Tom 27, Nº1, 2021	
	Материаловедение. Энергетика
Санкт-Петербург	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

#### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА

## **MATERIALS SCIENCE. POWER ENGINEERING**

(ранее "Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки")

#### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

Александров М.Л., член-корр. РАН Згуровский М.З., ин. член РАН, академик НАН Украины

Клименко А.В., академик РАН Костюк В.В., академик РАН Лагарьков А.Н., академик РАН Окрепилов В.В., академик РАН Рудской А.И., академик РАН Саркисов А.А., академик РАН Федоров М.П., 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

Башкарёв А.Я., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

- Боровков А.И., к.т.н., проректор по цифровой трансформации
- Гордеев С.К., д-р техн. наук, ст. научн. сотр. ЦНИИМ
- Забоин 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)

Петриченко М.Р., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

- Райчик Ярослав, д-р техн. наук, профессор Ченстоховского политехнического университета (Польша)
- Рамасуббу С., PhD, Директор по исследованиям BISS, ITW-India (Р) Ltd (Индия)
- Сергееев В.В., д-р техн. наук, профессор, проректор СПбПУ чл-корр РАН, проректор по научно работе СПбПУ
- Тендлер М.Б., ин. член РАН, КТН Royal Institute of Technology (Швения)
- 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

#### **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
- Aleksandrov M.L. corresponding 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 Rudskoy A.I. - full member of the Russian Academy of Sciences Sarkisov A.A. - full member of the Russian Academy of Sciences Fedorov M.P. - full member of the Russian Academy of Sciences

#### **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, Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU
- Aksenov L.B. Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU
- Bashkarev A. Ya. Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU
- Borovkov A.I. PhD in Technical Sciences, Vice Rector for Digital Transformation
- Gordeev S.K. Doctor of Technical Sciences, prof. CNIIM
- Zaboin B.N. Doctor of Technical Sciences, 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. Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU
- Korovkin N.V. Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU
- Mityakov A.V. Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU
- Michailov V.G. Doctor of Technical Sciences, prof. BTU (Germania)
- Petritchenko M.R. Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU
- Raychik Ya. Doctor of Technical Sciences, prof. Czestochova Polytecnic University (Poland)
- Ramasubbu S. PhD, Lifetime Fellow, Indian Academy of Science, Research Director BISS, ITW-India (P) Ltd (India)
- Sergeev V.V. Doctor of Technical Sciences, 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. Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU
- Tolochko O.V. Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU
- Fokin G.A. Doctor of Technical Sciences, General Director of LLC «Gazprom Transgaz St. Petersburg»
- Tsemenko V.N. Doctor of Technical Sciences, Head of Chair SPbPU

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

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

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

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

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.

# Содержание

# Энергетика и электротехника

Ахмед М., Осман М., Коровкин Н.В. Оптимальное распределение реактивной мощности в энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии с использованием многоцелевого алгоритма роя частиц							
Калимов А.Г., Важнов С.А., Говор В.М. Разработка соленоидального магнита с высокой однородностью магнитного поля в апертуре							
Попов А.В., Федорович Е.Д., Кулаков Е.Н., Денисова И.Б. Влияние количества конденсатных насосов на надежность работы питательных насосов в схеме энергоблока БРЕСТ-ОД-300	31						
Металлургия и материаловедение							
<b>Морачевский А.Г., Попович А.А.</b> Прогресс в исследованиях калий-ионных аккумуляторов.	41						
Фукс М.Д., Фролов М.А., Цеменко А.В. Анализ структуры, фазового состава и механических свойств трубного сварного соединения из жаропрочного сплава HP40NbTi							
Зайцев И.А., Блохин А.Н. Упрочнение эпоксидных смол углеродными наноматериалами							
Хроника							
Памяти профессора Михаила Романовича Петриченко	87						

# Contents

# **Energetics & Electrical engineering**

Ahmed M.K., Osman M.H., Korovkin N.V. Optimal reactive power dispatch in power system comprising renewable energy sources by means of a multi-objective particle swarm algorithm	5
Kalimov A.G., Vazhnov S.A., Govor V.M. Development of a solenoidal magnet with high uniformity of the magnetic field in the aperture	21
<b>Popov A.V., Fedorovich E.D., Kulakov E.N., Denisova I.B.</b> Influence of number of electric condensate pumps on feedwater pump operating reliability in the BREST-OD-300 power unit circuit	31
Metallurgy and Materials	
Morachevskiy A.G., Popovich A.A. Progress in researching batteries with potassium	41
<b>Fuks M.D., Frolov M.A., Tcemenko A.V.</b> Analysis of the structure, phase composition and mechanical properties of a pipe welded joint made of heat-resistant HP40NbTi alloy	51
Zaytsev I.A., Blokhin A.N. Strengthening of epoxy resins with carbon nanomaterials	74
Chronicle	
In memory of professor Mikhail Romanovich Petrichenko	87

# Энергетика и электротехника

DOI: 10.18721/JEST.27101 УДК 621.316

M.K. Ahmed<sup>1</sup>, M.H. Osman<sup>1</sup>, N.V. Korovkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Al-Azhar University, Cairo, Egypt; <sup>2</sup> Peter the Great St. P1etersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

# OPTIMAL REACTIVE POWER DISPATCH IN POWER SYSTEM COMPRISING RENEWABLE ENERGY SOURCES BY MEANS OF A MULTI-OBJECTIVE PARTICLE SWARM ALGORITHM

The electricity grid is developing fast today, with more renewable energy sources (RES) penetrating the industry. The traditional optimal reactive power dispatch (ORPD) is a complex and non-linear optimization problem and one of the sub-problems of the optimal distribution of the power flows in an energy system. The incorporation of RES further exacerbates this complex problem. In this paper, the ORPD problem solved as a single-objective as well as a multi-objective optimization problem in a power system comprising RES. This paper aims to minimize the active power loss and improve voltage profile by introducing renewable energy sources, such as wind and solar sources, in addition to the existing traditional sources. The optimization in a power system is achieved by adjusting control variables, such as generator voltages, tap ratios of a transformer, shunt capacitors, without violating technical constraints that are presented as equalities and inequalities. A multiobjective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm is proposed to obtain the optimal values of the control variables of the power system. In the first stage, the modified PSO (MPSO) used to determine the optimal location of RES for IEEE 14 bus and IEEE 30 bus test systems. In the second stage, MPSO and genetic algorithm (GA) were used for individual optimization of objectives, and in the third stage, the objective functions are treated as competing objectives and optimized simultaneously in a single run. Finally, the best compromise solution was extracted from the optimal Pareto set and supplied to the decision-maker by fuzzy set theory. Also, the results of MOPSO are compared to MPSO, GA, and multi-objective GA.

*Keywords:* multi-objective optimization, particle swarm optimization, photovoltaic panels, renewable energy sources, wind energy, power loss, voltage deviation.

Citation:

M.K. Ahmed, M.H. Osman, N.V. Korovkin, Optimal reactive power dispatch in power system comprising renewable energy sources by means of a multi-objective particle swarm algorithm, Materials Science. Power Engineering, 27 (01) (2021) 5–20, DOI: 10.18721/JEST.27101

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

*М. Ахмед*<sup>1</sup>, *М. Осман*<sup>1</sup>, *Н.В. Коровкин*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Эль-Эзар Университет, Каир, Египет; <sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

# ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОЦЕЛЕВОГО АЛГОРИТМА РОЯ ЧАСТИЦ

Современные электроэнергетические системы (ЭЭС) весьма быстро развиваются в направлении использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Задача поиска оптимального распределения реактивной мощности является сложной и нелинейной оптимизационной задачей, а также одной из подзадач оптимального распределения потоков мощности в ЭЭС. Введение в ЭЭС ВИЭ еще больше осложняет проблему. В данной статье проблема оптимального распределения реактивной мощности рассматривается и как одноцелевая, и как многоцелевая задача оптимизации. Статья направлена также на минимизацию потерь активной мощности и улучшение профиля напряжений узлов ЭЭС путем внедрения таких ВИЭ, как ветровые и солнечные источники. Оптимизация режима ЭЭС производится путем наилучшего выбора управляющих переменных, таких как напряжения генераторов, изменение коэффициентов трансформации трансформаторов, допускающих регулирование под нагрузкой, величин шунтирующих конденсаторов. Оптимизация выполняется без нарушения технических ограничений, которые представлены в работе в виде равенств и неравенств. Предложено использование алгоритма многоцелевой оптимизации роя частиц (MOPSO) для получения оптимальных значений управляющих переменных энергосистемы. На первом этапе модифицированный одноцелевой алгоритм роя частиц (MPSO) используется для определения оптимального местоположения ВИЭ для тестовых схем IEEE, содержащих 14 и 30 шин (узлов). На втором этапе MPSO и генетический алгоритм (GA) используется для раздельной оптимизации целей, а на третьем этапе целевые функции обрабатываются как конкурирующие цели и оптимизируются совместно с помощью MOPSO. Наконец, с помощью теории нечетких множеств из оптимального множества Парето было извлечено наилучшее компромиссное решение для предоставления лицу, принимающему решение. Также результаты работы МОРЅО сравниваются с МРЅО, GA и многоцелевым GA.

*Ключевые слова:* алгоритм многоцелевой оптимизации, алгоритм роя частиц, фотоэлектрические панели, возобновляемые источники энергии, энергия ветра, потери активной мощности, отклонение напряжения.

#### Ссылка при цитировании:

Ахмед М., Осман М., Коровкин Н.В. Оптимальное распределение реактивной мощности в энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии с использованием многоцелевого алгоритма роя частиц // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 1. С. 5–20. DOI: 10.18721/JEST.27101

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

**Introduction.** Renewable energy sources (RES) are now playing a major role in the performance of the integrated power system. They not only minimize harmful greenhouse gas emissions and fossil fuel reliance, but also reduce the cost of electricity production over the long term. There are two goals of economic operation on the power grid, one is active power control, and another is reactive power dispatch. By incorporating RES into the system, both goals can be improved [1, 2].

However, renewable distributed generation, i.e., wind and solar, are of an intermittent nature. Many challenges in the distribution system are introduced by this intermittent generation and load variance. These challenges include voltage drops and rises, power oscillations, problems in voltage stability, and increased power losses, so the ORPD study becomes necessary to incorporate both wind and solar energy in the power system [2, 3].

The ORPD problem is a sub-problem of optimal power flow which helps determine the optimal values to the control variables such as the generator voltage, tap changing transformer setting, and the optimal reactive power injected into the system, to minimize the active power loss and enhance voltage stability simultaneously [4, 5].

However, The ORPD problem is a complex and non-linear problem, and many traditional optimization methods have failed to solve it, such as the Newton method, linear programming, interior-point, and quadratic programming methods, because these techniques have low precision, high complexity, and failure to find the local and global optimum and thus result in unsafe convergence [6–8]. in order to overcome these disadvantages, many modern meta heuristic techniques have been applied: particle swarm optimization (PSO), evolutionary programming (EP), the genetic algorithm (GA) [4, 9–11]. Recently, the problem of ORPD has been presented as a multi-objective (MO) problem of optimization. The problem is not, however, viewed as a true problem with multiple goals. With a weighted sum of objectives, it was transformed into a single objective problem. Unfortunately, there is no logical basis for adequate weight determination and the objective function established in this way will lose importance because of mixing non-appropriate objectives [12, 13]. In addition, this requires multiple runs as many times as the number of desired Pareto-optimal solutions (POS). Therefore, traditional optimization approaches can at best find one solution in one simulation run which makes those methods inconvenient to solve multi-objective optimization problems [4, 14].

To avoid this difficulty, in this work, the concept of MOPSO for Multi-objective optimization was presented because of their ability to find a range of Pareto-optimal solutions in a single simulation run [4].

This paper aims to minimize power loss and voltage deviation by setting the control variable and integration of renewable energy sources in the network. Therefore, MOPSO is suggested to obtain the optimal control variable of the power system. As a test system, the IEEE 14 and IEEE 30 bus systems were used to demonstrate the applicability and efficacy of the proposed process.

#### **Problem formulation**

The problem can be mathematically formulated as a nonlinear constrained multi-objective optimization problem as follows [15]:

$$Minimize \ f = \left[ F_{P_{loss}}, F_{VD} \right], \tag{1}$$

Equality constraint 
$$g(x,u) = 0$$
, (2)

Inequality constrain 
$$H(x,u) \le 0$$
, (3)

where x is the dependent variables comprised of voltages of load bus  $V_{Li}$  (PQ bus), reactive power of generators  $Q_{Gi}$ , generator actual power at slack bus  $P_{GI}$ . It is possible to express x as follows:

$$x^{T} = [P_{G1}, V_{L1}, \dots, V_{NLB}, Q_{G1}, \dots, Q_{GNG}],$$
(4)

where *u* is the control variables comprised of generator bus voltages  $V_{Gi}$  (PV bus), tap ratios of transformer  $T_i$ , and reactive power injection  $Q_{Ci}$ . We can express *u* as follows:

$$u^{T} = \left[ V_{G1} \dots V_{NG}, T_{1} \dots T_{NT}, Q_{C1} \dots Q_{CNC} \right],$$
(5)

#### A. Objective functions

In this work, the objective functions are the active power loss minimization and voltage profile improvement for power system optimized simultaneously in a single run.

1) Minimization of active power loss  $(P_{loss})$ 

One of the main objective functions of the reactive power optimization is to minimize the active power losses in the transmission lines, which can be expressed as follows:

$$F_{P_{loss}} = \sum_{k=1}^{N_E} G_k \Big[ V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j) \Big],$$
(6)

where  $G_k$  is the conductance of the  $k^{\text{th}}$  line; NE is the transmission line number;  $V_i$  and  $V_j$  are the voltage at *i* and *j* bus.

2) Minimization of Voltage deviation (VD)

$$F_{VD} = \sum_{i=1}^{N_{LB}} \left| V_{Li} - 1 \right|, \tag{7}$$

where  $N_{IB}$  is the number of load buses and  $V_{Ii}$  actual voltage magnitudes at bus *i*.

- B. Problem Constrains
- 1) Equality constraints

The equality constraints are active and reactive power balance at each bus, which can be formulated by power flow equations as follows:

$$P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^{N_B} V_j \Big[ G_{ij} \cos\left(\delta_i - \delta_j\right) + B_{ij} \sin\left(\delta_i - \delta_j\right) \Big] = 0, \qquad (8)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^{N_B} V_j \Big[ G_{ij} \sin\left(\delta_i - \delta_j\right) + B_{ij} \cos\left(\delta_i - \delta_j\right) \Big] = 0,$$
(9)

where  $N_B$  is the number of buses;  $P_{Gi}$  and  $Q_{Gi}$  are the generator real and reactive power, respectively;  $P_{Di}$  and  $Q_{Di}$  are the load active and reactive power, respectively.

C. Inequality constraints

The inequality constraints represent the system operating constraints as follows.

1) Generation constraints:

$$V_{Gi}^{\min} \le V_{Gi} \le V_{Gi}^{\max}, \ i = 1, \dots, N_G,$$
(10)

$$Q_{G_i}^{\min} \le Q_{G_i} \le Q_{G_i}^{\max}, \ i = 1, \dots, N_G,$$
(11)

where  $N_G$  is total number of generators.

2) Transformer constraints:

$$T_i^{\min} \le T_i \le T_i^{\max}, \ i = 1, ..., N_T,$$
 (12)

where  $N_{\tau}$  is the number of transformers.

3) Switchable reactive power sources constraints

$$Q_{ci}^{\min} \le Q_{ci} \le Q_{ci}^{\max}, \ i = 1, \dots, N_C.$$
(13)

a. Security constraints:

$$V_{Li}^{\min} \le V_{Li} \le V_{Li}^{\max}, \ i = 1, \dots, N_{LB},$$
(14)

$$S_{Li} \le S_{Li}^{\max}, i = 1, ..., N_E,$$
 (15)

where  $V_{Li}$  is the voltage of the PQ bus and  $S_{Li}$  is transmission line loading of  $i^{th}$  branch.

## **Best Compromise Solution (BCS)**

Fuzzy set theory has been implemented to derive efficiently a candidate Pareto optimal solution for the decision makers. The fuzzy sets are defined by equations (16) called membership functions [4, 16].

$$\mu_{F_{i}} = \begin{cases} 1 & F_{i} \leq F_{i}^{\min}; \\ \frac{F_{i}^{\max} - F_{i}}{F_{i}^{\max} - F_{i}^{\min}} & F_{i}^{\min} \leq F_{i} \leq F_{i}^{\max}; \\ 0 & F_{i} \geq F_{i}^{\max}, \end{cases}$$
(16)

where  $F_i^{\text{max}}$  and  $F_i^{\text{min}}$  are the maximum and minimum values of the *i*<sup>th</sup> objective function, respectively.

In relation to all M non-dominated solutions, the efficiency of each M solution can be evaluated by normalization of its performance relative to sum of the performances of the M solutions as follows:

$$\mu^{k} = \frac{\sum_{i=1}^{Nob} \mu_{Fi}^{k}}{\sum_{k=1}^{M} \sum_{i=1}^{Nob} \mu_{Fi}^{k}}, \quad k = 1, \dots, M,$$
(17)

where  $N_{obi}$  is the number of objectives. The BCS is that having the maximum value of  $\mu^k$ .

## Wind Energy Modeling

The output power from a wind power unit is assigned in terms of the wind speed as expressed in (18) [3].

$$P_{w}(v_{w}) = \begin{cases} 0 & \text{for } v_{w} < v_{cin} \text{ and } v_{w} > v_{cout}; \\ P_{wr}\left(\frac{v_{w} - v_{cin}}{v_{wr} - v_{cin}}\right) & \text{for } v_{cin} \le v_{w} \le v_{wr}; \\ P_{wr} & \text{for } v_{wr} \le v_{w} \le v_{cout}, \end{cases}$$
(18)

where  $P_{wr}$  is the rated power of the wind turbine,  $v_{wr}$  is the rated wind speed of the wind turbine,  $v_{cin}$  is the cut-in wind speed of the wind turbine, and  $v_{cout}$  is the cut-out wind speed. The numerical values of the speed considered are:  $v_{cin} = 3 \text{ m/s}$ ,  $v_{wr} = 16 \text{ m/s}$  and  $v_{cout} = 25 \text{ m/s}$ , same as the data of 3 MW turbine model Enercon E82-E4.

#### Photovoltaic energy modeling

In this paper, the power output of the solar photovoltaic (PV) arrays is determined by using the simplified method of estimating the output of the PV modules under different operating conditions. The PV module cannot generate a bulk amount of electrical power. Therefore, a large number of PV modules are connected in series and parallel to the design PV array. Series and parallel connection of PV modules boost up voltage and current to tailor PV array output [1, 17, 18]. If there are NS number of series and NP number of parallel PV modules, then the array power output is given by

$$P_A = N_S N_P P_{\max}.$$
 (19)

The maximum power output of the PV module is given by [19].

$$P_{\max} = FF.V_{oc}.I_{sc},\tag{20}$$

where FF is the fill factor of PV module,  $V_{oc}$  and  $I_{sc}$  are the open circuit voltage and short circuit current.

#### Simulation results

The algorithm is tested on IEEE 14-bus and IEEE 30-bus test systems for two different cases for each system. The system line and bus data as well as the system constraints are found in reference [4]. The number of control variables for the IEEE-14 system are 9, and the number of control variables for the IEEE 30 system are 12.

#### A. Calculate Power Output from renewable energy sources

Egypt possesses an abundance of land, sunny weather, and high wind speeds, making it a prime location for renewable energy projects. Egypt enjoys prominent wind resources in the Gulf of Suez, which is considered one of the best locations in the world with high and regular speeds. Therefore, in this paper, wind speed and solar radiation data from sites in Egypt were used to calculate the power generated in wind farms as well as solar power plants [20]. The locations for wind farms in this work are Gabal Al Zeit and Zafaran, while the locations for solar power plants are Benban and Kuraymat.

#### 1) For IEEE 14 bus

The optimal locations of renewable energy sources for this system obtained by using MPSO are buses 4, 5, and 14. In bus 4, there is a wind farm and annual average wind speed from the location of Gabl Al Zeit in Egypt 8.8194 m/s in the year 2010 and this farm consists of 50 wind turbines. The power generation for each wind turbine in this location is calculated by equation (19) and the total power generation for this wind farm is 67.147 MW. In bus 5, there is a wind farm consisting of 25 wind turbines with annual average wind speed of 7.536 m/s from the location of Zafaran in Egypt in 2010. The power generation for each wind turbine in this location is calculated by equation (19) and the total power generation for each wind turbine in this location of Zafaran in Egypt in 2010. The power generation for each wind turbine in this location is calculated by equation (19) and the total power generation for this wind farm is 26.1715 MW.

In addition, in bus 14, there is a solar power plant with annual average radiation of  $508.6 \text{ W/m}^2$  from the location of Benban in Egypt. The total power generation for this plant in this location is calculated by equation (20) and equals 11.377 MW.

