uchenykh. Almaty: Kazakhskiy universitet, 2004.
- [5] **A.A. Makarenya**, D.I. Mendeleev i fiziko-khimicheskiye nauki. Opyt nauchnoy biografii D.I. Mendeleeva. M.: Atomizdat, 1972.
- [6] Mendeleev Dmitriy Ivanovich. Periodicheskiy zakon. Moskva: Izd-vo ACT, 2018. 368 s. Predisloviye A.I. Kuramshina.
- [7] **G.A. Knyazev**, D.I. Mendeleev i Imperatorskaya akademiya, Vestnik AN SSSR. 1931 3 27–34.
- [8] **A.G. Morachevskiy**, Akademik Nikolay Nikolayevich Beketov (K stoletiyu so dnya smerti), Zh. prikl. Khimii, 84 (12) (2011) 2071–2075.
- [9] **A.G. Morachevskiy**, Prezident Akademii nauk Konstantin Konstantinovich Romanov (k 160 -letiyu so dnya rozhdeniya), St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 24 (2) (2018) 199–206.
- [10] **Ye.Yu. Basargina**, Vitse-prezident Imperatorskoy Akademii nauk N.V. Nikitin. Iz istorii russkoy nauki (1867–1916). SPb.: Izd-vo Sankt -Peterb. in-ta istorii RAN «Nestor-Istoriya», 2004.
- [11] **A.G. Morachevskiy**, K stoletiyu prisuzhdeniya pervoy Nobelevskoy premii po khimii. 1901–2001 gg., Zh. prikl. khimii, 74 (4) (2011) 1205–1210.
- [12] **A.G. Morachevskiy**, Anri Muassan (k 150-letiyu so dnya rozhdeniya), Zh. prikl. Khimii, 75 (10) (2002) 1754–1757.
- [13] **K.N. Zelenin**, **A.D. Nozdrachev**, **Ye.L. Polyakov**, Nobelevskiy premii po khimii za 100 let. SPb.: Gumanistika, 2003.
- [14] **E. Crawford**, The Nobel Population 1901–1950. A Census of the Nominators and Nominees for the Prizes in Physics and Chemistry. Tokyo, 2002
- [15] **M.A. Blokh**, Sovetskiy Soyuz v interyere Nobelevskikh premiy. Fakty. Dokumenty. Razlichnyye kommentarii / Pod red. prof. A.I. Morua. SPb.: Gumanistika, 2001.

THE AUTHORS

MORACHEVSKIY Andrei G. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: morachevski@mail.ru

Received 18.12.2019

DOI: 10.18721/JEST.26108
УДК 627.8

Т.П. Шестакова

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

ИНЖЕНЕР АЛЕКСЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ ЛАВРОВ

В статье рассказывается о выпускнике Ленинградского политехнического института 1926 года Алексее Васильевиче Лаврове, инженере-гидротехнике. Лавров занимался проектированием гидроэлектростанций и гидротехнических сооружений и проводил изыскания на реках Северного Кавказа, готовил план его электрификации, работал в Кавказской комплексной экспедиции Совета по изучению производительных сил АН СССР. Его не обошли стороной политические репрессии 1930-х годов.

Ключевые слова: А.В. Лавров, политехнический институт, гидротехника, гидроэлектростанции, электрификация Северного Кавказа.

Ссылка при цитировании:

Шестакова Т.П. Инженер Алексей Васильевич Лавров // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2020. Т. 26, № 1. С. 84–90. DOI: 10.18721/JEST.26108

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

T.P. Shestakova

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

ENGINEER ALEXEY VASILIEVICH LAVROV

The article is devoted to Alexey V. Lavrov, a graduate of the Leningrad Polytechnic Institute of 1926, a hydraulic engineer. Lavrov designed hydroelectric power stations and hydrotechnical constructions and conducted explorations on rivers of the North Caucasus, prepared a plan of its electrification, he went on the Caucasian complex expedition of the Council of the Academy of Sciences of the USSR for study of productive forces. He could not have escaped the political repressions of the 1930s.