#### 2) For IEEE 30 bus

The optimal locations of renewable energy sources for this system obtained by using MPSO are buses 6, 7, 19 and 30. There is a wind farm in the location of Gabl Al Zeit in Egypt on bus 6 consisting of 60 wind turbines. The overall power output for this wind farm is 80.57 MW. In bus 7, there is a wind farm in the location of Zafaran in Egypt, which consists of 35 wind turbines with the total power generation of 31.41 MW. In bus 19, there is a solar power plant in the location of Benban in Egypt: the total power generation for it is calculated by equation (20) and equals 14.153 MW. Moreover, there was a solar power plant added to bus 30 in the location of Kuraymat in Egypt, with the annual average radiation from this location of  $474.762 \text{ W/m}^2$ . The total power generation for this plant in this location is calculated by equation (20) and is equal to 10.377 MW.

#### B. The results of IEEE 14-bus system

# 1) Case 1: Minimization of active $P_{loss}$ without RES for IEEE 14 bus

Fig. 1 shows a reduction of  $P_{loss}$  after adjusting the control variables such as generator voltages, transformer tap-settings and capacitor banks by using MPSO and GA. The initial active  $P_{loss}$  was 13.3933 MW. After optimization with MPSO, the minimum  $P_{loss}$  is **12.488** MW, and after optimization with GA, the minimum  $P_{loss}$  by is **12.492** MW.

# 2) Case 2: Minimization of active $P_{loss}$ with RES for IEEE14 bus

In this case, two wind farms were added on Bus 4 and 5, and a solar power plant was added on bus 14. The  $P_{loss}$  by MPSO and GA are **5.0054** MW and **5.0127** MW, respectively. The characteristics of convergence of MPSO and GA for  $P_{loss}$  are shown in Fig. 2.

## 3) Case 3: Minimization of VD without RES for IEEE14 bus

In this case, the voltage deviation was reduced by using MPSO and GA, and without the addition of RES. The base value for VD is 0.4036 pu and the value of VD by MPSO and GA are 0.0327 pu and

**0.0332** pu, respectively. Fig. 3 shows a comparison between the base value voltage profile and that obtained by MPSO and GA. The convergence characteristics for VD are shown in Fig. 4.

4) Case 4: Minimization of VD with RES for IEEE14 bus

The value of VD after optimization by MPSO and GA are 0.02077 pu and 0.0212 pu, respectively. Fig. 5 shows a comparison between the base value voltage profile and voltage profile with the presence of RES obtained by MPSO and GA. The convergence characteristics for VD are shown in Fig. 6. Table 1 provides a comparison of the results for the individual optimization with and without RES obtained by MPSO and GA for case (1-4).

5) Case 5: Minimization of  $P_{loss}$  and VD without RES for IEEE14 bus

In this case, the active  $P_{loss}$  and the VD were minimized simultaneously by MOPSO and MOGA without the presence of the renewable energy sources in the grid. Fig. 7 shows Pareto-optimal front by MOPSO and MOGA without RES.

## 6) Case 6: Minimization of $P_{loss}$ and VD with RES for IEEE14 bus

In this case, the active  $P_{loss}$  and the VD were minimized simultaneously with the presence of the renewable energy sources in the grid. Fig. 8 shows Pareto-optimal front with RES. Table 2 compares the BCS with the best value for each objective from MO optimization obtained by MOPSO and MOGA for cases (5, 6).



Fig. 1. Convergence of Ploss without RES for IEEE 14 bus for case 1



Fig. 2. Convergence of Ploss with RES for IEEE 14 bus for case 2



Fig. 3. Voltage profile without RES for IEEE 14 bus for case 3



Fig. 4. Convergence of VD without RES for IEEE 14 bus for case 3



Fig. 5. Voltage profile with RES for IEEE 14 bus for case 4

## C. The results of IEEE 30-bus system

# 1) Case 7: Minimization of active $P_{loss}$ without RES for IEEE 30 bus

Fig. 9 shows a reduction of  $P_{loss}$  after adjusting the control variables such as generator voltages, transformer tap-settings and capacitor banks by using MPSO and GA. The initial  $P_{loss}$  was 17.557 MW and after optimization by using MPSO and GA the minimum  $P_{loss}$  are 16.348 MW and 16.399 MW, respectively.



Fig. 6. Convergence of VD with RES for IEEE 14 bus for case 4



Fig. 7. POS set without RES for IEEE 14 bus for case 5

Table 1

Comparison results for the individual optimization with and without res for case (1-4) for IEEE 14 bud

	Base	MPSO without RES		GA without RES		MPSO with RES		GA without RES	
Parameter	value	Best P <sub>loss</sub>	Best VD						
P <sub>loss</sub> (MW)	13.393	12.488	14.03	12.492	14.23	5.0054	5.611	5.0127	5.659
VD (pu)	0.4036	0.4	0.0327	0.3957	0.0332	0.4017	0.02077	0.3425	0.0212

Table 2

## A comparison of result for the MO optimization with and without res for cases (5, 6) for IEEE 14 bus

Danamatan	MOPSO without RES		MOGA without RES		MOPSO	with RES	MOGA with RES	
Parameter	P <sub>loss</sub> (MW)	VD (pu)	P <sub>loss</sub> (MW)	VD (pu)	P <sub>loss</sub> (MW)	VD (pu)	P <sub>loss</sub> (MW)	VD (pu)
BCS	12.6389	0.1185	12.805	0.1057	5.0465	0.1186	5.1591	0.0976
Best P <sub>loss</sub>	12.5325	0.2045	12.545	0.1461	5.0233	0.2123	5.0336	0.1426
Best VD	13.794	0.03857	13.717	0.03877	5.5702	0.0234	5.5711	0.0291



Fig. 8. POS set with RES for IEEE 14 bus for case 6



Fig. 9. Convergence of Ploss without for IEEE 30 bus for case 7



Fig. 10. Convergence of Ploss with RES for IEEE 30 bus for case 8

## 2) Case 8: Minimization of active $P_{loss}$ with RES for IEEE 30 bus

In this case, two wind farms were added on Bus 6 and 7, and two solar power plants were added on bus 29 and 30. The  $P_{loss}$  by MPSO and GA are 4.6738 MW and 4.685 MW, respectively. The characteristics of convergence of MPSO and GA for  $P_{loss}$  are shown in Fig. 10.

3) Case 9: Minimization of VD without RES for IEEE 30 bus

Fig. 11 shows optimal voltage profile by using MPSO and GA. Voltage deviation after optimization by using MPSO is 0.1379 pu and by GA is 0.1508 pu. The initial voltage deviation was 0.6256 pu. The convergence characteristics for VD are shown in Fig. 12.



Fig. 11. Voltage profile without RES for IEEE 30 bus for case 9



Fig. 12. Convergence of VD without RES for IEEE 30 bus for case 9



Fig. 13. Voltage profile with RES for IEEE 30 bus for case 10

#### 4) Case 10: Minimization of VD with RES for IEEE 30 bus

The value of VD after optimization by MPSO and GA are 0.0697 pu and 0.0770 pu, respectively. Fig. 13 shows a comparison between the base value voltage profile and voltage profile with the presence of RES obtained by MPSO and GA. The convergence characteristics for VD are shown in



Fig. 14. Convergence of VD with RES for IEEE 30 bus for case 10



Fig. 15. Pareto front without RES for IEEE 30 bus for case 11



Fig. 16. Pareto front with RES for IEEE 30 bus for case 12

Fig. 14. Table 3 provides a comparison of the results for the individual optimization with and without RES obtained by MPSO and GA for case (7-10).

5) Case 11: Minimization of  $P_{loss}$  and VD without RES for IEEE 30 bus

In this case, the active  $P_{loss}$  and the VD were minimized at the same time by MOPSO and MOGA without the presence of the renewable energy sources in the grid. Fig. 15 shows Pareto-optimal front without RES.

## 6) Case 12: Minimization of $P_{loss}$ and VD with RES for IEEE 30 bus

In this case, the active  $P_{loss}$  and the VD were minimized simultaneously by MOPSO and MOGA with the presence of the renewable energy sources in the grid. Fig. 16 shows Pareto-optimal front with RES. Table 4 compares the BCS with the best value for each objective from MO optimization obtained by MOPSO and MOGA for cases (11, 12).

Table 3

Comparison results for the individual optimization with and without res for IEEE 30 bus for case (7-10)

Danamatan	Base	MPSO wi	ithout RES	GA without RES		MPSO with RES		GA without RES	
Parameter	value	Best P <sub>loss</sub>	Best VD	Best P <sub>loss</sub>	Best VD	Best P <sub>loss</sub>	Best VD	Best P <sub>loss</sub>	Best VD
P <sub>loss</sub> (MW)	17.557	16.348	18.093	16.399	17.60	4.6738	5.638	4.685	5.4711
VD (pu)	0.6256	0.857	0.1379	0.825	0.1508	0.996	0.0697	0.984	0.0770

Table 4

#### A comparison of result for the MO optimization with and without res for cases (5, 6) for IEEE 14 bus

Danamatan	MOPSO without RES		MOGA without RES		MOPSO	with RES	MOGA with RES	
Parameter	P <sub>loss</sub> (MW)	VD (pu)	P <sub>loss</sub> (MW)	VD (pu)	P <sub>loss</sub> (MW)	VD (pu)	P <sub>loss</sub> (MW)	VD (pu)
BCS	16.5304	0.3287	16.5427	0.3001	4.7504	0.296	4.7245	0.3091
Best P <sub>loss</sub>	16.4518	0.6736	16.4665	0.4359	4.6859	0.8862	4.7009	0.6806
Best VD	17.4218	0.176	17.3869	0.1924	5.4249	0.0785	5.2875	0.1024

#### Conclusion

In this work, we proposed a multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) for solving the optimal reactive power dispatch (ORPD) problem. We incorporated renewable energy sources and considered the power loss and voltage profile improvement. The algorithm is tested on IEEE 14-bus and IEEE 30-bus test system for two different cases for each system. The MPSO for the optimal placement of renewable sources of test systems is used in the first stage. In the second stage, the active power loss and voltage deviation objectives are optimized individually with and without renewable energy sources in power systems by using MPSO and GA algorithms. In the third step, the objective functions are optimized simultaneously in a single run with and without renewable energy sources in power reliability and efficiency. The results show that MOPSO could find high-quality solutions with more reliability and efficiency. The results also show that when the renewable energy sources are introduced into the networks with adjusting the control variables in the system with the algorithm, a decrease in active power loss and the deviation in voltage is much better than the absence of renewable energy sources.

#### REFERENCES

[1] **T. Das et al.**, Optimal reactive power dispatch incorporating solar power using Jaya algorithm, in Computational advancement in communication circuits and systems, Springer, 2020, pp. 37–48.

[2] K. Mahesh, P. Nallagownden, I. Elamvazuthi, Optimal placement and sizing of renewable distributed generations and capacitor banks into radial distribution systems, Energies, vol. 10, no. 6, 2017, DOI: 10.3390/en10060811

[3] **P.P. Biswas, P.N. Suganthan, R. Mallipeddi, G.A.J. Amaratunga,** Optimal reactive power dispatch with uncertainties in load demand and renewable energy sources adopting scenario-based approach, Appl. Soft Comput., vol. 75, pp. 616–632, 2019.

[4] K.A. Mamdouh, A.A. Shehata, N.V. Korovkin, Multi-objective voltage control and reactive power optimization based on multi-objective particle swarm algorithm, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 643, no. 1, 2019, DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012089

[5] **T. Das, R. Roy, K.K. Mandal,** Impact of the penetration of distributed generation on optimal reactive power dispatch, Prot. Control Mod. Power Syst., vol. 5, no. 1, 2020, DOI: 10.1186/s41601-020-00177-5

[6] L. Srivastava, H. Singh, L. Srivastava, Hybrid multi-swarm particle swarm optimisation based multiobjective reactive power dispatch, IET Gener. Transm. Distrib., vol. 9, no. 8, pp. 727–739, 2015, DOI: 10.10-49/iet-gtd.2014.0469

[7] **M. Varadarajan, K.S. Swarup,** Differential evolution approach for optimal reactive power dispatch, Appl. Soft Comput. J., vol. 8, no. 4, pp. 1549–1561, 2008, DOI: 10.1016/j.asoc.2007.12.002

[8] **K.Y. Lee**, Optimal reactive power planning using evolutionary algorithms: a comparative study for evolutionary programming, evolutionary strategy, genetic algorithm, and linear programming, IEEE Trans. Power Syst., vol. 13, no. 1, pp. 101–108, 1998, DOI: 10.1109/59.651620

[9] A.A. Shehata, M.K. Ahmed, State estimation accuracy enhancement for optimal power system steady state modes, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 643, no. 1, 2019, DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012049

[10] **N.V. Korovkin, A.A. Potienko,** The use of a genetic algorithm for solving electric engineering problems, Elektrichestvo, vol. 2, no. 11, p. 15, 2002.

[11] N.A. Belyaev, N.V. Korovkin, O.V. Frolov, V.S. Chudnyi, Methods for optimization of powersystem operation modes, Russ. Electr. Eng., vol. 84, no. 2, pp. 74–80, 2013, [Online]. Available: http://dx.doi. org/10.3103/S1068371213020028

[12] M.A. Abido, J.M. Bakhashwain, Optimal VAR dispatch using a multiobjective evolutionary algorithm, Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 27, no. 1, p. 13, 2005, DOI: 10.1016/j.ijepes.2004.07.006

[13] **S. Jeyadevi, S. Baskar, C.K. Babulal, M. Willjuice Iruthayarajan,** Solving multiobjective optimal reactive power dispatch using modified NSGA-II, Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 33, no. 2, pp. 219–228, 2011, DOI: 10.1016/j.ijepes.2010.08.017

[14] Y. Zeng, Y. Sun, Application of Hybrid MOPSO Algorithm to Optimal Reactive Power Dispatch Problem Considering Voltage Stability, J. Electr. Comput. Eng., vol. 2014, pp. 1–12, 2014, DOI: 10.11-55/2014/124136

[15] **M. Varadarajan, K.S. Swarup,** Differential evolutionary algorithm for optimal reactive power dispatch, Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 30, no. 8, pp. 435–441, 2008, DOI: 10.1016/j.ijepes.2008.03.003

[16] **J.S. Dhillon, S.C. Parti, D.P. Kothari,** Stochastic economic emission load dispatch, Electr. Power Syst. Res., vol. 26, no. 3, pp. 179–186, 1993, DOI: 10.1016/0378-7796(93)90011-3

[17] **A. Refaat, M. Elgamal, N.V. Korovkin,** A Novel Grid-Connected Photovoltaic Centralized Inverter Topology to Improve the Power Harvest during Partial Shading Condition, Elektrichestvo, vol. 7, no. 7, pp. 59–68, 2019, DOI: 10.24160/0013-5380-2019-7-59-68

[18] **A. Refaat, M.H. Osman, N.V. Korovkin,** Optimum Power Extraction from Non-Uniform Aged PV Array Using Current Collector Optimizer Topology, Elektrichestvo, no. 10, pp. 54–60, 2019.

[19] W. Zhou, H. Yang, Z. Fang, A novel model for photovoltaic array performance prediction, Appl. Energy, vol. 84, no. 12, pp. 1187–1198, 2007, DOI: 10.1016/j.apenergy.2007.04.006

[20] S. Pfenninger, I. Staffell, Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data, Energy, vol. 114, pp. 1251–1265, 2016, DOI: 10.1016/j.energy.2016.08.060

#### THE AUTHORS

AHMED Mamdouh K. – *Al-Azhar University*. E-mail: Engmamdouhkamal@yahoo.com

**OSMAN Mohamed H.** – *Al-Azhar University.* E-mail: mo\_hassan87@yahoo.com

**KOROVKIN Nikolay V.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.* E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

Received: 24.02.2021

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Das T. et al.** Optimal reactive power dispatch incorporating solar power using Jaya algorithm, in Computational advancement in communication circuits and systems, Springer, 2020, pp. 37–48.

[2] Mahesh K., Nallagownden P., Elamvazuthi I. Optimal placement and sizing of renewable distributed generations and capacitor banks into radial distribution systems, Energies, vol. 10, no. 6, 2017, DOI: 10.3390/en10060811

[3] **Biswas P.P., Suganthan P.N., Mallipeddi R., Amaratunga G.A.J.** Optimal reactive power dispatch with uncertainties in load demand and renewable energy sources adopting scenario-based approach, Appl. Soft Comput., vol. 75, pp. 616–632, 2019.

[4] **Mamdouh K.A., Shehata A.A., Korovkin N.V.** Multi-objective voltage control and reactive power optimization based on multi-objective particle swarm algorithm, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 643, no. 1, 2019, DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012089

[5] **Das T., Roy R., Mandal K.K.** Impact of the penetration of distributed generation on optimal reactive power dispatch, Prot. Control Mod. Power Syst., vol. 5, no. 1, 2020, DOI: 10.1186/s41601-020-00177-5

[6] Srivastava L., Singh H., Srivastava L. Hybrid multi-swarm particle swarm optimisation based multi-objective reactive power dispatch, IET Gener. Transm. Distrib., vol. 9, no. 8, pp. 727–739, 2015, DOI: 10.1049/ iet-gtd.2014.0469

[7] **Varadarajan M., Swarup K.S.** Differential evolution approach for optimal reactive power dispatch, Appl. Soft Comput. J., vol. 8, no. 4, pp. 1549–1561, 2008, DOI: 10.1016/j.asoc.2007.12.002

[8] Lee K.Y. Optimal reactive power planning using evolutionary algorithms: a comparative study for evolutionary programming, evolutionary strategy, genetic algorithm, and linear programming, IEEE Trans. Power Syst., vol. 13, no. 1, pp. 101–108, 1998, DOI: 10.1109/59.651620

[9] Shehata A.A., Ahmed M.K. State estimation accuracy enhancement for optimal power system steady state modes, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 643, no. 1, 2019, DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012049

[10] **Korovkin N.V., Potienko A.A.** The use of a genetic algorithm for solving electric engineering problems, Электричество, vol. 2, no. 11, p. 15, 2002.

[11] Belyaev N.A., Korovkin N.V., Frolov O.V., Chudnyi V.S. Methods for optimization of power-system operation modes, Russ. Electr. Eng., vol. 84, no. 2, pp. 74–80, 2013, [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.3103/S1068371213020028

[12] **Abido M.A., Bakhashwain J.M.** Optimal VAR dispatch using a multiobjective evolutionary algorithm, Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 27, no. 1, p. 13, 2005, DOI: 10.1016/j.ijepes.2004.07.006

[13] Jeyadevi S., Baskar S., Babulal C.K., Willjuice Iruthayarajan M. Solving multiobjective optimal reactive power dispatch using modified NSGA-II, Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 33, no. 2, pp. 219–228, 2011, DOI: 10.1016/j.ijepes.2010.08.017

[14] Zeng Y., Sun Y. Application of Hybrid MOPSO Algorithm to Optimal Reactive Power Dispatch Problem Considering Voltage Stability, J. Electr. Comput. Eng., vol. 2014, pp. 1–12, 2014, DOI: 10.11-55/2014/124136

[15] **Varadarajan M., Swarup K.S.** Differential evolutionary algorithm for optimal reactive power dispatch, Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 30, no. 8, pp. 435–441, 2008, DOI: 10.1016/j.ijepes.2008.03.003

[16] **Dhillon J.S., Parti S.C., Kothari D.P.** Stochastic economic emission load dispatch, Electr. Power Syst. Res., vol. 26, no. 3, pp. 179–186, 1993, DOI: 10.1016/0378-7796(93)90011-3

[17] **Refaat A., Elgamal M., Korovkin N.V.** A Novel Grid-Connected Photovoltaic Centralized Inverter Topology to Improve the Power Harvest during Partial Shading Condition, Elektrichestvo, vol. 7, no. 7, pp. 59–68, 2019, DOI: 10.24160/0013-5380-2019-7-59-68

[18] **Refaat A., Osman M.H., Korovkin N.V.** Optimum Power Extraction from Non-Uniform Aged PV Array Using Current Collector Optimizer Topology, Электричество, no. 10, pp. 54–60, 2019.

[19] **Zhou W., Yang H., Fang Z.** A novel model for photovoltaic array performance prediction, Appl. Energy, vol. 84, no. 12, pp. 1187–1198, 2007, DOI: 10.1016/j.apenergy.2007.04.006

[20] **Pfenninger S., Staffell I.** Long-term patterns of European PV output using 30 2021s of validated hourly reanalysis and satellite data, Energy, vol. 114, pp. 1251–1265, 2016, DOI: 10.1016/j.energy.2016.08.060

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**АХМЕД Мамдух К.** – аспирант, Эль-Эзар Университет, без степени. E-mail: Engmamdouhkamal@yahoo.com

**ОСМАН Мохамед Х.** *– аспирант, Эль-Эзар универсиет, без степени.* E-mail: mo\_hassan87@yahoo.com

**КОРОВКИН Николай Владимирович** — заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук. E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 24.02.2021

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021

DOI: 10.18721/JEST.27102 УДК 621.3.013.22

А.Г. Калимов, С.А. Важнов, В.М. Говор

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

# РАЗРАБОТКА СОЛЕНОИДАЛЬНОГО МАГНИТА С ВЫСОКОЙ ОДНОРОДНОСТЬЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В АПЕРТУРЕ

В статье рассматривается эффективная процедура оптимизации формы обмотки и ферромагнитного экрана соленоидального магнита, входящего в состав фокусирующей системы для пучка заряженных частиц. Основной целью исследования является формирование однородного магнитного поля в апертуре соленоида. Особенностью рассматриваемой оптимизационной процедуры является ее разбиение на несколько этапов. На первом из них определяется наилучшее распределение плотности тока в обмотке, обеспечивающее максимально возможную протяженность области однородности магнитного поля. На втором этапе формируется практически реализуемая структура обмотки магнита, моделирующая в первом приближении оптимальное распределение плотности тока. На последнем этапе конструкция магнита корректируется с целью минимизации влияния вихревых токов, индуцируемых быстро меняющемся током в обмотке соленоида. Внешний ферромагнитный экран выбран таким образом, что сохранено высокое качество магнитного поля и одновременно существенно снижены потери на вихревые токи.

*Ключевые слова:* магнитное поле, соленоид, оптимизация, электронная линза, форромагнитный экран.

#### Ссылка при цитировании:

Калимов А.Г., Важнов С.А., Говор В.М. Разработка соленоидального магнита с высокой однородностью магнитного поля в апертуре // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 1. С. 21–30. DOI: 10.18721/JEST.27102

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

A.G. Kalimov, S.A. Vazhnov, V.M. Govor

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

# DEVELOPMENT OF A SOLENOIDAL MAGNET WITH HIGH UNIFORMITY OF THE MAGNETIC FIELD IN THE APERTURE

The article discusses an effective procedure for optimizing the shape of the winding and ferromagnetic shield of a solenoid magnet, which is part of the focusing system for a charged particle beam. The main purpose of the study is the formation of a uniform magnetic field in the aperture of a solenoid. The peculiarity of this optimization procedure is its division into several stages. On the first of them, the best distribution of the current density in the winding is determined, which provides the maximum possible extent of the area of uniformity of the magnetic field. At the second stage, a practically realizable structure of the magnet winding is formed, which simulates the optimal current density distribution in the first approximation. At the last stage, amendments are made, allowing the use of the magnet in the mode of both stationary and rapidly changing current in the winding. The external ferromagnetic shield of the magnet selected ensures good quality of the magnetic field in the aperture and negligible power losses at the same time.

Keywords: magnetic field, solenoid, optimization, electron lens, ferromagnetic shield.

Citation:

A.G. Kalimov, S.A. Vazhnov, V.M. Govor, Development of a solenoidal magnet with high uniformity of the magnetic field in the aperture, Materials Science. Power Engineering, 27 (01) (2021) 21–30, DOI: 10.18721/JEST.27102

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

**Введение.** Соленоидальные магниты часто используются в устройствах оптики заряженных частиц благодаря фокусирующим свойствам индуцированного ими магнитного поля по отношению к пучкам заряженных частиц [1, 2]. В магнитных линзах этого типа основную фокусирующую роль играют неоднородные поля в торцевых частях магнита. В этой ситуации характеристики магнитного поля на краях линзы формируются, как правило, за счет выбора оптимальной формы ферромагнитного экрана [2]. В некоторых специальных приложениях оптики заряженных частиц требуется создание максимально однородного магнитного поля во всей апертуре магнита, включая его торцевые части. Одним из таких приложений является применение магнитов с цилиндрической симметрией в электронных линзах. Этот новый инструмент в физике ускорителей применяется для фокусировки пучков ионов за счет пространственного заряда пучка электронов, распространяющегося в противоположном направлении. Такие установки в настоящее время разрабатывается в ряде ведущих научных центрах [3–5], в частности, в институте физики тяжелых ионов в г. Дармштадт, Германия. Это устройство будет использоваться в одном из ускорителей создаваемого комплекса FAIR для повышения интенсивности ионного пучка [6, 7].

Основным элементом разрабатываемой линзы является соленоид с индукцией максимального продольного магнитного поля  $B_z = 600$  мT, диаметром и длиной области хорошего поля d = 80 мм и 1 = 3000 мм. Общая длина магнита, включая ферромагнитный экран, ограничена величиной L = 3360 мм из-за отсутствия свободного пространства в области размещения соленоида. Для обеспечения требуемых фокусирующих свойств электронной линзы линии индукции внутри соленоида в области хорошего поля должны быть параллельны оси. Предварительный анализ ионно-оптических свойств разрабатываемой системы показал, что радиальная составляющая напряженности магнитного поля в рабочей области должна быть меньше  $\pm 5 \cdot 10^{-4}$  относительных единиц. В процессе эксплуатации магнитное поле в соленоиде будет нарастать со скоростью до 20 T/c. Как следствие, распределение магнитного поля в апертуре будет искажаться вихревыми токами, индуцированными в проводящих конструктивных элементах магнита.

Для достижения требуемого качества поля в апертуре необходимо решить несколько внутренне связанных задач. Первая из них — выбор правильной структуры обмотки, особенно в торцевых частях магнита; вторая — определение правильной конфигурации ферромагнитного экрана, позволяющей обеспечить требуемое качество поля и ограничить влияние вихревых токов. Эти задачи решались путем многофакторной оптимизации параметров геометрии магнита.

#### Метод и основные принципы процедуры оптимизации магнита.

Предварительное исследование конфигурации магнитного поля в рабочей области соленоида было проведено на основе анализа его двухмерной модели. Моделирование магнитного поля в таких системах рассматривается в целом ряде исследований [8–10]. В нашей работе был использован подход, основанный на расчете векторного магнитного потенциала в рассматриваемой магнитной системе методом конечных элементов второго порядка [11, 12]. Все расчеты, включая оптимизацию формы катушки, были выполнены с использованием разработанного нами программного комплекса **MULTIMAG** [13], изначально разработанного для моделирования электрических и магнитных полей в устройствах оптики заряженных частиц.



Рис. 1. Распределение плотности тока в торцевых секциях соленоида, соответствующее оптимальному решению. Радиус отверстия в торцевой пластине магнитопровода равен *R* = 120 мм

Fig. 1. Current density distribution in the end sections of the magnet corresponding to the optimal solution. The radius of the hole in the end plate is R = 120 mm

Оптимизация характеристик магнитного поля обычно сводится к решению трудоемких обратных задач теории электромагнитного поля [14—17]. В рассматриваемой работе поиск оптимальных геометрических параметров рассматриваемого магнита был выполнен с применением надежного и эффективного алгоритма, основанного на методе деформируемого многогранника Нелдера — Мида. В качестве целевой функции, подлежащей минимизации, было выбрано максимальное значение радиальной составляющей магнитной индукции в рабочей области соленоида.

Для выбора наилучшего варианта магнитной системы были последовательно решены две различные оптимизационные задачи. Первая из них заключалась в определении оптимальной линейной зависимости плотности тока в обмотке, обеспечивающей минимальное значение радиальной составляющей индукции магнитного поля внутри рабочей области соленоида. Для этого торцевая часть магнита длиной S = 160 мм была разделена на несколько тонких кольцевых слоев. Плотность тока в каждом слое была предполагалась постоянной, общее количество таких слоев было установлено равным 8.

Поиск оптимального решения проводился при различных значениях радиуса R отверстия в торцевой части ферромагнитного экрана. Внутренний радиус катушки в исследуемой модели равен  $r_{in} = 80$  мм, что определяется основными требованиями к конструкции соленоида. Плотность тока в центральной обмотке была выбрана равной J = 4,5 A/мм<sup>2</sup>, что типично для ускорительных магнитов с водяным охлаждением. Соответственно внешний радиус обмотки равен  $r_{out} = 185$  мм. В этом случае индукция магнитного поля в центральной части соленоида достигает необходимого уровня B = 0,6 T. Модель рассматриваемого магнита показана на рис. 1*a*.

Важным параметром модели является соотношение между длиной всего магнита и размером области хорошего поля. Сравнение соответствующих значений показывает, что та часть пространства в магните, где радиальная напряженность поля может выходить за рамки предельных значений, имеет длину всего  $\Delta z = 180$  мм. Такое малое расстояние требует очень тщательной и точной проработки геометрии катушки соленоида.

Распределение магнитного поля в торцевой части магнита сильно зависит от радиуса окна в торцевом экране *R*. Очевидно, меньшие радиусы обеспечивают лучшее качество магнитного поля во всей внутренней области соленоида при неизменяющемся во времени магнитном поле. Для поиска приемлемой конфигурации соленоида процедура оптимизации распределения плот-



Рис. 2. Модель соленоида с тремя торцевыми секциями Fig. 2. A model of the solenoid end part with 3 separate sections

ности тока в обмотке была применена к моделям магнита с различными значениями этого радиуса. Характерный пример решения, соответствующего радиусу R = 120 мм, показан на рис. 1*b*.

Максимальное значение радиальной составляющей плотности потока внутри области хорошего поля для этого варианта составляет Br / B =  $1.5 \cdot 10^{-4}$ , что заметно меньше максимально допустимого значения. Оптимальное распределение плотности тока для других значений радиуса *R*, которое варьировалось в диапазоне 80 мм < *R* < 150 мм, также обеспечивает требуемое качество поля.

В реальной обмотке соленоида практически невозможно обеспечить требуемые значения средней плотности тока одновременно в нескольких торцевых секциях катушки. Поэтому целью второго этапа оптимизации формы катушки было упрощение ее структуры. Распределение плотности тока в обмотке, показанной на рис. 1b, имеет несколько важных особенностей: а) в торцевой части обмотки магнита мы видим область с плотностью тока, меньшей приблизительно на 5% по отношению к центральной части соленоида; б) в центральных сегментах торцевой части катушки плотность тока достигает уровня около 7,5 A/мм<sup>2</sup> и превышает среднее значение почти на 60%; в) во внутренних сегментах обмотки плотность тока снова выходит на уровень ниже среднего. Пониженная плотность тока в отдельных областях катушки на практике может быть смоделирована путем введения определенных зазоров между соседними секциями. Повышенная средняя плотность тока внутри катушки может быть достигнута путем использования провода с поперечным сечением, которое меньше поперечного сечения кабеля в основной катушке. Для создания реальной обмотки предполагается использовать проводник квадратного сечения с круглым каналом для водяного охлаждения. Для основной катушки магнита мы выбрали кабель сечением 10×10 мм<sup>2</sup> и толщиной изоляции 0,25 мм. Средняя плотность тока в соответствующей обмотке около 4,5 А/мм<sup>2</sup> может быть обеспечена током в проводнике i = 500 А.

В соответствии с общим характером распределения плотности тока, полученного для идеализированной модели соленоида и показанного на рис. 1*b*, мы решили разделить торцевую часть обмотки соленоида на 3 секции. Предполагается, что две из них, первая и последняя, намотаны тем же проводником, что и основная обмотка. Для промежуточного участка был выбран проводник с меньшим поперечным сечением  $8,25 \times 8,25$  мм<sup>2</sup>. Предполагается, что ток во всех секциях обмотки одинаков, соответственно, функционирование установки обеспечивается одним источником питания. Общая радиальная ширина всех элементов катушки равна одному и тому же значению  $\Delta r = 185$  мм. Этот размер соответствует 10-слойной основной обмотке (включая 0,25 мм изоляцию кабеля) и 12-слойной катушке, намотанной проводником сечением  $8,25 \times 8,25$  мм<sup>2</sup>. Количество радиальных слоев и их положение в различных секциях катушки были оптимизированы для достижения наилучшего качества поля в апертуре соленоида. Соответствующая серия численных экспериментов была выполнена с привлечением как программы MULTIMAG, так и программы расчета электромагнитных полей OPERA 3D компании COBHAM. Математическая модель торцевой части магнита показана на рис. 2.

#### Результаты расчета характеристик магнитного поля в апертуре магнита

Оптимизация положения секций обмотки соленоида были произведены для различных значений радиуса окна в торцевом ферромагнитном экране соленоида. Полученные результаты представлены на рис. 3.

Исходя из основных свойств представленной зависимости, можно сделать заключение, что приемлемым диапазоном изменения этого параметра является интервал 100 мм < R < 135 мм. Нижний предел определяется внутренним диаметром центральной части конструкции магнита.

Разрабатываемый магнит предполагается использовать в условиях изменяющегося во времени магнитного поля в апертуре со скоростью нарастания до dB/dt = 20 T/c. Простые оценки и результаты двухмерного моделирования переходных процессов показывают, что вихревые токи, индуцируемые в проводящем ферромагнитном экране, существенно изменяют распределение магнитного поля в рабочем пространстве магнита. Рассмотрим это влияние более подробно. В двумерной модели соленоида экран состоит из двух торцевых пластин с центральными отверстиями и цилиндрической трубы, соединяющей эти пластины (обратный магнитопровод). Торцевые пластины проводят магнитный поток от осевой части магнита к внешнему экрану. Для уменьшения амплитуды вихревых токов эти элементы конструкции необходимо делать шихтованными. Но даже в этом случае значительные по величине вихревые токи возникают в плоскости шихтовки, поскольку магнитный поток частично входит в торцевые пластины в осевом направлении. Для ограничения величины этих токов до приемлемого уровня предлагается сконструировать торцевые экраны из двух полуколец каждый, как это показано на рис. 4.

Моделирование переходных процессов в магните с такой конструкцией торцевых пластин демонстрирует значительное уменьшение возмущения магнитного поля в апертуре соленоида. Как показывает численное моделирование, величина магнитного поля, наведенного в рабочей области магнита вихревыми токами, существенно зависит от радиуса отверстия в ферромагнитном экране. Очевидно, чем больше этот радиус, тем меньше возмущающее магнитное поле.

Влияние этого эффекта на качество магнитного поля иллюстрирует распределение, приведенное на рис. 5. Этот график показывает, что допустимые значения радиуса R превышают значение  $R \approx 120$  мм. Сопоставление распределений, приведенных на рис. 3 и рис. 5 позволяет выбрать возможный диапазон изменения параметра R: 120 мм < R < 130 мм.

Очевидно, что расчеты вихревых токов в рассматриваемой модели магнита могут быть выполнены только с использованием программ трехмерного моделирования электромагнитных полей. В настоящей работе для этих расчетов использовался программный модуль OPERA 3D – ELECTRA.

Обратный магнитопровод магнита влияет на качество магнитного поля в апертуре в меньшей степени. Тем не менее, к нему также предъявляется ряд требований: 1) ярмо должно быть ших-тованным, в частности, для сокращения потерь в этой части магнитопровода и предотвращения его перегрева; 2) общая площадь поперечного сечения должна быть достаточной для того, чтобы



Рис. 3. Максимальное значение радиальной компоненты индукции магнитного поля в зависимости от радиуса отверстия в экране

Fig. 3. Dependence of the maximum value of the flux density radial component on the radius of the hole in the end plate



Рис. 4. Конструкция торцевой пластины ферромагнитного экрана Fig. 4. A structure of the ferromagnetic end plate

пропустить через него индуцируемый магнитный поток без насыщения ферромагнитного материала. Наилучшей возможностью обеспечить эти свойства является компоновка магнитопровода из нескольких шихтованных стальных стержней прямоугольного сечения. Соответствующая математическая модель соленоидального магнита была подробно исследована. Полученные в результате оптимизации конструкции ферромагнитного экрана распределения радиальной составляющей магнитного поля для различных скоростей изменения тока в обмотке приведены на рис. 6. Они показывают, что максимальные отклонения индукции магнитного поля от среднего значения не превышают максимально допустимых значений как для случая относительно высокой скорости изменения магнитного поля, так и для статического режима.



Рис. 5. Влияние вихревых токов на радиальную компоненту индукции магнитного поля в апертуре магнита Fig. 5. Influence of the eddy currents on the flux density radial component in the magnet aperture



Рис. 6. Координатная зависимость радиальной компоненты индукции магнитного поля на границе области хорошего поля для различных скоростей изменения индукции магнитного поля в 3-мерной модели магнита Fig. 6. Distribution of the flux density radial component along the border of the good field area for different rates of the magnetic field variation in a 3D magnet model

#### Обсуждение

Исследованный магнит соленоидного типа, является ключевым элементом электронной линзы, предназначенного для установки в проектируемом ускорителе проекта FAIR. В процессе оптимизации размеров и формы основных элементов конструкции магнитной системы было показано, что условие высокой однородности магнитного поля в апертуре (Br/B <  $5 \cdot 10^{-4}$ ) накладывает противоречивые требования на конструкцию торцевых частей соленоида. В частности, уменьшение диаметра выходного окна ферромагнитного экрана улучшало качества поля в статическом режиме и одновременно ухудшало его в условиях осцилляций рабочего тока. Благодаря разделению экрана на электрически изолированные фрагменты удалось снизить негативное влияние вихревых токов и обеспечить требуемое качество магнитного поля во всех предполагаемых режимах работы рассматриваемого магнита. Как показали численные эксперименты, важную роль в обеспечении интегральной и локальной однородности магнитного поля играет и правильный выбор характеристик внешнего магнитного экрана, который неявно оказывал заметное влияние на распределение характеристик магнитного поля в апертуре при постоянном и переменном токе обмоток возбуждения.

#### Заключение

В итоге оптимизация катушки и системы экранирования, проведенная как для двухмерной, так и для трехмерной моделей соленоида, позволила удовлетворить всем требованиям к качеству магнитного поля в рабочей зоне. Предложенная конструкция торцевых пластин и обратного магнитопровода соленоида обеспечила приемлемые значения радиальной составляющей индукции магнитного поля как в статическом, так и динамическом режимах его работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Вольник Г. Оптика заряженных частиц: СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 280 с.

[2] **Bai Y., Price J.S., Safdar A., Neculaes B.** Design of shielded solenoids for Charged particle beam application, IEEE trans. On Applied Superconductivity, 30(4) (2020), # 4003104.

[3] Anerella M., Fischer W., Gupta R., Jain A., Joshi P., Kovach P., Marone A., Pikin A., Plate S. Mechanical Design and Construction of Superconducting e-Lens Solenoid Magnet System for RHIC Head-on Beam-Beam Compensation, IEEE trans. On Applied Superconductivity, 24(3) (2014), # 4100505.

[4] **Gu S.X., et. al.** Electron lenses for head-on beam-beam compensation in RHIC, Physical Review Accelerators and Beams, 20, (2017), DOI: 10.1103/ Phys Rev Accel Beams. 20.023501.

[5] Kalimov A., Muhle C., Ondreka D., K-Schulte-Urlichs, Spiller P. Optimization of a Solenoid for an Electron Lens in SIS18, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 30(4) (2020), # 4001404.

[6] **Spiller P., et. al.** Status of the FAIR Project, IPAC 2018: Proceedings of the 9<sup>-th</sup> International Accelerator Conference (2018) 63–68.

[7] **Kester O., Spiller P., Stoecker H.** FAIR project at GSI, In book: Challenges and Goals for Accelerators in the XXI Century. World Scientific Publishing, Singapore, (2016).

[8] **Таряник Н.В., Варюхин Д.В., Федюк Д.О.** Сверхпроводниковая магнитная система с однородным магнитным полем // Физика и техника высоких давлений 2018. Т. 28, № 3, С. 113–139.

[9] Соловьев К.В. Идеально фокусирующие системы с однородными магнитными полями // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. № 4. С. 102–109.

[10] Семенов Е.С., Юнаковский А.Д. Расчет статического магнитного поля системы соленоидов // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2010. Т. 53. № 12, С. 799–802.

[11] Бинс П.Дж., Лауренсон П.Дж. Анализ и расчет электрических и магнитных полей: М.: Энергия, 1970. 376 с.

[12] Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике: М.: Мир, 1975. 542 с.

[13] Kalimov A., Leibrock H., Muehle C., Nalimov P. "Optimization of the Radiation Resistant Quadrupole Magnets for the SIS100 Accelerator of the FAIR Project". IEEE Trans. on Applied Superconductivity. -2018.  $-V. 28. - N_{\odot} 3, \# 10.1109/TASC.2018.2795534$ .

[14] Коровкин Н.В., Потиенко А.А., Чечурин В.Л. Обратные задачи в электротехнике и их численное решение: СПб: Нестор, 2003. 155 с.

[15] Бахвалов Ю.А., Горбатенко Н.И., Гречихин В.В., Юфанова А.Л. Проектирование оптимальных электромагнитов систем магнитной левитации и боковой стабилизации наземного транспорта на основе решения обратных задач // Электротехника. 2017. Т. 88. № 1. С. 43–47.