Keywords: A. V. Lavrov, Polytechnic Institute, hydraulic engineering, hydroelectric power stations, electrification of the North Caucasus.

Citation:

T.P. Shestakova, Engineer Alexey Vasilievich Lavrov, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 26 (01) (2020) 84–90. DOI: 10.18721/JEST.26108

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Алексей Васильевич Лавров родился 24 сентября 1899 года в селе Феодоритском Мологского уезда Ярославской губернии. Село Феодоритское находилось близ впадения реки Мологи в Волгу и было затоплено при сооружении Рыбинской ГЭС и Рыбинского водохранилища. Ныне этого села не существует.

Отец Алексея был священником. Впоследствии ему пришлось это скрывать,

опасаясь политических репрессий, которые не обошли его стороной, и в своей автобиографии он писал, что родился в семье учителей.

До революции Алексей учился в Рыбинской гимназии. В 1919 году окончил школу II ступени, – так в то время называлась средняя общеобразовательная школа с 6-го по 9-й класс.



Алексей Васильевич Лавров
Alexey V. Lavrov



А. В. Лавров. 1920-е годы
A.V. Lavrov in 1920s

В 1920 году поступил в Ленинградский политехнический институт на электромеханический факультет, который окончил в 1926 году. Получил квалификацию инженера-электрика, однако вся его дальнейшая работа была связана с проектированием и эксплуатацией гидротехнических сооружений. Начало этой работе положил дипломный проект на тему «Гидроэлектрическая установка на реке Баксан мощностью 25000 кВт». Руководителем дипломного проекта был доктор технических наук профессор Александр Александрович Морозов, заведующий кафедрой «Утилизация водных сил» (впоследствии – «Использование водной энергии») и основатель школы инженеров-гидроэнергетиков.

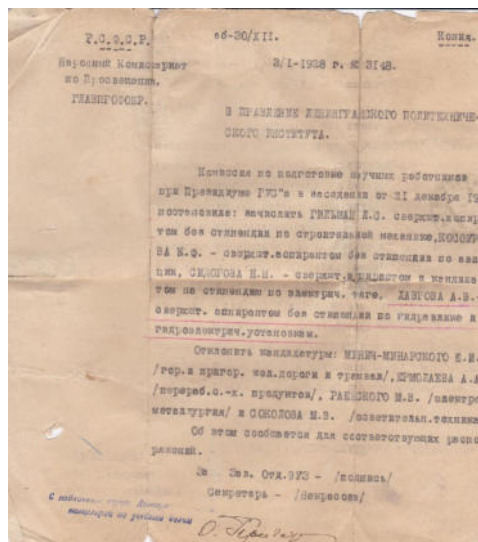
Баксанская ГЭС была построена по плану ГОЭЛРО, в составлении которого принимал участие А. А. Морозов. Это гидроэлектростанция деривационного типа, такие станции строятся на горных реках, имеющих большой уклон. Она представляет собой достаточно сложное гидросооружение, включающее, помимо плотины, систему деривационных каналов, тоннелей и акведуков. Ее постройка была закончена в 1936 году, и она явилась одной из первых мощных ГЭС на Северном Кавказе.

После небольшого периода работы в Ленинграде, для получения опыта практической рабо-

ты в области проектирования гидростанций и гидросооружений в 1927 году Алексей Васильевич Лавров поступил на работу в Акционерное общество по электрификации Северного Кавказа «Электрострой» в г. Ростове-на-Дону, а после ликвидации «Электростроя» был переведен в проектно-изыскательский отдел Северо-Кавказского краевого электростроительного треста «Севкавэнергострой» в г. Ростове-на-Дону. Трест занимался проектированием гидростанций и гидротехнических сооружений и проводил работы на реках Северного Кавказа.