[16] Доронин М.В., Грешняков Г.В., Коровкин Н.В. Магнитные экраны специальной конструкции // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23 № 1. С. 124–133.

[17] Калимов А.Г., Налимов П.В., Горбунова С.В. Оптимизация формы полюса в мультипольных магнитах // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 2. С. 94–103.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**КАЛИМОВ Александр Гелиевич** – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук. E-mail: alexanderkalimov@gmail.com

**ВАЖНОВ Сергей Александрович** — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени. E-mail: seva\_011249@mail.ru

**ГОВОР Владислав Михайлович** — аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени. E-mail: pwnway@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 16.02.2021

#### REFERENCES

[1] H. Wollnik, Optics of Charged Particles, Academic Press, 1987.

[2] **Y. Bai, J.S. Price, A. Safdar, B. Neculaes,** Design of shielded solenoids for Charged particle beam application, IEEE trans. On Applied Superconductivity, 30(4) (2020), # 4003104.

[3] M. Anerella, W. Fischer, R. Gupta, A. Jain, P. Joshi, P. Kovach, A. Marone, A. Pikin, S. Plate, Mechanical Design and Construction of Superconducting e-Lens Solenoid Magnet System for RHIC Head-on Beam-Beam Compensation, IEEE trans. On Applied Superconductivity, 24(3) (2014), # 4100505.

[4] S.X. Gu et. al., Electron lenses for head-on beam-beam compensation in RHIC, Physical Review Accelerators and Beams, 20, (2017), DOI: 10.1103/ Phys Rev Accel Beams. 20.023501

[5] A. Kalimov, C. Muhle, D. Ondreka, K-Schulte-Urlichs, P. Spiller, Optimization of a Solenoid for an Electron Lens in SIS18, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 30(4) (2020), # 4001404.

[6] **P. Spiller et. al.**, Status of the FAIR Project, IPAC 2018: Proceedings of the 9<sup>-th</sup> International Accelerator Conference (2018) 63–68.

[7] **O. Kester, P. Spiller, H. Stoecker,** FAIR project at GSI, In book: Challenges and Goals for Accelerators in the XXI Century. World Scientific Publishing, Singapore, (2016).

[8] **N.V. Taryanik, D.V. Varyukhin, D.O. Fedyuk,** Sverkhprovodnikovaya magnitnaya sistema s odnorodnym magnitnym polem // Fizika i tekhnika vysokikh davleniy 2018. T. 28, № 3, S. 113–139.

[9] **K.V. Solovyev,** Idealno fokusiruyushchiye sistemy s odnorodnymi magnitnymi polyami // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskiye nauki. 2020. T. 13. № 4. S. 102–109.

[10] Ye.S. Semenov, A.D. Yunakovskiy, Raschet staticheskogo magnitnogo polya sistemy solenoidov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radiofizika. 2010. T. 53,  $\mathbb{N}$  12, S. 799–802.

[11] **K.J. Binns, P.J. Lawrenson,** Analysis and Computation of Electric and Magnetic Field Problems, Pergamon Press, New York, 1973. [12] O.C. Zienkiewicz, The Finite Element Method in Engineering Science. Mcgraw Hill, London, 1971.

[13] A. Kalimov, H. Leibrock, C. Muehle, P. Nalimov, "Optimization of the Radiation Resistant Quadrupole Magnets for the SIS100 Accelerator of the FAIR Project". IEEE Trans. on Applied Superconductivity. -2018.  $-V. 28. - N_{\odot} 3, \# 10.1109/TASC.2018.2795534$ .

[14] **N.V. Korovkin, A.A. Potiyenko, V.L. Chechurin,** Obratnyye zadachi v elektrotekhnike i ikh chislennoye resheniye: SPb: Nestor, 2003. 155 s.

[15] Yu.A. Bakhvalov, N.I. Gorbatenko, V.V. Grechikhin, A.L. Yufanova, Proyektirovaniye optimalnykh elektromagnitov sistem magnitnoy levitatsii i bokovoy stabilizatsii nazemnogo transporta na osnove resheniya obratnykh zadach // Elektrotekhnika. 2017. T. 88.  $\mathbb{N}$  1. S. 43–47.

[16] **M.V. Doronin, G.V. Greshnyakov, N.V. Korovkin,** Magnitnyye ekrany spetsialnoy konstruktsii // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2017. T. 23. № 1. S. 124–133. M.V. Doronin, G.V. Greshnyakov, N.V. Korovkin, Magnet Shields Special design, St.-Petersburg Polytechnic University Journal: Natural sciences, 23(1) (2017) 124–133.

[17] A.G. Kalimov, P.V. Nalimov, S.V. Gorbunova, Optimizatsiya formy polyusa v multipolnykh magnitakh // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2018. T. 24,  $N_{2}$  2. S. 94–103. A.G. Kalimov, P.V. Nalimov, C.V. Gorbunova, Pole Shape Optimization in Multipole Magnets, St.-Petersburg Polytechnic University Journal: Natural sciences, 24(2) (2018) 94–103.

## THE AUTHORS

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

**VAZHNOV Sergey A.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.* E-mail: seva\_011249@mail.ru

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

Received: 16.02.2021

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021

DOI: 10.18721/JEST.27103 УДК 621.311.25.621.039

> А.В. Попов<sup>1</sup>, Е.Д. Федорович<sup>2</sup>, Е.Н. Кулаков<sup>1</sup>, И.Б. Денисова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОАО "Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова", Санкт-Петербург, Россия; <sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербургскии политехническии университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

# ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА КОНДЕНСАТНЫХ НАСОСОВ НА НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ПИТАТЕЛЬНЫХ НАСОСОВ В СХЕМЕ ЭНЕРГОБЛОКА БРЕСТ-ОД-300

Проведен анализ конденсатно-питательного тракта действующих зарубежных и отечественных атомных и тепловых электрических станций с бездеаэраторной тепловой схемой. Выполнено сравнение распологаемого кавитационного запаса питательного насоса действующих блоков с блоком с РУ БРЕСТ-ОД-300. Установлено, что количество КЭН-2 и ПЭН-1 на блоках с бездеаэраторными схемами согласовано. Произведен выбор предпочтительной схемы тракта. С использованием динамической модели энергоблока проведен расчет и анализ режима с отключением КЭН-2 без включения резервного. На основании результатов расчета выставлены требования к характеристике КЭН-2 при их согласованном количестве. По характеристикам, полученным от заводов-изготовителей, выполнен расчет режима с отключением конденсатного насоса без включения резервного при их согласованном количестве. Использование динамической модели энергоблока делает возможным еще до строительства станции оценивать надежность оборудования в режимах с нарушением работы оборудования. На основании результатов расчетов обосновано использование согласованного количества ПЭН-1 и КЭН-2.

*Ключевые слова:* АЭС, надежность, питательный насос, кавитационный запас, бездеаэраторная тепловая схема, динамическая модель.

#### Ссылка при цитировании:

Попов А.В., Федорович Е.Д., Кулаков Е.Н., Денисова И.Б. Влияние количества конденсатных насосов на надежность работы питательных насосов в схеме энергоблока БРЕСТ-ОД-300 // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 1. С. 31–40. DOI: 10.18721/JEST.27103

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

> A.V. Popov<sup>1</sup>, E.D. Fedorovich<sup>2</sup>, E.N. Kulakov<sup>1</sup>, I.B. Denisova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Joint-Stock Company "I. I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment", St. Petersburg, Russia; <sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

# INFLUENCE OF NUMBER OF ELECTRIC CONDENSATE PUMPS ON FEEDWATER PUMP OPERATING RELIABILITY IN THE BREST-OD-300 POWER UNIT CIRCUIT

The paper presents an analysis of a condensate-feedwater system of foreign and domestic nuclear and thermal power plants with a closed-feed cycle. This analysis includes a comparison of the available cavitation reserve of feedwater pumps (FWPs) of operating units with that of BREST-OD-300. We established that the number of electric condensate pumps (ECPs) on closed-feed cycle units is equal to the number of FWPs. A preferable system cycle was selected. We used a dynamic model of the BREST-OD-300 power unit to calculate and analyze the mode with failure of the ECP-2 without switching on the reserve pump. Based on the calculation results, we formulated certain characteristics requirements ECP-2 should meet in case their number agrees with that of FWPs. According to the characteristics obtained from the manufacturers, a calculation was made for the same ECP failure mode with an ECP-and-FWP number ratio equal to one. The use of the dynamic model of a power unit makes it possible to assess the reliability of equipment in modes with equipment failure even before the construction of the plant. Based on the study results, it is clear that the number of ECPs of the BREST-OD-300 unit should be no less than the number of FWPs.

Keywords: NPP, reliability, feedwater pump, cavitation reserve, closed-feed cycle, dynamic model.

#### Citation:

A.V. Popov, E.D. Fedorovich, E.N. Kulakov, I.B. Denisova, Influence of number of electric condensate pumps on feedwater pump operating reliability in the BREST-OD-300 power unit circuit, Materials Science. Power Engineering, 27 (01) (2021) 31–40, DOI: 10.18721/JEST.27103

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

**Введение.** В настоящее время рядом организаций разрабатывается проект реакторной установки на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем (РУ БРЕСТ-ОД-300). Поскольку данный блок является опытно-демонстрационным, главная его функция заключается в отработке новых технологий, связанных с использованием в качестве теплоносителя свинца [1–3], следовательно, вопрос экономичности отодвигается на второй план.

Использование в качестве теплоносителя первого контура жидкого свинца накладывает ряд эксплуатационных ограничений, одним из которых является минимальная температура подачи питательной воды в прмоточный ПГ [4, 5], которая должна быть не менее 335 °C во всех режимах работы блока. Для обеспечения данного условия OAO «ВТИ» была предусмотрена бездеаэраторная тепловая схема с установкой смешивающего подогревателя питательной воды (СППВ) с давлением Ps = 15 МПа (ts = 342 °C) перед парогенератором [6, 7]. Этот подогреватель также играет роль емкости запаса питательной воды перед парогенератором, что обусловило необходимость установки питательного насоса второго подъема за СППВ. Поскольку электроприводные насосы на такие высокие параметры отсутствуют, было предложено применение питательного насоса с гидротурбинным приводом (ПГТН), использующего в качестве силовой воды воду с напорного коллектора питательного насоса с электроприводом (ПЭН-1). Как итог, конденсатные электронасосы второго подъема (КЭН 2) выполняют роль бустерного насоса для ПЭН-1 и 2-х ПГТН.

Поскольку АЭС является ядерно опасным объектом, крайне важно обеспечить надежность и безопасность при производстве электрической энергии. Создание модели, имитирующей работу станции, позволяет проводить анализ процессов, протекающих в оборудовании энергоблока при различных режимах работы еще на стадии проектирования, что позволяет снизить затраты на натурные испытания.

**Цель работы** — определение необходимых с точки зрения надежности конденсатно-питательного тракта характеристик насосной группы КЭН 2 путем проведения динамического расчета энергоблока с перспективной РУ БРЕСТ ОД 300.

#### Бездеаэраторные схемы АЭС

Родоначальниками применения бездеаэраторных схем в тепловой энергетике являются американские турбостроительные фирмы. Отсутствие деаэратора было обусловлено тем, что деа-

эрация основного конденсата выполнялась в конденсаторе до требуемого содержания кислорода не более 10 мг/кг. При развитии атомной энергетики в США, следуя традициям тепловой энергетики, стали также применять на АЭС бездеаэраторные тепловые схемы. Но в 1979 году на АЭС «ТМІ» произошла самая большая на то время авария с частичным расплавлением активной зоны реактора и выбросом радиоактивного загрязнения в окружающую среду. Исходным событием этой аварии было ошибочное закрытие арматуры на входе и выходе фильтров конденсатоочистки, вследствие чего отключились последовательно расположенные конденсатные и питательные насосы.

## Таблица 1

## Основные результаты анализа КПТ бездеаэраторных схем

Table 1

Параметр			Величина				
АЭС/ТЭС	Kashiwazaki- Kariwa	Palo Verde	Surry	БРЕСТ-	-ОД-300	Кашир ГРЗ	оская ЭС
Блок	5,6	1,2,3	1,2			3	
Разработчик РУ	GE/Toshiba/ Hitachi	CE	Westinghouse	ник	ИЭТ	_	
Тип РУ	ABWR	PWR	PWR	Б	Р	_	
Электрическая мощность блока, MBт	1356	1412	838	305,6	305,7	33	0
Температура ПВ перед ПЭН/ТПН	154,9	174,7	188,2	198,1	200,2	18	8
Давление на всасе ПЭН/ТПН, МПа	2,20	1,85	2,83	2,15		1,74	1,98
Давление на всасе ПЭН/ТПН, МПа	0,54	0,89	1,21	1,49	1,56	1,2	0
Распологаемый	1,66	0,96	1,62	0,66	0,59	0,54	0,78
кавитационный запас, МПа	185	11	188	77	69	62	91
Схема КЭН	2 + 1	2 + 1	2 + 1	2 + 1	2 + 1	2 + 1	3 + 0
Тип привода ПН	ТПН	ТПН	ТПН	ПЭ	ЭН	ТПН	
Схема ПЭН/ТПН	2 ТПН+2 ПЭН	2 + 0	2 + 0	3+	-1	ТПН+	ПЭН
Закачка дренажа на всас ПЭН/ТПН	+	+	+	+	+	+	
Дренаж	КГП ПВД-5,6	КГП ПВД-5,7+ сепарат СПП	Сепарат СПП+КГП ПНД-5	ПГТН+ КГП ПВД-6	КГП ПП-2 + ПГТН + КГП ПВД-6	КГП П	ІВД-7
Наличие дренажного бака	+	+	+	_	_		
Способ закачки	СКЭН	СКЭН	СКЭН	б/н	б/н	б/1	н

#### Main analysis results of closed-feed water schemes FWCS

Отсутствие подачи воды в прямоточные парогенераторы, нарушения в работе САОР и ошибки операторов привели к аварии 5 уровня по международной шкале ядерных событий. Затраты на

ликвидацию последствий аварии составили ~ 1 млрд. \$ [8]. После этой аварии до 2012 г. на территории США не было выдано ни одной новой лицензии на сооружение АЭС. В дальнейшем, блоки, получившие лицензии NRC на сооружение, были спроектированы с деаэраторами [9, 10] – АЭС «Vogtle»-3,4 (AP1000) и «North-Anna»-3 (ESBWR).

ОАО «НПО ЦКТИ» провело анализ конденсатно-питательного тракта (КПТ) действующих АЭС США разных разработчиков РУ и отечественных ТЭС с внедрёнными бездеаэраторными схемами [11–15]; основные результаты этого анализа представлены в табл. 1.

Основные выводы анализа:

 количество конденсатных и питательных насосов на блоках с бездеаэраторными схемами взаимосогласовано;

– располагаемый кавитационный запас питательного насоса на действующих блоках превышает такой для БРЕСТ-ОД-300 до 2,7 раз. Из-за низкого кавитационного запаса турбопитательного насоса (ТПН) на блоке №3 Каширской ГРЭС в работе на номинальной мощности находится 3 КЭН-2 [13] (работа без резерва);

– на блоках АЭС с бездеаэраторными схемами как с BWR, так и с PWR, разработанными американскими фирмами, закачка дренажей в тракт перед питательными насосом выполняется из дренажного бака сливным насосом, а не самотеком через смеситель (со смешением двухфазной среды с основным конденсатом), как на отечественных ТЭС;

– температура основного конденсата перед питательным насосом на действующих блоках не превышает 190 °C (давление насыщения Ps = 1,26 МПа, что близко к давлению в деаэраторах современных блоков АЭС – 1,2÷1,3 МПа).

#### Выбор предпочтительной схемы тракта

Балансовый расчёт тепловой схемы турбоустановки К-300-15,7/50 был выполнен для РУ БРЕСТ для двух вариантов схем слива конденсата греющего пара ПП-2: в ПВД-6 и смеситель перед ПЭН-1. Согласно результатам расчёта, мощность генератора при использовании схемы со смесителем повышается на ~ 100 кВт, однако при этом растёт потребляемая мощность ПЭН-1 на 130 кВт, что вызвано увеличением удельного объёма питательной воды. Мощность СКЭН снижа-



Рис. 1. Балансовая схема K-300-15,7/50 РУ БРЕСТ-ОД-300: сброс конденсата греющего пара ПП-2 в ПВД-6 Fig. 1. Heat balance diagram of K-300-15,7/50 reactor unit BREST-OD-300: reheater-2 drains to HPH-6

ется на 24 кВт при условии сохранении постоянства КПД. Таким образом при реализации схемы со смесителем ожидать увеличения мощности нетто и, соответственно, выработки электроэнергии, не приходится. При этом имеются негативные последствия в части снижения располагаемого кавитационного запаса ПЭН-1 (табл. 2). Исходя из вышесказанного, для расчета был выбран более предпочтительный вариант тепловой схемы второго контура – со сливом КГП ПП-2 в ПВД-6.

#### Таблица 2

#### Параметры основного конденсата во всасывающем коллекторе ПЭН-1

Table 2

Попомот	Вариант схемы слива КГП ПП-2						
Параметр	Слив в смеситель	Слив в ПВД-6					
Температура ОК в ВК ПЭН-1, °С	200,2	198,1					
Давление во ВК ПЭН-1, МПа	~ 2,15*						
Давление насыщения, МПа	1,56	1,49					
	0,59	0,66					
Располагаемый кавитационный запас ПЭН 1, МПа/м	69	77					
* — возможно снижение давления до 40 кПа за счёт установки дополнительного смесителя в соответствующей							

## FWP-1 inlet collector main condensate parameters

схеме.

#### Выбор характеристики КЭН-2

Изначально было заложено в проектную документацию использование насосов КЭН-2 по схеме 2+1 – 2 в работе, один в резерве. Далее при детальном анализе прохождения режима отключения КЭН-2 без включения резервного насоса с целью недопущения отключения ПЭН-1 по давлению во всасывающем коллекторе было предложено использовать схему 3+1 КЭН 2. Напорная характеристика должна соответствовать следующим требованиям:

Напор насоса в безрасходном режиме Но = 260 м;

Напор насоса в номинальном режиме Нн = 240 м.

Заводами-изготовителями было предложено 2 варианта характеристики (прототип А и Б), представленные на рис. 2

#### Результаты расчета

Разработка модели энергоблока и расчеты велись в среде динамического моделирования ПО SimInTech с интегрированным кодом TPP<sup>1</sup>, используемый для моделирования динамических процессов в сложных теплогидравлических сетях и оборудовании ТЭС и АЭС. SimInTech позволяет создавать комплексную модель за счет ее разбиения на пакет проектов, которые обмениваются между собой сигналами через базу данных.

Сценарий для данного режима следующий. По факту отключения одного КЭН-2 без ABP через 5 с (2 с задержка на запаздывание в цепи управления + 3 с на разворот) на блоке формируется режим БУСМ 2 — тепловая мощность реактора снижается со скоростью ~ 1%/с до 50% Qном с соответствующим снижением заданного расхода свинца через активную зону до 57,1% Gном. Мощность турбины снижается действием САРЗ, которая в режиме «РДС» поддерживает давление в ГПК ~ 16,5 МПа. Питательные насосы отключались по давлению за ЦВД, соответствующему мощности 50 % Qном, для снижения скорости изменения температуры свинца и, следовательно, активной зоны.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Программа «ТРР» для моделирования нестационарных и установившихся процессов в энергетическом оборудовании ТЭЦ: Отчет о НИР/ НПЦ «ПРИОРИТЕТ» инв. № НТО001/1997. Руководитель: не ук. – М.,1997.– 46 с.



Рис. 2. Напорные характеристики насосов КЭН-2 Fig. 2. Pressure head characteristics of ECP-2

Согласно проведенным расчётам снижение располагаемого кавитационного запаса при отключении КЭН-2 со схемой 2+1 составило 0,13 МПа. При этом стоит отметить, что значение провала давления сильно зависит от исходного состояния блока перед отключением насоса, а именно от положения регулирующего клапана уровня КСБ и СППВ. Первоначально уставка защиты по отключению ПЭН-1 по кавитационному срыву была принята 0,1 МПа (12 м) с выдержкой по времени 5 секунд в связи с отсутствием технического проекта ПЭН 1. В дальнейшим при поступлении предложений от потенциальных поставщиков минимальный располагаемый кавитационный запас был принят в диапазоне от 13 м (0,11 МПа) до 30 м (0,26 МПа). Причём минимальное значение было для предложения с отдельным бустерным насосом (со своим двигателем), что неприемлемо для бездеаэраторной схемы, где роль бустерного насоса выполняет КЭН-2.

Таблица 3

## Параметры КПТ при прохождении режима

Table 3

Пополот	Количество насосов					
Параметр	2 + 1	3 + 1 прототип А	3 + 1 прототип В			
Температура ПВ во ВК ПЭН-1, °С	198,1					
Провал давления во ВК ПЭН-1, МПа	1,64	1,81	1,97			
	0,13	0,30	0,46			
Располагаемый кавитационный запас, МПа/м	15	35	55			
Дополнительные операции	Блокировка РК уровня СППВ	Нет	Нет			

#### FWCS parameters due to analyzed mode

Параметры и переходный процесс в конденсатно-питательном тракте в зависимости от типа насоса КЭН-2 представлены в табл. 3 и на рис. 3, соответственно. На 10 с расчета после отключения насоса происходит снижение давление во всасывающем коллекторе ПЭН-1, что обусловлено взятием нагрузки рабочими насосами. Давлейший рост давления по схеме 3+1 КЭН-2 обуслов-


Рис. 3. Давления во всасывающем коллекторе ПЭН-1 для различных характеристик КЭН 2 Fig. 3. Pressure in FWP-1 collector for different characteristics of ECP-2

лен прикрытием клапана уровня СППВ из-за разгрузки энергоблока и отсутствием на нем блокировок по прохождению режима.

#### Заключение

Исходя из данных проведенного расчета, использование согласованной схемы КЭН-2 и ПЭН-1 значительно повышает надежность конденсатно-питательного тракта. Кроме того, для возможности прохождения режима по схеме 2+1 КЭН-2 приходится вводить дополнительные блокировки, в частности блокировку регулирующего клапана уровня СППВ, с целью недопущения перегрузки оставшегося в работе КЭН-2 и последующего его отключения.

При согласованном количестве насосов КЭН-2 и ПЭН-1 снижение располагаемого кавитационного запаса ПЭН-1 составляет 0,30 и 0,46 МПа для прототипа А и В, соответственно. Эти значения превышают значение уставки по отключению ПЭН-1 по кавитационному срыву, а также не требуют введения дополнительных блокировок, что обеспечивает надежную работу КПТ в режиме с отключением КЭН-2 без АВР.

#### Список использованных сокращений

ABWR – advanced boiling water reactor; BWR – boiling water reactor; CE – Combustion Engineering; ESBWR – economic simplified boiling water reactor; FWCS – feedwater-condensate system; FWP – feedwater pump; GE – General Electric; HPH – high-pressure heater; ECP – electric condensate pump;

NRC – nuclear regulation commission;

PWR – pressurized water reactor;

W – Westinghouse;

АВР – автоматический ввод резерва;

АЭС – атомная электрическая станция;

БУСМ – быстрое управляемое снижение мощности;

ГПК – главный паровой коллектор;

ГРЭС – государственная районная электрическая станция;

КГП – конденсат греющего пара;

КПТ – конденсатно-питательный тракт;

КСБ – конденсато-сепаратосброник ПНД-4 и сепаратора СПП;

КЭН – конденсатный электронасос;

ПВД – подогреватель высокого давления;

 $\Pi\Gamma$  – парогенератор;

ПГТН – питательный насос с гидроприводом;

ПЭН – питательный электронасос;

РК – регулирующий клапан;

РУ – реакторная установка;

САОР – система аварийного охлаждения реактора;

САРЗ – система автоматического регулирования и защиты турбины;

СКЭН – насос закачки дренажа КСБ в конденсатный тракт;

СППВ – смешивающий подогреватель питательной воды высокого давления;

ТПН – турбопитательный насос;

ТЭС – тепловая электрическая станция;

ЦВД – цилиндр высокого давления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Рачков В.И., Сорокин А.П., Жуков А.В.** Теплогидравлические исследования жидкометаллических теплоносителей в ядерных энергетических установках // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56. №1. С. 121–136.

[2] Алексахин Р.М., Спирин Е.В., Соломатин В.М., Спиридонов С.И. Некоторые экологические аспекты сооружения опытно-демонстративного энергокомплекса в проекте «Прорыв» // Атомная энергия. 2016. Т. 120. № 6. С. 312–318.

[3] **Лемехов В.В., Саркулов М.К.** Пассивные элементы безопасности для реакторных установок со свинцовым теплоносителем // Энергетик. 2017. №1. С. 8–11.

[4] Семченков А.А., Чеков М.Е., Васильев С.В., Кузьминов Ю.В. Парогенератор РУ БРЕСТ-ОД-300: Расчетно-экспериментальное обоснование // Вопросы атомной науки и техники. Обеспечение безопасности АЭС. 2016. № 36. С. 33–37.

[5] Блохина А.Н., Лякишев С.Л., Зубченко А.С. Вертикальные парогенераторы отечественных и зарубежных реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем // Тяжелое машиностроение. 2016. № 7–8. С. 21–28.

[6] Валамин А.Е., Култышев А.Ю., Шибаев Т.Л., Гольдберг А.А., Степанов М.Ю. Деаэраторная и бездеаэраторная тепловые схемы паротурбинных установок с турбинами Т 250/300-23.5 // Теплоэнергетика. 2016. № 11. С. 27–30. [7] **Тарасов Е.В., Жинов А.А.** Оптимизация бездеаэратоной тепловой схемы паротурбинной установки с теплообменными аппаратами смешивающего типа // Электронный журнал: наука, техника и образование. № 2 (12) 2017. С. 56–63.

[8] 14-Year Cleanup at Three Mile Island Concludes // NY Times, 1993, August 15.

[9] ESBWR design control document. Rev. 10. – Tier 2 Chapter 10 Steam and Power Conversion System – USA.: GE, 2011.

[10] Westinghouse AP1000 Design Control Document Rev. 19 – Tier 2 Chapter 10 – Steam and Power Conversion System – USA.: W, 2011.

[11] Palo Verde Nuclear Generating Station. Updated FSAR. Heat balance at guaranteed power. Revision 19. – USA.: Palo Verde Nuclear Generating Station, 2017.

[12] Surry 1 & 2 heat balance diagram 2451.6 MWt load. – USA.: Virginia Power Company, 1985.

[13] Авруцкий Г.Д. и др. Опыт эксплуатации бездеаэраторной тепловой схемы блока 330 МВт ст. № 3 Каширской ГРЭС // Электрические станции. № 6. 2012. С. 22–26.

[14] **Туркин А.Д. и др.** Исследование работы питательных насосов бездеаэраторной тепловой схемы турбоустановки К-300-240 ЛМЗ // Электрические станции. № 12. 1983.

[15] Ефимочкин Г.И. Бездеаэраторные схемы паротурбинных установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПОПОВ Алексей Валентинович** — инженер 3-й категории, ОАО "Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова", без степени. E-mail: alex-origami@yandex.ru

**ФЕДОРОВИЧ Евгений Данилович** — профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук. E-mail: efed1@yandex.ru

**КУЛАКОВ Егор Николаевич** — инженер 3-й категории, ОАО "Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова", без степени. E-mail: KulakovEN@ckti.ru

**ДЕНИСОВА Ирина Борисовна** — студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени. E-mail: vol4atka67@list.ru

#### Дата поступления статьи в редакцию: 11.02.2021

#### REFERENCES

[1] **V.I. Rachkov, A.P. Sorokin, A.V. Zhukov,** Thermal hydraulic studies of liquid metal coolant in nuclear power facilities. High Temperature, 56 (1) (2018) 121–136.

[2] **R.M. Aleksakhin, Ye.V. Spirin, V.M. Solomatin, S.I. Spiridonov,** Environmental aspects of a pilot power complex in project breakthrough. Atomic Energy, 120 (6) (2016) 312–318.

[3] V.V. Lemekhov, M.K. Sarkulov, Passive safety components for lead-cooled reactor facilities // Energetik, 1 (2017) 8–11.

[4] A.A. Semchenkov, M.Ye. Chekov, S.V. Vasilyev, Yu.V. Kuzminov, Steam generator RF BREST-OD-300: Calculation and experimental justification, Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Obespecheniye bezopasnosti AES, 36 (2016) 33–37.

[5] **A.N. Blokhina, S.L. Lyakishev, A.S. Zubchenko,** Vertical steam generators of domestic and foreign reactor plants with liquid-metal coolant. Heavy engineering, 7–8 (2016) 21–28.

[6] **A.Ye. Valamin, A.Yu. Kultyshev, T.L. Shibayev, A.A. Goldberg, M.Yu. Stepanov,** Deaerator and deaeratorless thermal diagrams of steam turbine plants with T 250 / 300-23.5 turbines, Teploenergetika, 11 (2016) 27–30.

[7] **Ye.V. Tarasov, A.A. Zhinov,** Optimization of the thermal scheme of a steam turbine plant without the dearator with mixing-type heat exchanger. Electronic journal: science, technology and education, 2 (12) (2017) 56–63.

[8] 14-Year Cleanup at Three Mile Island Concludes, NY Times, August 15, 1993.

[9] ESBWR design control document. Rev. 10, Tier 2 Chapter 10 Steam and Power Conversion System, USA, GE, 2011.

[10] Westinghouse AP1000 Design Control Document Rev. 19, Tier 2 Chapter 10, Steam and Power Conversion System, USA, W, 2011.

[11] Palo Verde Nuclear Generating Station. Updated FSAR. Heat balance at guaranteed power. Revision 19, USA, Palo Verde Nuclear Generating Station, 2017.

[12] Surry 1 & 2 heat balance diagram 2451.6 MWt load, USA, Virginia Power Company, 1985.

[13] **G.D.** Avrutskiy and other, Operating experience of unit 3 of 330 MW absence of deaerator thermal scheme at kashira GRES, Electrical stations. 6 (2012) 22–26.

[14] **A.D. Turkin and other,** Issledovaniye raboty pitatelnykh nasosov bezdeaeratornoy teplovoy skhemy turboustanovki K-300-240 LMZ [Investigation of the operation of feed pumps of the deaerator-free thermal circuit of the K-300-240 LMZ turbine unit], Electrical stations. 12 (1983).

[15] G.I. Yefimochkin, Deaeratorless schemes of steam turbine plants, Moscow, Energoatomizdat, 1989.

## THE AUTHORS

**POPOV Aleksey V.** – Joint-Stock Company "I.I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment". E-mail: alex-origami@yandex.ru

**FEDOROVICH Evgeniy D.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.* E-mail: efed1@yandex.ru

**KULAKOV Egor N.** – Joint-Stock Company "I.I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment". E-mail: KulakovEN@ckti.ru

**DENISOVA Irina B.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.* E-mail: vol4atka67@list.ru

Received: 11.02.2021

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021

# Металлургия и материаловедение

DOI: 10.18721/JEST.27104 УДК 546.32

# А.Г. Морачевский, А.А. Попович

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

# ПРОГРЕСС В ИССЛЕДОВАНИЯХ КАЛИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Число исследований перезаряжаемых источников тока с участием калия и его соединений: калий-ионные аккумуляторы, аккумуляторы на основе систем калий-халькоген (сера, селен) и калий-кислород (воздух) начало расти с 2015 г. и к середине 2020 г. превысило в сумме 350 работ. Данный небольшой обзор (Mini review) продолжает серию наших публикаций о развитии исследований перезаряжаемых систем на основе щелочных металлов и магния, он базируется исключительно на работах, опубликованных в 2020 г. Как и раньше, ввиду обилия экспериментальных исследований, нами рассматриваются преимущественно обзоры и лишь некоторые оригинальные публикации. Создание литийионных аккумуляторов, их массовый выпуск (в 2021 г. исполняется тридцать лет с начала их производства) явились крупнейшим успехом современной прикладной электрохимии, авторы первых основополагающих работ в этой области в 2019 г. удостоены Нобелевской премии. Тем не менее, из-за самых разнообразных требований к автономным источникам электрической энергии (электрохимические показатели, доступность и цена материалов для их изготовления, безопасность эксплуатации и др.) продолжаются интенсивные исследования по созданию новых электродных материалов и электролитов для литийионных аккумуляторов, поиск новых электрохимических систем, которые могли бы конкурировать с литиевыми аккумуляторами. На современных конференциях по источникам тока принято выделять отдельную секцию «Beyond Li-ion».

*Ключевые слова:* перезаряжаемые источники тока, калий-ионные аккумуляторы, система калий-сера, система калий-селен, аккумуляторы с участием калия.

## Ссылка при цитировании:

Морачевский А.Г., Попович А.А. Прогресс в исследованиях калий-ионных аккумуляторов // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 1. С. 41–50. DOI: 10.18721/ JEST.27104

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

## A.G. Morachevskiy, A.A. Popovich

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

# **PROGRESS IN RESEARCHING BATTERIES WITH POTASSIUM**

The number of studies of rechargeable current sources with potassium and its compounds, such as potassium-ion batteries, potassium-chalcogen (sulfur, selenium) and potassium-oxygen (air) based batteries, has been growing since 2015 and in 2020, it exceeded 350 papers in total. This mini review continues a series of our publications about the development of the studies in the field of rechargeable systems based on alkaline metals and magnesium and considers only the papers published in 2020. As before, due to abundant experimental researches, we primarily considered the reviews and only a few of original works. Creation of lithium-ion batteries, their mass production (in 2021, it is the 30<sup>th</sup> anniversary since the launch of their production) became one of the greatest successes of the modern applied electrochemistry. In 2019, the authors of the

pioneering works in this field were awarded the Nobel prize. Nonetheless, because of various requirements to autonomous electric sources (electrochemical parameters, accessibility and cost of materials for their manufacturing, operational safety, etc.), there is a never ending and intent search for new electrode materials and electrolytes for Li-ion batteries, and new electrochemical systems which could compete with the lithium batteries. Modern conferences on current sources provide a separate section: "Beyond Li-ion".

*Keywords:* rechargeable power supplies, potassium-ion batteries, potassium-sulfur system, potassium-selenium system, potassium batteries.

#### Citation:

A.G. Morachevskiy, A.A. Popovich, Progress in researching batteries with potassium, Materials Science. Power Engineering, 27 (01) (2021) 41–50, DOI: 10.18721/JEST.27104

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

В нашем предыдущем сообщении [1] уже упоминался тогда еще только принятый к печати обстоятельный обзор японских авторов [2], посвященный состоянию исследований калийионных батарей. В настоящее время этот обзор опубликован в журнале, и мы остановимся на нем несколько подробнее. Авторы довольно широко рассматривают проблемы интеркаляции ионов щелочных металлов в различные материалы. По нашей оценке из имеющихся в обзоре 477 ссылок на оригинальные исследования непосредственно касаются К-ионных аккумуляторов (КИА) 188 работ, опубликованных в период с 2015 по 2019 гг. включительно. По годам они распределяются так: в 2015 г. 6 работ, в 2016 – 10, в 2017 – 51, в 2018 – 72, в первой половине 2019 г. – 49. Обзор [2], занимающий 106 страниц, включает 6 разделов: введение, возможности применения калия в источниках энергии, материалы для положительного электрода калийионных аккумуляторов, материалы для отрицательного электрода, электролиты и связующие материалы, заключение и перспективы применения КИА.

В первых двух разделах обзора сопоставлены свойства ионов щелочных металлов и других кандидатов на создание перезаряжаемых батарей, основанных на принципе интеркаляции ионов ( $Mg^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ). Мы ограничимся щелочными металлами и сопоставим теоретическую емкость их при образовании соединения  $ACoO_2$  (A-Li, Na, K). Теоретическая гравиметрическая емкость ( $MA \cdot u \cdot r^{-1}$ ): для Li 274, для Na 235, для K 206. Теоретическая волюмометрическая емкость ( $MA \cdot u \cdot r^{-1}$ ): для Li 274, для Na 235, для K 206. Теоретическая волюмометрическая емкость ( $MA \cdot u \cdot cm^{-3}$ ) соответственно равна: 1378, 1193 и 906. Важным показателем являются радиусы ионов (радиусы Стокса) в различных растворителях. По данным [2] радиусы ионов щелочных металлов в воде (Å) равны: для Li 2,38, для Na 1,84, для K 1,25. В органическом растворителе – пропилен-карбонате – соответственно такие цифры: 4,8, 4,4 и 3,6. Ионы калия имеют наименьший радиус. В калий-ионных аккумуляторах реализуется большее разрядное напряжение по сравнению с литий-ионными (на 0,1 В) и натрий-ионными (на 0,4 В) аккумуляторами.

В третьем разделе обзора суммировано описание различных типов материалов для положительного электрода (катода) К-ионных аккумуляторов: слоистые оксиды различных типов, аналоги «*Prussian blue*» (приведены свойства 16 аналогов, содержащих ферроцианидные группировки), полианионные соединения (преимущественно различные фосфаты, фтор-сульфаты), органические соединения.

Четвертый раздел посвящен материалам для отрицательных электродов (анодов). Основное внимание уделено углеродным материалам, интеркаляции ионов калия в них. Обсуждаются графит, «твердый», «мягкий» и пористый углерод. Авторы приводят электрохимические характеристики для графита различных марок с указанием ссылок на экспериментальные исследования. В процессе интеркаляции ионов калия выделяются четыре последовательных стадии: КС<sub>48</sub>, КС<sub>24</sub>, КС<sub>8</sub>. К числу других обсуждаемых в обзоре [2] анодных материалов относятся кремний,

германий, фосфор, металлы (AI, Sn, Pb, Sb, Bi), композиты с участием указанных элементов, оксиды переходных металлов (оксиды Ti, Mn, Nb). Рассмотрены конверсионные процессы типа:

$$Fe_{2}O_{3} + 6K^{+} + 6e \leftrightarrow 2Fe + 3K_{2}O,$$
  
$$Co_{2}O_{4} + 8K^{+} + 6e \leftrightarrow 3Co + 4K_{2}O.$$

Обсуждаются также работы, в которых изучалось применение в качестве анодных материалов халькогенидов переходных металлов ( $TiS_2$ ,  $VS_2$ ,  $MoS_2$ ,  $MoS_2$ ,  $MoS_2$ ,  $WS_2$ ), полианионных соединений, органических материалов. В пятом разделе рассмотрено применение ряда электролитов преимущественно на основе соединения  $KPF_5$ . Кратко описаны исследования с применением твердых и полимерных электролитов. В обзоре [2] подробно изложены достижения и трудности в изучении К-ионных аккумуляторов по состоянию на конец 2019 г.

Мы столь подробно попытались изложить содержание обзора, поскольку он по своему объему и полноте охвата всех проблем, связанных с изучением К-ионных аккумуляторов, может рассматриваться как первая небольшая монография в области К-ионных аккумуляторов. Весьма важно, что на протяжении всего обзора авторы обсуждают конкурентные возможности К-ионных батарей по сравнению с Li-ионными и Na-ионными аккумуляторами.

В очень информативном обзоре китайских авторов [3], опубликованном в начале 2020 г. (принят к печати в ноябре 2019 г., кратко упоминается нами в работе [1]) отмечаются большие успехи в изучении К-ионных аккумуляторов, достигнутые в 2017 – 2019 гг. Из 213 ссылок на оригинальные работы, содержащихся в обзоре [3], 133 относятся непосредственно к КИА и опубликованы в указанные три года. Ниже приводится диаграмма, иллюстрирующая рост общего числа публикаций, в которых изучались КИА (по данным *Web of Science*) [3] (рис. 1).

В обзоре [3] очень подробно описаны возможные катодные и анодные материалы, для каждой группы материалов после описания их структуры, свойств, методов синтеза излагаются задачи и проблемы, связанные с их применением (подразделы «*Major challenges*»).

При описании катодных материалов первое место отводится гексацианометаллатам (аналогам *Prussian blue*), затем следуют слоистые оксиды, полианионные соединения, органические соединения. Описание анодных материалов начинается с углеродсодержащих материалов, за ними следуют сплавообразующие, конверсионные, интеркаляционные и органические материалы. В заключительной части обзора [3] в табличной форме приводятся сведения о 23 катодных и 34 анодных материалах, указываются их исходная обратимая емкость (мА· $r^{-1}$ ), средняя величина напряжения (В), емкость при определенной плотности тока (мА· $r^{-1}$ ), потеря исходной емкости после указанного числа циклов. Таблица составлена на основании экспериментальных данных последних лет, приводятся ссылки на соответствующие исследования.

Обзоры [2] и [3] по существу дают полное представление о состоянии исследований калийионных аккумуляторов до середины 2020 г.

В работе [4] (Индия) содержатся ссылки на 114 работ, из них 68 непосредственно относятся к К-ионным аккумуляторам, опубликованы в период с 2015 по 2020 гг. По годам распределение такое: на работы 2015 г. – 8 ссылок, 2016 г. – 15, 2017 г. – 23, 2018 г. – 6, 2019 г. – 6, 2020 г. (первая половина) – 10. Авторами [4] также приводится диаграмма (рис. 2), иллюстрирующая рост числа исследований КИА, но составленная иным образом: с помощью подсчета в статьях ключевых слов «*Potassium ion batteries*».