В то же время А.В. Лавров был утвержден сверхштатным аспирантом Ленинградского политехнического института по гидравлике и гидроэлектрическим установкам, о чем сохранилось письмо из института, адресованное в «Севкавэнергострой» Лаврову.

Вследствие реорганизации «Севкавэнергостроя» был переведен на работу в трест «Севкавэнергострой». Будучи инженером этого треста, в 1928 году А. В. Лавров был дважды командирован в качестве начальника изыскательской партии в район рек Кубань и Большой Зеленчук, а затем – в район рек Шахэ и Мзымта для организации и производства изыскательских работ, поведя в полевых исследованиях около трех месяцев.



Письмо, уведомляющее о зачислении А. В. Лаврова сверхштатным аспирантом ЛПИ
 The copy of the notification that A. V. Lavrov was enrolled as a supernumerary graduate student
 of the Leningrad Polytechnic Institute

При последующих реорганизациях работал в Севкавэнергоуправлении старшим инженером, начальником гидротехнического отделения, затем – в Северо-Кавказском отделении треста «Гидроэлектрострой» заведовал проектно-изыскательским сектором.

Начальство отмечало умелое руководство проектно-изыскательскими работами и упорную деятельность А.В. Лаврова по изысканию и организации новых энергетических источников Северного Кавказа. В 1932 году он был назначен заместителем управляющего и главным инженером Северо-Кавказского отделения Государственного треста по проектированию гидроэлектрических станций «Гидроэлектропроект».

Алексей Васильевич совмещал работу инженера с преподавательской деятельностью. В сентябре 1929 года был зачислен старшим ассистентом Донского политехнического института по кафедре утилизации водной энергии. В связи с реорганизацией института в 1930 году назначен доцентом Северо-Кавказского института водного хозяйства и мелиорации по той же кафедре. В феврале 1933 года на базе института был создан Новочеркасский инже-

нерно-мелиоративный институт. Некоторое время Лавров заведовал кафедрой гидроэлектрических станций.

Сохранилась фотография выпуска Новочеркасского инженерно-мелиоративного института 1934 года. Среди преподавателей – руководитель дипломного проектирования доцент А. В. Лавров.

В этот период времени Лавровым были написаны и опубликованы отдельными изданиями и в специальных журналах следующие работы:

«Терско-Ардонская гидроэнергетическая проблема», Ростов-на-Дону, книгоиздательство «Северный Кавказ», 1932 г.;

«Использование реки Терек для получения электрической энергии», Ростов-на-Дону, Азово-Черноморское краевое книгоиздательство, 1934 г.;

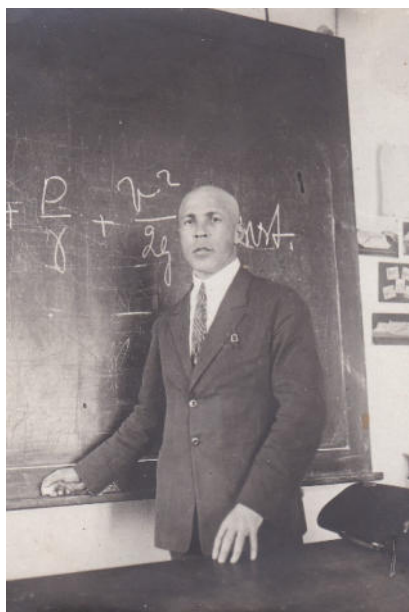
«Гидравлические турбины высокой быстротходности»;

«Гидроэнергетические ресурсы реки Белой»;

«Схема использования верхнего течения Кубани»
 и другие работы.