Структура обзора [4] в целом аналогична обзорам [2, 3]: вводная часть с сопоставлением основных показателей разрабатываемых аккумуляторов, основанных на процессах интеркаляции, катодные и анодные материалы, электролиты и связывающие вещества для К-ионных аккумуляторов. Во вводной части отмечается, что содержание лития в земной коре только 0,0017 % (по



Рис. 1. Рост числа публикаций, относящихся к К-ионным аккумуляторам по данным [3] Fig. 1. Growth in the number of publications related to K-ion batteries according to [3]



Рис. 2. Рост общего числа публикаций, относящихся к К-ионным аккумуляторам по данным [4] Fig. 2. Growth in the total number of publications related to K-ion batteries according to [4]

другим данным: Свойства элементов Справочник. Т. 1. М.: Металлургия, 1997, содержание лития в земной коре 0,0065 мас. %) и в будущем возможен «*Lithium crisis*».

Месторождения литийсодержащих руд в зарубежном мире преимущественно находятся в Южной Америке (свыше 70%).

Из числа катодных материалов для КИА в работе [4] описаны: аналоги *Prussian blue* (ферроцианиды с участием различных металлов), слоистые металлические оксиды, другие катодные материалы. Среди анодных материалов на первом месте, как и в других обзорах, углерод и некоторые углеродсодержащие материалы, обсуждаются также олово, его соединение с фосфором, органические анодные материалы. Все это рассмотрено в гораздо меньшем объеме по сравнению с обзорами [2, 3], однако использованы десять оригинальных исследований катодных материалов, опубликованные уже в 2020 г. В заключительной части обзора [4] авторы весьма положительно оценивают перспективы использования КИА в качестве перезаряжаемых источников тока.

Обзор Капаева и Трошина (Россия, Сколково, Черноголовка) [5] уже не охватывает всей проблемы К-ионных аккумуляторов, он посвящен частному вопросу — электродным материалам для калиевых батарей, создаваемым на органической основе. В работе содержится 176 ссылок на оригинальные источники, причем активно используются публикации самых последних лет: 22 работы, опубликованные в 2017 г., 28 в 2018 г., 69 в 2019 г. и 12 в 2020 г. К сожалению, в обзоре не указываются названия цитируемых работ. Основные разделы работы: краткое введение, катодные материалы, анодные материалы, очень краткое заключение, в качестве примера зарядноразрядной реакции с участием органического материала приводится такая:



Авторы отмечают, что многие материалы на органической основе показывают обнадеживающие результаты, обладают хорошей циклируемостью.

Применению органических соединений в качестве катодных и анодных материалов, электролитов для К-ионных аккумуляторов посвящен также обзор китайских авторов [6]. К сожалению, в нем также литературные источники приводятся без указания названий статей. Авторы базируются на работах самых последних лет. Из 203 ссылок 142 относятся к работам, опубликованным в 2016 – 2020 гг. Из этого числа 10 статей опубликовано в 2016 г., 26 в 2017 г., 36 в 2018 г., 51 в 2019 г. и 19 в 2020 г. Структура обзора стандартная. Вслед за кратким введением рассматриваются катодные материалы, затем анодные и электролиты (жидкие органические, водные, твердые и квази-твердые). В табличной форме суммированы сведения более чем о пятидесяти различных электродных материалах органического происхождения дли КИА. В таблицах приводятся: формула соединения, включая структурное изображение, разрядное напряжение («разрядное плато», В), применяемый электролит, емкость (мА·ч·г<sup>-1</sup>) при указанной плотности тока (мА·г<sup>-1</sup>), сохраняемая емкость (в %) после указанного числа циклов при соответствующей плотности тока (мА·г<sup>-1</sup>), приводятся ссылки на экспериментальные исследования.

Представляет несомненный интерес в заключительной части обзора схема, иллюстрирующая стратегию повышения характеристик КИА с органическими материалами, оптимизации электродов и электролитов. Имеются в виду такие фундаментальные характеристики, как емкость, напряжение, циклируемость, надежность.

В обзоре Федотова с соавторами (Россия, Москва, Сколково) [7] рассмотрен частный вопрос – применение электродных материалов типа КТіОРО<sub>4</sub> (*КТР*) в металл-ионных батареях. Обсуждено большое число других соединений, родственных по структуре *КТР*. В работе содержится 139 ссылок на оригинальные исследования структуры, свойств и возможных областей применения преимущественно катодных материалов в литий-ионных, натрий-ионных и калий-ионных аккумуляторах. Структура обзора такова: введение, общее описание кристаллической структуры *КТР*, катодные материалы (KFeSO<sub>4</sub>F, KVPO<sub>4</sub>F, KVPO<sub>4</sub>, KTiPO<sub>4</sub>F), анодные материалы, обсуждение и перспективы. Работа в значительной степени имеет кристаллографическую направленность. Просмотр текста и названий цитируемых работ позволяет заключить, что вопросам, связанным с калий-ионными аккумуляторами, из общего числа ссылок посвящены 22 - 24 работы, опубликованные в 2016 - 2020 гг. Это вполне естественно, если учесть, что исследования К-ионных ба-

тарей начались с 2015 г. Применение обсуждаемых в работе [7] материалов может способствовать повышению общего разрядного напряжения металл-ионных батарей.

Обзор, представленный авторами из Австралии [8], посвящен применению аналогов «*Prussian blue*» в качестве эффективных катодных материалов для К-ионных батарей. Авторы подчеркивают, что к настоящему времени именно эти катодные материалы являются основными кандидатами для применения их в КИА как с водными, так и с неводными электролитами в случае коммерциализации батарей. Обзор [8] содержит 126 ссылок на оригинальные исследования, причем 84 ссылки из них относятся к работам последних лет: 2016 г. – 9 ссылок, 2017 г. – 23, 2018 г. – 32, 2019 г. – 16, 2020 г. – 4.

В обзоре китайских исследователей [9], вероятно, впервые используется термин «Postpotassium-ion batteries». Под ним понимаются калийсодержащие электрохимические системы, разработка которых началась вслед за КИА. В первую очередь сюда относятся аккумуляторы с анодом из калия или калийсодержащего материала и с катодом на основе серы или селена. В предельном случае это система калий-сера или калий-селен. Электролиты могут быть твердыми, органическими (неводными) или водными. К категории пост-КИА относятся и некоторые другие электрохимические системы.

Обзор [9] имеет такую структуру: введение, батареи на основе системы калий-сера, батареи на основе системы калий-селен, полные твердые К-ионные батареи, металлические калиевые аноды, КИА с водным электролитом, достижения и перспективы применения различных видов батарей. В обзоре в табличной форме приведены сведения об электрохимических характеристиках катодных материалов для батарей на основе систем К – S и К – Se, сравнительные данные об электропроводимости и стабильности различных твердых электролитов, сведения о циклируемости ряда систем электрод-электролит.

Обзор [9] содержит 157 ссылок на оригинальные работы, причем 79,6 % из них (125 ссылок) на статьи, опубликованные в 2016 – 2020 гг. По годам распределение такое: на работы 2016 г. 7 ссылок, 2017 г. – 14, 2018 г. – 35, 2019 г. – 44, 2020 г. – 25 (имеется в виду год не полностью).

Обзор [10] продолжает серию ранее опубликованных в «Журнале прикладной химии» (Russ. J. Appl. Chem.) обзоров термодинамической направленности, содержащих сведения о термодинамических свойствах двойных систем, включающих литий или натрий, применяемых в той или иной степени в литий-ионных, натрий-ионных или других электрохимических преобразователях энергии. В 2015 – 2020 гг. (указаны год и номер журнала) описаны системы Li – Si (2015, № 4), Li – Sn (2015, №7), Li – Sb (2015, № 11), Li – Se и Na – Se (2016, № 7), Li – Ge (2016, Nº 10), Na − S (2017, Nº 5), Na − Te (2017, Nº 10), Na − Sn (2018, Nº 11), Na − Sb (2019, Nº 3); Li – Те (2020, № 3). В обзоре [10] после краткого введения обсуждаются фазовая диаграмма системы К - S, термодинамические свойства сульфидов калия в твердом состоянии, термодинамические свойства жидких сплавов системы K – S, катодные процессы в полисульфидных расплавах, применение системы К – S в перезаряжаемых источниках тока при комнатной температуре. Сведения для последнего раздела основываются на работах, опубликованных в 2014 – 2020 гг. При этом не преследуется цели полноты их охвата, главным в обзоре является термодинамическое описание системы K - S. Однако все опубликованные наиболее крупные работы, относящиеся к применению системы К – S в перезаряжаемых источниках тока, учтены. Всего в работе 65 ссылок.

Обзор [11] (авторы из Австралии, подписан к печати 5 мая 2020 г.) посвящен активно разрабатываемой проблеме — применению сурьмы и содержащих ее материалов для анодов Кионных батарей. Высокая химическая активность калия вызывает определенные трудности в выборе устойчивых анодных материалов. Содержащие сурьму наноматериалы (сурьма, ее сплавы, композиты, халькогениды) благодаря высокой удельной емкости, приемлемой величине потенциала выделения калия, относительно невысокой стоимости относятся к числу перспективных



Рис. 3. Теоретические значения разрядной емкости для различных анодных материалов по данным [11] Fig. 3. Theoretical values of the discharge capacity for various anode materials according to the data [11]

анодных материалов. На представленной ниже диаграмме (рис. 3) сопоставлены теоретические значения удельной разрядной емкости для ряда анодных материалов из категории сплавообразующих. Наиболее высокое значение удельной емкости у соединений с фосфором (КР и K<sub>4</sub>P<sub>3</sub>), но там имеются специфические трудности, хотя система калий – фосфор продолжает быть объектом исследований.

В обзоре [11] имеется 105 ссылок на различные экспериментальные исследования, преимущественно на работы, опубликованные в 2017 – 2020 гг. (90 ссылок, 85,7 %). Распределение по годам такое: на работы 2017 г. 18 ссылок, 2018 г. – 27, 2019 г. – 29, 2020 г. – 16.

Далее очень кратко упомянем о некоторых экспериментальных исследованиях, опубликованных в 2020 г., не претендуя на полноту их охвата.

В работе [12] впервые применена для КИА в качестве электролита *ionic liquid*. Под ионной жидкостью понимают смесь органических соединений, обладающую чисто ионной проводимостью и имеющую низкую температуру плавления. Батарея состояла из графитового анода и соединения K<sub>2</sub>Mn[Fe(CN)<sub>6</sub>] – катода. В течение длительного циклирования (200 циклов) при комнатной температуре были получены стабильные зарядные и разрядные характеристики. Исследование выполнено в Японии. Также японскими авторами [13] изучены электролиты, компонентами которых являются соединения КРF<sub>6</sub> и KN(SO<sub>2</sub>F)<sub>2</sub>. Оптимизация электролита достигается варьированием соотношения между этими двумя веществами и подбором для них соответствующего органического растворителя (этиленкарбонат, диэтилкарбонат и др.). Сам элемент состоит из графитового анода и катода на основе соединения  $K_3Mn[Fe(CN)_6]$ . В работе приводится обширный экспериментальный материал. Выбору жидкого электролита с ионной проводимостью для аналогичного типа КИА посвящена работа [14] (Великобритания, Италия). Анодом также служил графит, а катодом соединение  $K_{3}Mn[Fe(CN)_{c}]$ , электролит жидкий, с ионной проводимостью получены устойчивые результаты при продолжительном циклировании (100 циклов). Исходная емкость батареи после оптимизации электролита 119 мА·ч·г<sup>-1</sup>, сохранение емкости после циклирования 87,4%, авторы отмечают перспективность КИА с указанными электродными материалами и электролитом.

В работе [15] (Франция) обсуждается проблема выбора электролита для батареи с анодом из металлического калия.

Большое экспериментальное исследование [16], выполненное целой группой авторов из Австралии и России, посвящено изучению электрохимического поведения анода, представляющего композит из наноструктурированного  $Sb_2S_3$  и восстановленного оксида графена (*reduced* grapheme oxide, rGO):  $Sb_2S_3 - rGO$ . Содержание в композите компонента с высокой емкостью –  $Sb_2S_3 - 80$  мас. %. Максимальная емкость при полном отсутствии калия (*depotassiation capacity*) 633 мА·ч·г<sup>-1</sup> при разряде образуются  $K_3Sb$  и  $K_2S_3$ .

В работе [17] (Китай) изучается новый анодный материал — сульфид олова в виде нанокомпозита с углеродом, азотом и серой. Теоретическая удельная емкость  $SnS_2 - 733 \text{ мA} \cdot \text{ч} \cdot \text{r}^{-1}$ , он имеет уникальную слоистую структуру. В работе описан метод приготовления нанокомпозита. Его испытания показали, что при плотности тока 0,1 А·г<sup>-1</sup>, обратимая емкость составляет 614,8 мА·ч·г<sup>-1</sup>. Как отмечено в работе [17] эта величина в течение 50 циклов хорошо сохраняется.

Современному состоянию и перспективам развития перезаряжаемых источников тока на основе калия посвящена работа [18] (Китай, Сингапур, Австралия), имеющая характер обзора.

Изучению калий-ионных батарей и других перезаряжаемых источников тока с участием калия уделяется огромное внимание. По нашим оценкам с учетом опубликованных в 2020 г. работ общее число публикаций превысит 400. В апреле 2020 г. опубликован большой сборник (можно назвать коллективная монография): «Potassium-Ion Batteries: Materials and Applications». Inamuddin Inamuddin (Editor), Rajender Bodulla (Editor), Abdullah M. Asiri (Editor). John Wiley & Sons, 21 April 2020. Всего страниц 432. Полный текст пока не доступен.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Морачевский А.Г., Попович А.А.** Перезаряжаемые источники тока на основе калия и его соединений // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 36, № 3. С. 70–79. DOI: 10.18721/JEST.26305

[2] Hosaka T., Kubota K., Hameed A.S., Komaba S. Research development on K-ion batteries. Chem. Rev, 2020, Vol. 120. 6358–6466.

[3] **Rajagopalan R., Tang Y., Ji X., Jia C., Wang H.** Advancements and hallenges in potassium ion batteries: a comprehensive review. Adv. Funct. Mater, 2020, № 1909486. [1 of 35]

[4] **Anoopkumar V., Bibin J., Mercy T.D.** Potassium ion batteries: Key to future large scale energy storage?. ACS Applied Energy Materials, 2020, Vol. 3. № 10, 9478–9492.

[5] **Kapaev R.R., Troshin P.A.** Organic-based active electrode materials for potassium batteries: status and perspectives. J. Mater. Chem. A., 2020, Vol. 8 (34), 17296–17325.

[6] **Xu S., Chen Y., Wang C.** Emerging organic potassium-ion batteries: electrodes and electrolytes. J. Mater. Chem. A, 2020, Vol. 8 (31), 15547–15574.

[7] Fedotov S.S., Samarin A.S., Antipov E.V.  $KTiOPO_4$  – structured electrode materials for metal-ion batteries: A review J. Power Sources, 2020, Vol. 480. 228840 (1 of 17).

[8] Zhao S., Guo Z., Yan K., Guo X., Wan S., He F., Sun B., Wang G. The rise of prussian blue analogs: challenges and opportunities for high-performance cathode materials in potassium-ion batteries. Small Struct, 2020, 200004 (1 of 17).

[9] **Yao Q., Zhu C.** Advanced post-potassium-ion batteries as emerging potassium-based alternatives for energy storage. Adv. Funct. Mater, 2020, 2005209 (1 of 27).

[10] **Морачевский А.Г.** Система калий — сера: термодинамические свойства, электрохимические исследования и перспективы применения в химических источниках тока // Ж. прикл. Химии. 2020. Т. 93. № 8. С. 1067–1078.

[11] Gao H., Guo X., Wang S., Zhang F., Liu H. Antimony-based nanomaterials for high-perfomance potassium-ion batteries, DOI : 10.1002/eom 2.12027 (EkoMat. 2020. 1–19).

[12] Onuma H., Kubota K., Muratsubaki S., Hosaka T., Tatara R., Yamamoto T., Matsumoto K., Nochira T., Hagiwara R., Oji H., Yas S., Komaba S. Application of ionic liquid as K-ion electrolyte of graphite –  $K_2Mn[Fe(CN)_6]$  cell.ACS Energy Lett, 2020, Vol. 5, 2849–2857. [13] Hosaka T., Matsuyama T., Kubota K., Yasuno S., Komaba S. Development of  $\text{KPF}_6 \bowtie \text{KN}(\text{SO}_2\text{F})_2$ binary-soft solutions for long-life and high-voltage K-ion batteries. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2020, Vol. 12 (31), 34873–34881.

[14] Fiore M., Wheeler S., Hurlbutt K., Capon I., Fawdon J., Ruffo R., Pasta M. Paving the way toward efficient, high-energy potassium-ion batteries with ionic liquid electrolytes. Chem. Mater, 2020, Vol. 32, 7653–7661.

[15] **Touja J., Nam Le Pham P., Louvain N., Monconduit L., Stievano L.** Effect of the electrolyte on K-metal batteries, DOI: 10.1039/d0cc05024e.12027 (Chem. Comm. 2020).

[16] Lakshmi V., Mikhaylov A.A., Medvedev A.G., Zhang C., Ramireddy T., Rahman M.M., Cizek P., Golberg D., Chen Y., Lev O., Prikhodchenko P.V., Glushenkov A.M. Probing electrochemical reactivity in an  $Sb_2S_3$  – containing potassium-ion battery anode: observation of an increased capacity. J. Mater. Chem. A, 2020, Vol. 8, No 22, 11424–11434.

[17] Gao K., Wang S., Jia Y., Xu D., Liu H., Huang K.-J., Jing Q.-S., Jiao L. Promoting K-ion storage property of SnS2 anode by structure engineering. Chem. Eng. J, 2021, Vol. 406. 126902.

[18] Xu J., Dou S., Cui X., Liu w., Zhang z., Deng Y., Hu W., Chen Y. Potassium-based electrochemical energy storage devices: Development status and future prospect. Energy Storage Mater, 2021, Vol. 34, 85–106.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**МОРАЧЕВСКИЙ Андрей Георгиевич** – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук. E-mail: morachevski@mail.ru

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич — директор Института машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: popovicha@mail.ru

#### Дата поступления статьи в редакцию: 08.02.2021

## REFERENCES

[1] A.G. Morachevskiy, A.A. Popovich, Perezaryazhayemyye istochniki toka na osnove kaliya i yego soyedineniy // Materialovedeniye. Energetika. 2020. T. 36, № 3. S. 70–79.

[2] **T. Hosaka, K. Kubota, A.S. Hameed, S. Komaba,** Research development on K-ion batteries // Chem. Rev. 2020/ V. 120. P. 6358–6466.

[3] **R. Rajagopalan, Y. Tang, X. Ji, C. Jia, H. Wang,** Advancements and hallenges in potassium ion batteries: a comprehensive review // Adv. Funct. Mater. 2020. № 1909486. [1 of 35]

[4] V. Anoopkumar, J. Bibin, T.D. Mercy, Potassium ion batteries: Key to future large scale energy storage? // ACS Applied Energy Materials. 2020. V. 3. № 10. P. 9478–9492.

[5] **R.R. Kapaev, P.A. Troshin,** Organic-based active electrode materials for potassium batteries: status and perspectives // J. Mater. Chem. A. 2020. V. 8 (34). P. 17296–17325.

[6] S. Xu, Y. Chen, C. Wang, Emerging organic potassium-ion batteries: electrodes and electrolytes // J. Mater. Chem. A. 2020. V. 8 (31). P. 15547–15574.

[7] S.S. Fedotov, A.S. Samarin, E.V. Antipov,  $KTiOPO_4$  – structured electrode materials for metal-ion batteries: A review J. Power Sources. 2020. V. 480. 228840 (1 of 17).

[8] S. Zhao, Z. Guo, K. Yan, X. Guo, S. Wan, F. He, B. Sun, G. Wang, The rise of prussian blue analogs: challenges and opportunities for high-performance cathode materials in potassium-ion batteries // Small Struct. 2020. 200004 (1 of 17).

[9] Q. Yao, C. Zhu, Advanced post-potassium-ion batteries as emerging potassium-based alternatives for energy storage // Adv. Funct. Mater. 2020. 2005209 (1 of 27).

[10] A.G. Morachevskii, Potassium-sulfur system: thermodynamic properties, electrochemical studies and prospects for use in chemical current sources. Russ. J. Appl. Chem. 2020. V. 93. № 8. P. 1103–1114.

[11] H. Gao, X. Guo, S. Wang, F. Zhang, H. Liu, Antimony-based nanomaterials for high-perfomance potassium-ion batteries // DOI: 10.1002/eom 2.12027 (EkoMat. 2020. 1 – 19).

[12] H. Onuma, K. Kubota, S. Muratsubaki, T. Hosaka, R. Tatara, T. Yamamoto, K. Matsumoto, T. Nochira, R. Hagiwara, H. Oji, S. Yas, S. Komaba, Application of ionic liquid as K-ion electrolyte of graphite –  $K_2$ Mn[Fe(CN)<sub>6</sub>] cell // ACS Energy Lett. 2020. V. 5. P. 2849–2857.

[13] **T. Hosaka, T. Matsuyama, K. Kubota, S. Yasuno, S. Komaba,** Development of  $KRF_6 i KN(SO_2F)_2$  binary-soft solutions for long-life and high-voltage K-ion batteries // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2020. V. 12 (31). P. 34873–34881.

[14] M. Fiore, S. Wheeler, K. Hurlbutt, I. Capon, J. Fawdon, R. Ruffo, M. Pasta, Paving the way toward efficient, high-energy potassium-ion batteries with ionic liquid electrolytes // Chem. Mater. 2020. V. 32. P. 7653–7661.

[15] J. Touja, P. Nam Le Pham, N. Louvain, L. Monconduit, L. Stievano, Effect of the electrolyte on K-metal batteries // DOI: 10.1039/d0cc05024e.12027 (Chem. Comm. 2020).

[16] V. Lakshmi, A.A. Mikhaylov, A.G. Medvedev, C. Zhang, T. Ramireddy, M.M. Rahman, P. Cizek, D. Golberg, Y. Chen, O. Lev, P.V. Prikhodchenko, A.M. Glushenkov, Probing electrochemical reactivity in an  $Sb_2S_3$  – containing potassium-ion battery anode: observation of an increased capacity // J. Mater. Chem. A. 2020. V. 8. No 22. P. 11424–11434.

[17] K. Gao, S. Wang, Y. Jia, D. Xu, H. Liu, K.-J. Huang, Q.-S. Jing, L. Jiao, Promoting K-ion storage property of SnS, anode by structure engineering // Chem. Eng. J. 2021. V. 406. 126902.

[18] J. Xu, S. Dou, X. Cui, w. Liu, z. Zhang, Y. Deng, W. Hu, Y. Chen, Potassium-based electrochemical energy storage devices: Development status and future prospect // Energy Storage Mater. 2021. V. 34. P. 85–106.

## THE AUTHORS

**MORACHEVSKIY Andrey G.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.* E-mail: morachevski@mail.ru

**POPOVICH Anatoliy A.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.* E-mail: popovicha@mail.ru

Received: 08.02.2021

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021

# DOI: 10.18721/JEST.27105 УДК 669.017.15:669.018.44:620.18:621.791.051

## М.Д. Фукс, М.А. Фролов, А.В. Цеменко

ФГУП "ЦНИИ КМ "ПРОМЕТЕЙ" им. И.В. Горынина" – НИЦ "КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ", Санкт-Петербург, Россия

# АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ, ФАЗОВОГО СОСТАВА И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРУБНОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НР40NBTI

Методами световой и сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии исследованы микроструктура и фазовый состав трубного сварного соединения из сплава HP40NbTi на основе системы Fe-25Cr-35Ni печи пиролиза этилена. Определены кратковременные механические свойства при комнатных и повышенных температурах, а также длительная прочность основного металла трубы и сварного соединения. Показано, что структурная неоднородность сварного шва и образование G-фазы в структуре сплава HP40NbTi в зоне термического влияния практически не влияют на прочностные и пластические характеристики сварного соединения при комнатной температуре и несущественно снижают пластичность при повышенных температурах, однако значительно снижают длительную прочность при температурах эксплуатации установок пиролиза. Исследованы характер разрушения основного металла и сварного соединения, выявлена роль G-фазы в образовании трещин при эксплуатации сварного соединения из сплава HP40NbTi.

*Ключевые слова:* жаропрочные аустенитные сплавы, сварное соединение, микроструктура, фазовый состав, G-фаза, механические свойства.

## Ссылка при цитировании:

Фукс М.Д., Фролов М.А., Цеменко А.В. Анализ структуры, фазового состава и механических свойств трубного сварного соединения из жаропрочного сплава HP40NbTi // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 1. С. 51–73. DOI: 10.18721/JEST.27105

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

## M.D. Fuks, M.A. Frolov, A.V. Tcemenko

"CENTRAL RESEARCH INSTITUTE OF STRUCTURAL MATERIALS "PROMETEY" NAMED BY I.V. GORYNIN OF NATIONAL RESEARCH CENTER "KURCHATOV INSTITUTE", St. Petersburg, Russia

# ANALYSIS OF THE STRUCTURE, PHASE COMPOSITION AND MECHANICAL PROPERTIES OF A PIPE WELDED JOINT MADE OF HEAT-RESISTANT HP40NBTI ALLOY

The authors studied the microstructure and phase composition of a pipe welded joint made of HP40NbTi alloy based on the Fe-25Cr-35Ni system of an ethylene pyrolysis furnace using light and scanning electron microscopy and energy-dispersive spectroscopy. The short-term mechanical properties at room and elevated temperatures, as well as the long-term strength of the base metal of the pipe and the welded joint are determined. The paper shows that the structural heterogeneity of the weld and the formation of the G-phase in the structure of the HP40NbTi alloy in the thermal influence zone have the following impact: the strength and plastic characteristics of the welded joint are not affected at room temperature; the ductility is slightly reduced at elevated temperatures; the long-term strength is significantly reduced at operating temperatures of pyrolysis plants. The paper investigates the nature of the fracture of the base metal and the welded joint. The results reveal the role of the G-phase in the formation of cracks during the operation of the welded joint made of the HP40NbTi alloy.

*Keywords:* heat-resistant austenitic alloys, welded joint, microstructure, phase composition, G-phase, mechanical properties.

#### Citation:

M.D. Fuks, M.A. Frolov, A.V. Tcemenko, Analysis of the structure, phase composition and mechanical properties of a pipe welded joint made of heat-resistant HP40NbTi alloy, Materials Science. Power Engineering, 27 (01) (2021) 51–73, DOI: 10.18721/JEST.27105

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

**Введение.** Жаропрочные аустенитные сплавы HP40NbTi на Fe-Cr-Ni основе, модифицированные титаном и ниобием, являются основными материалами для изготовления змеевиковых систем высокотемпературных установок нефтехимических, химических и металлургических производств [1–3]. Сплавы имеют высокие сопротивление ползучести, длительную прочность, стойкость к окислению и науглероживанию [4–20]. Хорошие литейные свойства и удовлетворительная свариваемость [21–26] позволяют изготавливать из них трубы и фитинги соответственно методами центробежного и статического литья и сваривать сложные металлоемкие змеевиковые системы. Поскольку условия эксплуатации оборудования являются чрезвычайно жесткими (температура 800–900°С с локальными перегревами до 1150–1200 °С, нагрузка 5–10 МПа, агрессивная коррозионная среда), это приводит к постепенной эволюции структуры и деградации свойств сплавов HP40NbTi. В результате, фактический ресурс оборудования не превышает 3-6 лет, что значительно меньше расчетного, составляющего 100 000 ч (11,4 года) [27–34]. При этом считается, что наиболее слабыми участками печи пиролиза являются сварные соединения [35–39].

Микроструктура основного металла и сварного шва состоит из одинаковых фаз и общий характер процессов, протекающих в структуре сплава HP40NbTi в этих участках сварного соединения в процессе эксплуатации, также одинаковый [40–57]. Однако скорость фазовых превращений и изменение структуры в сварном шве и зоне термического влияния отличаются от основного металла вследствие большей неоднородности химического состава, формирующейся при сварке изза температурного градиента, высоких скоростей охлаждения и напряжений [26–29]. В [55–57] экспериментально показано, что уже при сварке в структуре сплава HP40NbTi в металле шва и, особенно, в 3TB начинается образование интерметаллидных фаз. Это может приводить к быстрому снижению механических свойств сплава при высокотемпературной эксплуатации, учитывая, что сварные соединения из сплавов серии HP имеют относительно низкую трещиностойкость. Опубликовано несколько исследований сварных соединений труб печей пиролиза из сплавов серии HPNbTi после эксплуатации [22–23, 35–39]. Однако систематизированная информация о влиянии микроструктуры сварного соединения на механические свойства сплава HP40NbTi в процессе эксплуатации отсутствует, а причины и характер их разрушения не определены и требуют дополнительного изучения.

Целью работы является экспериментальное исследование влияния структуры сварного соединения из жаропрочного сплава HP40NbT на его эксплуатационные свойства и анализ характера разрушения.

### Материал и методика исследований

Для исследования использовали центробежнолитые трубы длиной 3 м, диаметром 137 мм и толщиной стенки 9 мм из сплава HP40NbTi. Сварку трубных секций выполняли методом

MIG/MAG с использованием электрода диаметром 3,2 мм и сварочной проволоки сплошного сечения диаметром 2,4 мм – для корневого шва (1 валик) и 3,2 мм – для облицовочного шва (2 валик). Химический состав материала труб и присадочного металла приведен в табл. 1.

## Таблица 1

## Фактический химический состав основного (труба) и присадочного металлов сварного соединения Table 1

Металл	Содержание химических элементов, масс.%											
	С	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	W	Mo	V	Ti	P3M	Fe
Основной	0,43	1,80	0,91	25,60	35,92	1,73	0,34	0,23	0,10	0,29	$\leq 0,5$	Ост.
Присадка	0,41	1,75	1,34	26,10	31,60	1,64	0,31	0,16	0,05	0,32	≤0,3	Ост.

#### Actual chemical composition of the main (pipe) and filler metals of the welded joint

На рис. 1,*а* показана схема разделки кромок труб под сварку: использовалось одностороннее стыковое соединение с V-образной фаской с углом скоса  $\beta = 37^{\circ}$  и зазором b = 2 мм. Двухслойный нормальный сварной шов выполняли в несколько проходов (рис. 1,*б*). Параметры сварки были стандартными для промышленного применения: напряжение 12 В, ток 70 А – при корневом проходе (мягкий режим) и 110 А – при формировании второго валика. В качестве защитного и поддерживающего сварочную дугу газа использовали аргон чистотой 99,9% с расходом 10 л/мин при обеспечении спокойного, ламинарного потока аргона, подающегося с помощью газовой линзы. Температура аргона на выходе из газовой линзы вблизи сварочной ванны составляла 16-20 °C. Температура между проходами во время сварки измерялась термопарой К-типа и составляла 150 °C. Проверку герметичности сварного шва проводили методом капиллярной дефектоскопии после корневого прохода.

Образцы размером  $10 \times 10 \times 15$  мм для исследования структуры и измерения микротвердости сплава вырезали с помощью высокоскоростного лезвия из различных участков вдоль и поперек оси трубы (рис. 2,*a*). Образцы для механических испытаний вырезали вдоль оси трубы на участ-ках основного металла и сварного соединения (рис. 2,*б*).

Металлографические исследования, анализ изломов и рентгеновское картирование проводили с использованием светового микроскопа Carl Zeiss Axiovert 40; сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 2 LM, оборудованного полевой эмиссионной пушкой; энергодисперсионного рентгеновского спектрометра Inca X-Max-50. Относительная погрешность рентге-

*a*)











a – for metallographic analysis and measurement of microhardness, b – for determination of mechanical properties

носпектрального микроанализа при определении концентрации химических элементов в фазах в структуре сплава составляла: 3% для Fe, Ni, Cr, Si, Nb, Mo, W, Ti; 20% для C. Для анализа макроструктуры шлифованные темплеты травили в 60% водном растворе соляной кислоты, для выявления микроструктуры при использовании светового микроскопа применяли электролитическое травление в 10% водном растворе щавелевой кислоты длительностью 30 с.

Микротвердость сплава измеряли на твердомере Виккерса Durascan-20 G5 при нагрузке 10 кгс с интервалом 1 мм между измерениями вдоль оси трубы в середине толщины стенки, а также вблизи наружной и внутренней поверхностей трубы. Профиль измерения микротвердости сварной трубы включал основной металл (OM), зону термического влияния (3TB) и металл шва (МШ).

Ударную вязкость определяли при испытаниях прямоугольных образцов размером  $2 \times 6 \times 30$  мм без надреза при комнатной температуре на маятниковом копре с номинальным значением потенциальной энергии маятника 7,5 Дж и скоростью падения 4,0 м/с. Статические испытания на растяжение проводили при комнатной температуре и при 870 °C в соответствии со стандартом ASTM A608, используя цилиндрические пятикратные образцы с начальным диаметром рабочей части 3 см (рис. 3,*a*). Значения ударной вязкости, характеристик прочности и пластичности при статическом растяжении принимали как среднее из трех испытаний на точку.

Испытания на длительную прочность образцов уменьшенного размера с начальными диаметром и длиной рабочей части соответственно 4,2 мм и 31 мм (рис. 3, $\delta$ ) проводили при температуре 870 °С и нагрузке 50 МПа на воздухе. За характеристики длительной прочности принимали время до разрушения (ч), относительные удлинение и сужение (%). Значения характеристик длительной прочности принимали как среднее из двух испытаний на точку в соответствии со стандартом ASTM E139-11.

Исследование структуры, поверхности изломов и определение механических свойств различных участков сварного соединения проводили после сварки труб в литом состоянии без термической обработки и после механических испытаний.



Рис. 3. Чертежи образцов для испытаний на статическое растяжение (*a*) и длительную прочность (*б*) Fig. 3. Drawings of static tensile (*a*) and long-term strength (*b*) test samples

## Результаты исследований и их обсуждение

Металлографический анализ выявил характерные участки сварного соединения: основной металл (OM), зона термического влияния ЗТВ) и двухслойный сварной шов, который состоит из первого (корневого) валика, второго валика и двух участков усиления сварного шва (рис. 4). Для обоих слоев металла шва (МШ) характерна выраженная направленность структуры.

Фазовый состав сплава во всех участках сварного соединения одинаковый и содержит матричный  $\gamma$ -твердый раствор и эвтектику ( $\gamma$ +Me<sub>x</sub>C<sub>y</sub>). Однако морфология структуры сплава в металле шва, ЗТВ и основном металле значительно различается. Если в основном металле объемная доля  $\gamma$ -твердого раствора составляет 75-79 об.%, то в металле шва уменьшается до 65-70 об.% за счет увеличения содержания карбидной фазы. При этом средние значения длины и ширины ориентрованных по направлению теплоотовода зерен  $\gamma$ -твердого раствора в основном металле составляют соответственно 580 мкм и 270 мкм, что больше по сравнению с первым валиком — 350/170 мкм и меньше, чем во втором — 800/270 мкм. Это объясняется максимальной скоростью кристаллизации первого валика металла шва вследствие контакта малого объема жидкого металла с металлом свариваемых труб и замедленным охлаждением второго валика после кристаллизации за счет теплопередачи от первого валика и зоны усиления.

В ЗТВ наблюдается существенное измельчение γ-зерна по сравнению с основным металлом и большая разнозернистость: длина и ширина зерен составляют 210-460 мкм и 110-230 мкм со-



Рис. 4. Макроструктура сплава в поперечном сечении трубного сварного соединения с выделенными границами различных участков: 1 – первый (корневой) валик,
2 – второй валик, 3 – участок усиления шва, 4 – зона термического влияния, 5 – основной металл Fig. 4. The macrostructure of the alloy in the cross-section of the pipe welded joint with the selected boundaries of different sections: 1 – the first (root) roller, 2 – the second roller, 3 – the area of the seam reinforcement, 4 – the zone of thermal influence, 5 – the base metal

ответственно. Наименьший размер аустенитного зерна в ЗТВ наблюдается вблизи границы с металлом шва, особенно 1-го валика, вероятно, вследствие рекристаллизации за счет внутренних напряжений, возникающих при послесварочном охлаждении.

Морфология и размеры дендритов γ-фазы в структуре сплава HP40NbTi также значительно различаются в разных участках сварного соединения (рис. 5). Наибольший средний линейный размер дендритной ячейки, измеренный методом случайных секущих, наблюдается в OM, наименьший – в МШ: 100-130 мкм и 30-50 мкм соответственно. Структура сплава в 3TB по морфологии структурных составляющих близка к OM, но неоднородная по размеру дендритной ячейки, который изменяется в интервале 80-120 мкм, постепенно укрупняясь в направлении от МШ к OM.

Выявленные различия в характере структуры в разных участках сварного соединения оказывают существенное влияние на микротвердость сплава (рис. 6). Наибольшие содержание эвтектики и степень дисперсность структуры сплава в металле шва согласуются с его максимальными значениями микротвердости 250-260 HV. Микротвердость ОМ и ЗТВ составляет ~220 HV и 230-240 HV соответственно.

Рентгеноспектральный микроанализ γ-фазы и карбидов в структуре сплава HP40NbTi показал, что не только морфология, но и химический состав фаз в разных участках сварного соединения различается (табл. 2). При этом в ЗТВ и, особенно, в МШ состав фаз очень неоднороден. Матричная γ-фаза в металле шва и ЗТВ содержит меньшее количество кремния и большее – ниобия по сравнению с основным металлом, а карбиды на основе Nb и Cr в МШ содержат, кроме основных карбидообразующих элементов, большее количество других металлических элементов состава сплава.

Характерной особенностью структуры сварного соединения сплава HP40NbTi является сильно выраженная неоднородность распределения кремния в γ-фазе в МШ и 3TB (рис. 7). Если в основном металле Si равномерно распределен в твердом растворе, то в металле шва и, особенно, в 3TB он образует значительные сегрегации по границам первичных γ-зерен, концентрируясь вблизи эвтектических карбидов ниобия и хрома. При этом в отдельных участках 3TB, особенно вблизи границы с МШ, преимущественно на межфазных границах карбид/матрица в структуре сплава наблюдается образование светло-серых включений сопоставимых по размеру с включениями карбидных фаз. Элементный анализ этих включений показал, что образующаяся фаза обогащена кремнием, никелем и ниобием и имеет переменный состав: 6,7-9,4 Si; 29,2-32,4 Ni; 27,9-33,6 Nb; 21,4-26,2 Cr; 7,4-9,6 Fe; 0,02-0,07 Ti.



Рис. 5. Микроструктура сплава HP40NbTi в различных участках сварного соединения: основной металл (*a*), 2-й валик (*б*), к-м – граница зоны усиления и 3TB, граница 1-го валика и 3TB (*в*) Fig. 5. The microstructure of the HP40NbTi alloy in various sections of the welded joint: the base metal (*a*), the 2<sup>nd</sup> roller (*b*), k-m-the boundary of the reinforcement zone and the ZTV, the boundary of the 1st roller and the ZTV (*c*)



Рис. 6. Схема распределения участков для измерения (*a*) и изменение микротвердости сплава HP40NbTi (б) в поперечном сечении вдоль оси сварного трубного соединения

Fig. 6. The distribution scheme of the measuring areas (*a*) and the change in the microhardness of the HP40NbTi melt (*b*) in the cross-section of the longitudinal welded pipe joint



Рис. 7. Карты распределения Cr (*a*), Nb (*b*), Si (*b*) в структуре сплава HP40NbTi в ЗТВ вблизи границы с 1<sup>-м</sup> валиком металла шва сварного соединения
Fig. 7. Distribution maps of Cr (*a*), Nb (*b*), Si (*c*) in the structure of the HP40NbTi alloy in the ZTE near the boundary with the 1<sup>st</sup> roller of the weld metal

#### Таблица 2

## Химический состав фаз сплава HP40NbTi в различных участках сварного соединения Table 2

Фаза	Участок сварного	Содержание химических элементов, масс.%											
	соединения	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	W	Mn	Мо	V	С	
γ	ОМ	1,93	0,06	25,86	34,72	35,60	0,15	0,33	1,03	0,26	0,03	н.о.	
	3TB	1,26	0,02	25,58	36,23	34,54	0,49	0,23	1,37	0,23	0,02	н.о.	
	МШ, 1 валик	1,46	0,03	26,55	35,64	33,67	0,43	0,47	1,46	0,24	0,02	н.о.	
	МШ, 2 валик	1,52	0,04	26,43	34,86	34,66	0,27	0,38	1,57	0,22	0,02	н.о.	
Cr <sub>m</sub> C <sub>n</sub>	ОМ	0,04	0,01	79,14	8,35	1,53	0,02	1,30	0,11	0,54	0,02	8,94	
	3TB	0,03	0,01	78,24	9,14	2,15	0,02	1,05	0,10	0,54	0,02	8,70	
	МШ, 1 валик	0,07	0,02	63,70	15,23	10,65	0,41	0,43	0,15	0,75	0,04	8,55	
	МШ, 2 валик	0,25	0,.07	64,50	12,67	11,85	0,78	0,32	0,13	0,54	0,04	8,82	
NbC	NbC	0,08	1,15	1,67	0,61	0,66	8,.20	0,15	0,03	0,09	0,06	10,30	
		0,13	0,53	0,24	0,42	0,56	87,55	0,18	0,03	0,14	0,07	10,15	
		0,29	2,14	8,32	3,63	5,14	70,25	0,20	0,09	0,16	0,13	9,65	
		0,43	2,56	6,14	4,95	3,32	72,23	0,16	0,06	0,11	0,07	9,94	

Actual chemical composition of the main (pipe) and filler metals of the welded joint

Примечание. н.о. – содержание элемента не определялось.