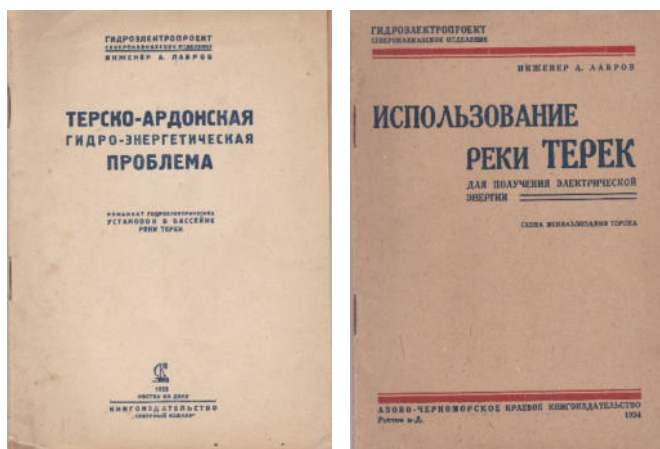
Изыскательная партия «Гидроэлектропроекта» в районе г. Баталпашинска (ныне г. Черкесск, столица Карачаево-Черкесской Республики). Начало 1930-х годов
 Surveying party of the «Hydroelectroproject» company near the town of Batalpashinsk (now Cherkessk, the capital of the Karachay-Cherkess Republic) in the beginning of 1930s



А.В. Лавров читает лекцию в Донском политехническом институте
 A.V. Lavrov giving a lecture in the Don Polytechnic Institute



Выпуск инженеров-гидротехников Новочеркасского инженерно-мелиоративного института. 1934 год
 Hydraulic engineers, graduates from the Novocherkassk Meliorative Engineering Institute of 1934



Работы А. В. Лаврова «Терско-Ардонская гидроэнергетическая проблема» и «Использование реки Терек для получения электрической энергии»

The books of A.V. Lavrov «The Terek-Ardon hydroelectric problem» and «Using the Terek river to generate electric power»

В 1938 году А. В. Лавров был переведен в Московское отделение треста «Гидроэлектропроект», но вскоре был необоснованно репрессирован по политическим мотивам. 28 апреля 1938 года он был арестован по обвинению в том, что якобы являлся участником контрреволюционной организации, т. е. в совершении преступлений, предусмотренных печально знаменитой 58-й статьей Уголовного кодекса РСФСР. Находясь в тяжелейших условиях тюремного заключения под действием репрессивной машины тех лет, которая выбивала признательные показания путем применения к обвиняемому «мер физического воздействия», Алексей Васильевич, тем не менее, себя не оговаривал и признательных показаний не подписал. 10 февраля 1940 года уголовное дело в отношении него было прекращено за недостаточностью улик. Лавров был отпущен из-под ареста без судимости. Однако почти два года тюрьмы отложили отпечаток на всю жизнь. Была потеряна работа, которую Алексей Васильевич считал делом своей жизни. «Я беззаветно любил свою работу,» — говорил он впоследствии.

Некоторое время Лавров оставался без работы. Однако в 1941 году он поступил в Энер-

гетический институт имени Г. М. Кржижановского Академии наук СССР старшим научным сотрудником. С 1 февраля 1941 года по 15 мая 1942 г. работал в составе Энергетического отряда Кавказской комплексной экспедиции совета по изучению производительных сил АН СССР. Задачей экспедиции было исследование бассейна реки Терек с целью энергетического использования. Перед самым началом войны Лавров командирован в г. Нальчик для участия в полевых экспедиционных исследованиях в бассейнах рек Терека, Кубани и Кодори с их притоками. Его командировка длилась с 3 июня по 1 октября 1941 года.

В 1942 году Лавров вновь командирован в районы рек Баксана и Терека с целью выяснения возможности строительства гидроэлектрических установок. Сохранилось удостоверение, выданное Советом Народных Комиссаров Кабардино-Балкарской АССР 19 марта 1942 года с просьбой ко всем райисполкомам и сельсоветам «оказывать товарищу Лаврову содействие в выполнении возложенной на него работы».

18 мая того же года в Энергетический Институт АН СССР поступило обращение от Государственной Плановой Комиссии при

Совнаркоме Кабардино-Балкарской АССР, в котором говорилось:

«Ввиду тяжелого положения с электроснабжением районов КБАССР зимою, просим продолжить энергетические работы по выяснению возможности усиления зимней мощности Баксан ГЭС, а также по намечению новых гидростанций...»

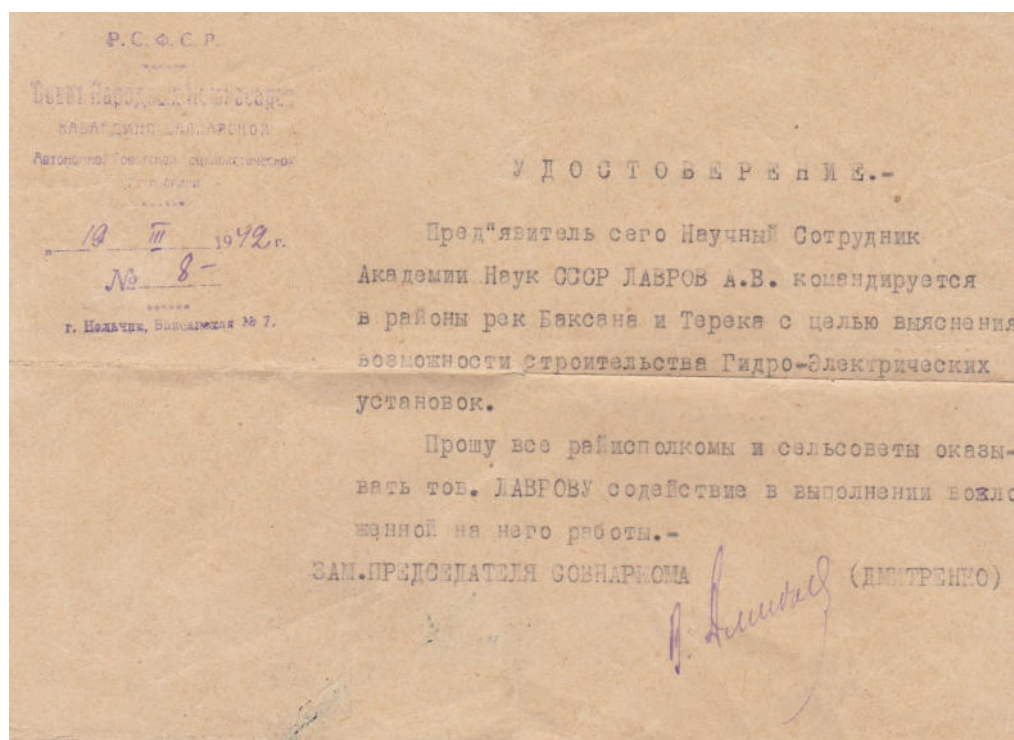
Считаем необходимым отметить плодотворность работ Энергетического отряда Вашей экспедиции (инженеры Клопов и Лавров) в отношении проявленной им инициативы в вопросе пропуска шуги и донного льда через турбины Баксан ГЭС, что дало хорошие результаты и огромный экономический эффект.»

24 июля 1942 года инженер Лавров пишет заявление Военному комиссару Баксанского района: *«Настоящим прошу разрешить выезд в пределах КБ АССР до 20-го августа 1942 г.»*. На заявлении резолюция: *«Разрешается выезд...»*. Однако продолжать изыскания было невозможно. Немецкие войска вплотную подошли к станции. В ночь на 30 августа Баксанская ГЭС

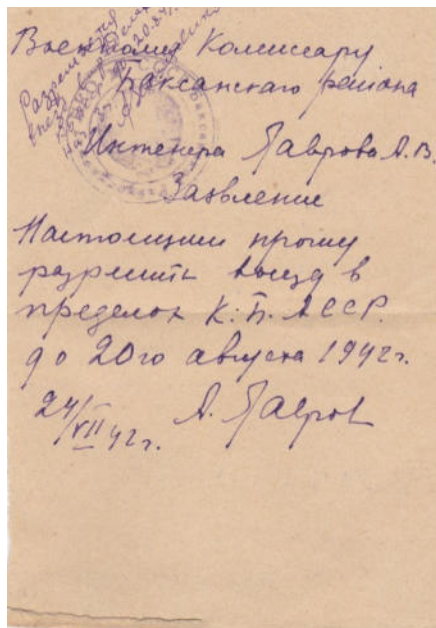
была подорвана советскими войсками, чтобы исключить возможность эксплуатации станции врагом. Позднее, уже в январе 1943 года гидростанция была взорвана повторно отступающими частями немецких войск.

Осенью 1942 года в результате наступления немцев Лавров оказался на оккупированной территории. В 1938 году – арест по политическим мотивам, и вот теперь – война прервала его работу по электрификации Северного Кавказа. На этот раз продолжить свою работу он не смог.

Ему удалось добраться до Ростова-на-Дону, где оставались жена и дочь. После освобождения Ростова от немецких захватчиков в феврале 1943 года Алексей Васильевич стал преподавать в Ростовском речном политехникуме, находившемся в ведении Центрального военно-восстановительного управления Наркомата речного флота, читал курсы «Гидрология», «Гидрометрия», «Выправление рек», «Шлюзование рек».



Удостоверение А. В. Лаврова, выданное 19 марта 1942 года
The credentials of A.V. Lavrov dated 19 March 1942



Заявление Военному комиссару Баксанского района от инженера Лаврова А.В. 24 июля 1942 года

The application of Engineer Lavrov addressed to the Military Commissar of the Baksan district dated 24 July 1942

В 1945 году перешел в Ростовское отделение «Сельхозстройпроекта», а затем в Ростовскую контору «Сельэлектро», где занимался проектированием гидротехнических сооружений и малых гидроэлектрических станций. С 1950 года работал в Государственном институ-

те по проектированию гидротехнических, рыбоводно-мелиоративных и прудовых сооружений «Гидрорыбпроект», где занимал должности главного гидротехника и главного инженера, руководил проектированием насосных станций большой производительности, предназначенных для наполнения водоемов с площадью в несколько тысяч гектаров.

В 1954–1958 годах по совместительству руководил дипломным проектированием по гидроэлектрическим станциям и гидротехническим сооружениям Новочеркасского инженерно-мелиоративного института.

С 1958 года А.В. Лавров работал в Государственном институте проектирования водного хозяйства южных районов РСФСР («Южгипроводхоз») в должности главного специалиста. В этом институте он продолжал работать до последних лет жизни, консультировал молодых инженеров. Сохранилось удостоверение главного специалиста института «Южгипроводхоз», срок действия которого продлен до 31 декабря 1976 года. 13 декабря 1977 года Алексей Васильевич Лавров умер.

Примечание. При подготовке статьи были использованы документы и материалы из семейного архива.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШЕСТАКОВА Татьяна Павловна — кандидат физико-математических наук доцент Южного федерального университета
E-mail: shestakova@sfedu.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 21.01.2020

THE AUTHORS

SHESTAKOVA Tatyana P. — Southern Federal University
E-mail: shestakova@sfedu.ru

Received: 21.01.2020

Научное издание

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбПУ.
ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ НАУКИ**

Том 26, № 1, 2020

Учредитель – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охраны культурного наследия
(свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-69285 от 06.04.2017 г.)

Технический секретарь – *О.А. Матенев*

Компьютерная верстка *Е.А. Корнуковой*

Телефон редакции (812) 294-22-86

E-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

Подписано в печать 27.03.2020.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ
в журнале «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием:

зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (Свидетельство о регистрации СМИ от 06.04.2017 ПИ № ФС 77-69285) и распространяется по подписке через объединенный каталог «Пресса России» (индекс 18390);

имеет международный стандартный номер сериального периодического издания (ISSN 2542-1239);

внесен Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки РФ в Перечень периодических научных и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора наук и кандидата наук;

с 2009 г. входит в национальную информационно-аналитическую систему «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)»;

сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНТИ РАН и включены в фонд научно-технической литературы (НТЛ) ВИНТИ РАН, в международную библиографическую и реферативную базу данных ProQuest, международную наукометрическую базу Index Copernicus, Google Scholar, международную систему по периодическим изданиям «Ulrich's Periodicals Directory», представлены на платформе Web of Science в виде отдельной базы данных Russian Science Citation Index (RSCI), EBSCO, CNKI.

Журнал публикует результаты работ в следующих областях науки и техники: энергетика, электротехника, материаловедение, металлургия.

Редакция журнала соблюдает права интеллектуальной собственности и со всеми авторами научных статей заключает издательский лицензионный договор.

Публикация материалов, в том числе соискателей ученых степеней, осуществляется бесплатно.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Представление материалов

В статье должны быть кратко изложены новые и оригинальные результаты исследований, полученные авторами; следует избегать повторов, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

При написании оригинальной научной статьи и оформлении рукописи авторы должны придерживаться следующих правил.

Статья должна представлять собой описание выполненных исследований с указанием их места в соответствующей области наук и обсуждением значения выполненной работы. Рукопись должна содержать достаточное количество информации и ссылок на общедоступные источники для того, чтобы работа могла быть повторена независимо от авторов.

Название статьи должно быть кратким, но информативным. Обращаем внимание на то, что журнал издается как на русском, так и на английском языке. В связи с этим не следует использовать аббревиатуры в названии статьи.

Аннотация должна давать читателю сжатую информацию о содержании статьи, быть информативной и отражать не только основные цели статьи, но и главные результаты и выводы работы. Аннотация не является частью текста и сама по себе должна быть законченным описанием.

Ключевые слова должны отражать основную проблематику статьи; они приводятся на русском языке для русской и на английском для англоязычной версии статьи. Количество ключевых слов – не менее трех и не более семи.

Адрес для корреспонденции должен содержать фамилию автора для корреспонденции (не обязательно первого автора), его полный почтовый адрес, телефон, факс, e-mail.

При необходимости Редакция может потребовать представления Акта экспертизы.

Представление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ по адресу: <http://journals.spbstu.ru>

Статьи подаются в формате .docx (MS Word 2007–2010). Файл статьи, подаваемый через электронную редакцию, должен содержать только сам текст, без названия, списка литературы, фамилий и данных авторов. Список литературы, название статьи, вся информация об авторах задаются при подаче через электронную редакцию в отдельных полях. В тексте статьи должны быть ссылки на все источники из списка литературы. Порядковый номер источника в тексте статьи указывается в квадратных скобках.

2.2. Оформление материалов

2.2.1. Объем статей, как правило, 15–20 страниц формата А-4. Количество рисунков и фотографий (в том числе цветных) не должно превышать 4, таблиц – 3.

2.2.2. Число авторов – не более трех от одной организации и не более пяти от разных организаций. Статья должна быть подписана всеми авторами. Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

2.2.3. Статья должна содержать следующие разделы:

номер УДК в соответствии с классификатором;

фамилии авторов на русском и английском языках;

название на русском и английском языках;

аннотации – не менее 100 слов на русском и английском языках;

ключевые слова – не менее 3 и не более 7 на русском и английском языках;

введение (актуальность, краткое обоснование существующей проблемы) – 1,0–1,5 стр.;

цель работы (краткая четкая формулировка поставленной задачи);

методика проведения исследований и расчетов, включая краткую информацию об использованных приборах, методах и точности экспериментальных измерений и теоретических расчетов и т. д.