Известно, что при температурах ниже 1000 °С карбид NbC является термодинамически не устойчивым и претерпевает превращение с образованием интерметаллидных фаз, преимущественно G-фазы (Nb<sub>6</sub>Ni<sub>16</sub>Si<sub>7</sub>) [2, 33, 31, 41–43, 48–53, 58–67]. Фазовый переход происходит по диффузионному механизму и на промежуточных стадиях имеет переменный состав. Подобные структуры наблюдали в [68–71]. Полученные результаты позволяют заключить, что нагрев при многопроходной сварке провоцирует протекание превращения NbC—G-фаза в структуре сплава HP40NbTi в зоне термического влияния.

Можно предположить, что установленная структурно-фазовая неоднородность сварного соединения центробежнолитых труб из сплава HP40NbTi и образование G-фазы в зоне термического влияния должны оказывать влияние на его эксплуатационные характеристики.

На рис. 8 сопоставлены результаты определения механических свойств основного металла и сварного соединения из сплава HP40NbTi при испытаниях на ударный изгиб при комнатной температуре и статическое растяжение при 20 °C и 870 °C. Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что при комнатной температуре характеристики прочности и пластичности сварного соединения практически одинаковые, а ударная вязкость несколько ниже по сравнению с основным металлом трубы (рис. 8,a). Из этого следует, что при 20 °C обнаруженные различия в структуре сплава в OM, ЗТВ и МШ не оказывают влияния на кратковременные механические характеристики сварного соединения, а незначительное понижение динамических свойств обусловлено наличием неизбежных дефектов в сварном шве.

При повышении температуры до 870 °С проявляется влияние структурных особенностей МШ и ЗТВ, однако оно не является значительным. В этом случае при испытаниях на растяжение прочностные характеристики сварного соединения несколько выше, а пластичность — ниже по сравнению с ОМ (рис.  $8, \delta$ ). Это согласуется с повышенной твердостью МШ и ЗТВ вследствие большего содержания карбидных фаз в структуре и ее большей дисперсности по сравнению с ОМ.

Разрушение образцов при обеих температурах испытания на растяжение происходит на участках металла шва или ЗТВ (рис. 9). При этом в процессе испытания при 870 °С на участке основ-



Рис. 8. Микроструктура сплава HP40NbTi в обратно-отраженных электронах в 3TB вблизи границы со 2<sup>-м</sup> валиком металла шва сварного соединения Fig. 8. Microstructure of the HP40NbTi alloy in back-reflected electrons in the ZTV near the boundary with the 2<sup>-nd</sup> roller of the weld metal



Рис. 9. Внешний вид и микроструктура вблизи поверхности разрушения образцов, изготовленных из сварного соединения сплава HP40NbTi, после испытаний на статическое растяжение при 20 °C (*a*, *b*) и 900 °C (*b*)
Fig. 9. General view and microstructure near the fracture surface of samples made of HP40NbTi alloy welded joint after static tensile tests at 20 °C (*a*, *c*) and 900 °C (*b*)

ного металла наблюдается локальное уменьшение площади поперечного сечения образцов на 20-30%, т.е. происходит сосредоточенная деформация.

Излом всех образцов после испытаний при обеих температурах имеет однородную макрогеометрию и выглядит матовым, серого цвета (рис. 10). Морфология поверхности разрушения является дендритной с характерными столбчатыми кристаллами с четко выраженным рельефом элементов дендритного строения структуры сплава. При большем увеличении видно, что поверхность излома состоит из плоских параллельных террас, чередующихся с областями с ямочным микрорельефом (рис. 11). Вероятно, разрушение сплава на этих участках происходит соответственно по межфазной границе аустенит/карбид и областям аустенита не содержащим карбид-







Fig. 10. Fracture surface of samples (at different magnifications) made of welded joint (a, c, e, g) and pipe metal (b, d, f, h) made of HP40NbTi alloy, after static tensile tests at 20 °C (a, b, e, f) and 900 °C (c, d, g, h)



Рис. 11. Поверхность разрушения образцов (при разных увеличениях), изготовленных из сварного соединения сплава HP40NbTi, после испытаний на статическое растяжение при 20 °C (*a*, *б*) и 900 °C (*b*, *c*) Fig. 11. Fracture surface of samples (at different magnifications) made of a welded joint of the HP40NbTi alloy, after static tensile tests at 20 °C (*a*, *b*) and 900 °C (*c*, *d*)

ных включений. Кроме того, поверхность излома содержит участки с хрупкими микротрещинами и пустоты. Элементный анализ выявил, что микротрещины образуются в частицах карбидов на основе хрома и на основе ниобия (рис. 12), а пустоты, вероятно, возникают в результате их скалывания.

Характерно, что образование многочисленных микротрещин в частицах карбидов ниобия и, особенно, хрома (рис. 13,a) не приводит к образованию макротрещин в вязкой аустенитной матрице. Макротрещина развивается по карбидной сетке на границах  $\gamma$ -зерен, причем преимуще-





в)

Спектр №	Фаза	Содержание химических элементов, масс.%										
		Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	W	Mn	Мо	V	С
1	γ	1,03	0,02	27,64	35,30	33,87	0,42	0,03	1,27	0,36	0,03	н.о.
2	Cr <sub>m</sub> C <sub>n</sub>	0,07	0,02	80,59	7,03	2,13	0,14	1,18	0,38	0,20	0,02	8,24
3	NbC	0,36	3,67	3,56	0,92	0,64	78,61	0,42	0,34	0,24	0,03	11,21





Рис. 12. Поверхность разрушения (*a*, *б*) и химический состав фаз (*в*-*д*) в изломе образца, изготовленного из сварного соединения сплава HP40NbTi, после испытаний на статическое растяжение при 20 °C

Fig. 12. Fracture surface (a, b) and chemical composition of the phases (c-e) in the fracture of a sample made of a welded joint of the HP40NbTi alloy, after static tensile tests at 20 °C

ственно в местах скопления частиц карбидов ниобия (рис. 13,*б*). Подобный характер разрушения в HP-Nb сплавах наблюдали в [41, 72–74].

Детальный анализ траектории трещин в 3TB сварного соединения после испытаний на растяжение показал, что большинство трещин возникают вблизи включений G-фазы, образовавшейся в результате превращения карбида ниобия (рис. 14,*a*). Дальнейший рост трещин ориентирован по частицам первичных карбидов на границах  $\gamma$ -фазы в направлениях наибольшего количества карбидов ниобия (рис. 14,*б*). Необходимо отметить, что количество G-фазы в сплаве после испытаний при 870 °C значительно больше, чем при 20 °C. При этом G-фаза присутствует в структуре сплава в местах контакта первичных карбидов ниобия и хрома, но практически не образуется в частицах карбида ниобия изолированно расположенных в матрице. Образование G-фазы на межфазных границах первичных карбидов ниобия и хрома, расположенных по границам ден-



Рис. 13. Микроструктура различных участков вблизи поверхности разрушения (*a-e*) образцов, изготовленных из сварного соединения сплава HP40NbTi, после испытаний на статическое растяжение при 20 °C Fig. 13. Microstructure of various sites near the fracture surface (*a-c*) of samples made of a welded joint of the HP40NbTi alloy after static tensile tests at 20 °C





пектр №	Фаза	Содержание химических элементов, масс.%											
		Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	W	Mn	Мо	V	C	
1	NbC	0,22	2,38	2,56	1,58	0,73	81,94	0,11	0,04	0,10	0,02	10,32	
2	NbC	0,32	1,26	1,81	1,32	1,15	83,61	0,15	0,07	0,09	0,03	10,19	
3	Cr <sub>m</sub> C <sub>n</sub>	0,05	-	82,72	6,27	1,53	0,09	1,17	0,16	0,14	0,02	7,94	
4	Cr <sub>m</sub> C <sub>n</sub>	0,03	-	82,49	5,38	1,74	0,11	1,56	0,23	0,12	0,02	8,32	
5	G	6,73	—	26,54	13,47	32,78	20,25	—	_	0,23	_	-	
6	γ	1,31	0,04	27,58	33,65	36,30	0,34	0,03	0,64	0,06	0,02	н.о.	
7	γ	1,22	0,02	27,94	33,56	36,47	0,04	0,03	0,54	0,13	0,02	н.о.	

Рис. 14. Микроструктура (a, б) и химический состав фаз (a, в) в ЗТВ вблизи поверхности разрушения образцов, изготовленных из сварного соединения сплава HP40NbTi, после испытаний на статическое растяжение при 20 °C
 Fig. 14. Microstructure (a, b) and chemical composition of the phases (a, c) of ZTE near the fracture surface of samples made of a welded joint of the HP40NbTi alloy, after static tensile tests at 20 °C

в)

C



Рис. 15. Механические свойства основного металла и сварного соединения из сплава HP40NbTi при испытаниях на растяжение при 20 °C (*a*) и 870 °C (*b*)
 Fig. 15. Mechanical properties of the base metal and the welded joint of the HP40NbTi alloy under tensile tests at 20 °C (*a*) and 870 °C (*b*)

дритов аустенита провоцирует зарождение трещин в этих участках структуры. Следует отметить, что установленное влияние контакта карбида ниобия с карбидом хрома как катализатора образования G-фазы в структуре сплава HP40NbTi согласуется с предложенным в [75] механизмом NbC→G превращения.

Результаты анализа изломов позволяют заключить, что разрушение сварного соединения происходит по механизму квазискола. Процесс разрушения начинается с образования микротрещин в хрупких частицах первичных эвтектических карбидов и вблизи частиц G-фазы, образующейся при превращении карбида ниобия. При дальнейшем нагружении происходит рост микротрещин по карбидной сетке вдоль границ зерен аустенита и образование магистральной трещины, которая развивается вдоль границ дендритных кристаллов (рис. 13,*в*). Такой механизм разрушения сплава HP40NbTi хорошо согласуется с результатами исследований сплава 20Cr32Ni1Nb [76].

Результаты испытаний на длительную прочность выявили значительное влияние структуры сварного соединения на свойства сплава HP40NbTi (рис. 15). При одинаковых условиях испытания время до разрушения сварного соединения в два раза меньше, а пластические характеристики — на ~30% ниже по сравнению с основным металлом. Характерно, что, если при ударном изгибе и статическом растяжении разрушение образцов происходит преимущественно на участке металла шва и реже — на участке 3TB, то при длительном высокотемпературном нагружении образец разрушается на участке 3TB.

Исследование изломов образцов сварного соединения и основного металла после испытаний на длительную прочность не выявило существенных отличий характера разрушения сплава по сравнению с кратковременными испытаниями. Однако количественным анализом с использованием электронной микроскопии [50] установлено, что после длительных испытаний в структуре сплава HP40NbTi в зоне термического влияния сварного соединения присутствует 1,8-2,0 объемн.% G-фазы. Это в ~3 раза больше, чем в 3TB до испытаний, но незначительно превышает ее содержание в OM после испытаний. При этом во всех случаях трещины распространяются вдоль границ зерен по сетке эвтектических карбидов преимущественно на участках образования G-фазы.

Таким образом, включения G-фазы в структуре сплава HP40NbTi играют значительную роль в механизме его разрушения, особенно при длительной высокотемпературной эксплуатации. По этой причине образование G-фазы в 3TB и металле шва при изготовлении сварного соединения из сплава HP40NbTi не изменяет характер разрушения, но значительно снижает его работоспособность, ускоряя превращение NbC $\rightarrow$ G, формирование и укрупнение включений G-фазы и, как следствие, образование трещин на границах дендритных зерен аустенита.

#### Выводы

Результаты исследования структуры и свойств трубного сварного соединения печей пиролиза из сплава HP40NbTi на основе системы Fe-25Cr-35Ni позволяют заключить следующее:

1. Микроструктура основного металла, зоны термического влияния и металла шва сварного соединения из сплава HP40NbTi значительно различается по морфологии и степени химической неоднородности фаз. Наибольшей неоднородностью характеризуется структура сплава на участ-ке 3TB, состоящая из мелкозернистой разнозернистой аустенитной матрицы с выраженной сегрегацией кремния и мелкими включениями G-фазы вблизи крупных включений эвтектических карбидов на основе хрома и на основе ниобия, содержащих переменное количество других металлических элементов состава сплава.

2. Неоднородность структуры и фазового состава различных участков сварного соединения не существенно влияет на его кратковременные свойства, но приводит к снижению длительной прочности в ~2 раза по сравнению с основным металлом. Характерно, что разрушение сварного соединения при кратковременных механических испытаниях происходит на участке ЗТВ или металла шва, а при длительных – в ЗТВ.

3. Разрушение сварного соединения происходит по механизму квазискола. Морфология поверхности разрушения является дендритной с характерными столбчатыми кристаллами с четко выраженным рельефом элементов дендритного строения структуры сплава. Процесс разрушения начинается с образования микротрещин в хрупких частицах первичных эвтектических карбидов и вблизи частиц G-фазы, образующейся при превращении карбида ниобия. При дальнейшем нагружении происходит рост микротрещин по карбидной сетке вдоль границ зерен аустенита и образование магистральной трещины, которая развивается вдоль границ дендритных кристаллов.

4. Таким образом, присутствие G-фазы в структуре сплава HP40NbTi является неблагоприятным фактором, способствуя образованию и развитию зернограничных трещин. При кратковременном нагружении при комнатных и повышенных температурах ее влияние не существенно, однако, при длительном высокотемпературном нагружении приводит к значительному снижению сопротивления внешним нагрузкам.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Garbiak M., Jasinski W., Piekarski B. Materials for reformer furnace tubes. History of evolution // Arch. Foundry Eng. 2011. V. 11. Is. 2. P. 47–52.

[2] de Almeida L.H., Ribeiro A.F., Le May I. Microstructural characterization of modified 25Cr-35Ni centrifugally cast steel furnace tubes // Mater. Charact. 2003. V. 49. Is. 3. P. 219–229.

[3] Hu B., Chen X., Liu C., Lian C., Chen T. Study on microstructure and properties of centrifugal casting 35Cr45NiNb+MA furnace tubes during service // Mater. High Temp. 2019. V. 36. Is. 6. P. 489–498.

[4] Ghatak A., Robi P.S. High-temperature tensile properties and creep life assessment of 25Cr35NiNb micro-alloyed steel // J. Mater. Eng. Perform. 2016. V. 25. Is. 5. P. 2000–2007.

[5] **Nam S.W.** Assessment of damage and life prediction of austenitic stainless steel under high temperature creep-fatigue interaction condition // Mater. Sci. Eng. A. 2002. V. 322. P. 64–72.

[6] Рудской А.И., Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д., Петров С.Н. Особенности структуры и длительная прочность литого жаропрочного сплава 45Х26Н33С2Б2 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 4 (694). С. 42–47.

[7] **Ilman M.N., Kusmono.** Analysis of material degradation and life assessment of 25Cr-38Ni-Mo-Ti wrought alloy steel (HPM) for cracking tubes in an ethylene plant // Eng. Failure Anal. 2014. V. 42. P. 100–108.

[8] Le May I., Da Silveira T., Vianna C. Criteria for the evaluation of damage and remaining life in reformer furnace tubes // Int. J. Pressure Vessels Piping. 1996. V. 66. Is. 1. P. 233–241.

[9] Gong J.M., Tu S.T., Yoon K.B. Damage assessment and maintenance strategy of hydrogen reformer furnace tubes // Eng. Failure Anal.1999. V. 6, Is. 3. P. 143–153.

[10] **Kaya A.A., Krauklis P., Young D.J.** Microstructure of HK40 alloy after high-temperature service in oxidizing/carburizing environment: I. Oxidation phenomena and propagation of a crack // Mater. Charact. 2002. V. 49. P. 11–21.

[11] Кондратьев С.Ю., Петров С.Н., Анастасиади Г.П., Цеменко А.В. Структурные особенности высокотемпературного окисления литого жаропрочного сплава HP40NbTi. Часть I. Кинетика окисления // Металловедение и термическая обработка металлов. 2020. № 1 (775). С. 35–46.

[12] Кондратьев С.Ю., Петров С.Н., Анастасиади Г.П., Цеменко А.В. Структурные особенности высокотемпературного окисления литого жаропрочного сплава HP40NbTi. Часть II. Эволюция микроструктуры и фазового состава // Металловедение и термическая обработка металлов. 2020. № 1 (775). С. 47–56.

[13] Kondrat'ev S.Y., Anastasiadi G.P., Ptashnik A.V., Petrov S.N. Kinetics of the high-temperature oxidation of heat-resistant statically and centrifugally cast HP40NbTi alloys // Oxid. Met. 2019. V. 91. Is. 1-2. P. 33–53.

[14] Kondrat'ev S.Yu., Anastasiadi G.P., Ptashnik A.V., Petrov S.N. Evolution of the microstructure and phase composition of a subsurface of cast HP-type alloy during a long-term high-temperature aging // Mater. Charact. 2019. V. 150. P. 166–173.

[15] Kondrat'ev S.Yu., Anastasiadi G.P., Ptashnik A.V., Petrov S.N. The mechanisms of scale and subsurface diffusion zone formation of heat-resistant HP40NbTi alloy at long-term high-temperature exposure // Materialia. 2019. V. 7. Article 100427.

[16] Анастасиади Г.П., Кондратьев С.Ю., Рудской А.И. Избирательное высокотемпературное окисление фаз в литом жаропрочном сплаве системы 25Cr - 35Ni - Si - Nb - C // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 8 (710). С. 3-8.

[17] Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Рудской А.И. Наноструктурный механизм образования оксидной пленки в жаростойких сплавах на основе Fe -25Cr -35Ni // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 10 (712). С. 15–20. [Kondrat'ev S.Yu., Anastasiadi G.P., Rudskoy A.I. Nanostructure mechanism of formation of oxide film in heat-resistant Fe-25Cr-35Ni superalloys // Met. Sci. Heat. Treat. 2015. V. 56, No. 9-10. P. 531–536.

[18] **Borjali S., Allahkaram S.R., Khosravi H.** Effects of working temperature and carbon diffusion on the microstructure of high pressure heat-resistant stainless steel tubes used in pyrolysis furnaces during service condition // Mater. Des. 2012. V. 34. P. 65–73.

[19] **Kaya A.A.** Microstructure of HK40 alloy after high-temperature service in oxidizing/carburizing environment: II. Carburization and carbide transformations // Mater. Charact. 2002. V. 49. P. 23–34.

[20] Singhatham C., Eidhed K. Effect of carburizing on microstructure and weldability of 35Cr-45Ni-Nb alloys in the ethylene heating furnace // Appl. Mech. Mater. 2016. V. 848. P. 39–42.

[21] Singhatham C., Eidhed K. The study of welding repair parameters of tube 35Cr-45Ni-Nb alloy of the ethylene heating furnace // Appl. Mech. Mater. 2016. N. 848. P. 35–38.

[22] Abbasi M., Park I., Ro Y., Nam J., Ji Y., Kim J., Ayer R. Microstructural evaluation of welded freshto-aged reformer tubes used in hydrogen production plants // Eng. Failure Anal. 2018. V. 92. P. 368–377.

[23] **Reihani A., Haghighi R.D.** Failure analysis and weld ability improvement of 35%Cr-45%Ni heat resistant alloy // Eng. Failure Anal. 2015. V. 52. P. 97–108.

[24] **Tawancy H.M.** Failure of a furnace outlet pipe in a benzene plant by internal oxidation due to improper welding practice // Eng. Failure Anal. 2009. V. 16. Is. 7. P. 2179–2185.

[25] **de Almeida L.H., Emygdio P.R.O., Le May I., Ferraz F.C.** Microstructural characterization and geometrical analysis of welded joints of high temperature stainless steel tubes / In: Burke M.G., Clark E.A., Palmiere E.J., editors. Microstructural science. Understanding microstructure: key to advances in materials, Vol. 24. Materials Park (OH): ASM; 1996. – P. 193–198.

[26] Mostafaei M., Shamanian M., Purmohamad H., et al. Increasing weldability of service-aged reformer tubes by partial solution annealing // J. Mater. Eng. Perform. 2016. V. 25. Is. 4. P. 1291–1303.

[27] Ray A.K., Sinha S.K., Tiwari Y.N., et al. Analysis of failed reformer tubes // Eng. Failure Anal. 2003.V. 10. Is. 3. P. 351–362.

[28] Ul-Hamid A., Tawancy H.M., Mohammed A.-R.I., et al. Failure analysis of furnace radiant tubes exposed to excessive temperature // Eng. Failure Anal. 2006. V. 13. Is. 6. P. 1005–1021.

[29] Santos M., Guedes M., Baptista R., Infante V., Cláudio R.A. Effect of severe operation conditions on the degradation state of radiant coins in pyrolysis furnaces // Eng. Failure Anal. 2015. V. 56. P. 194–203.

[30] Wang W.Z., Xuan F.Z., Wang Z.D., Wang B., Liu C.J. Effect of overheating temperature on the microstructure and creep behavior of HP40Nb alloy // Mater. Des. 2011. V. 32. Is. 7. P. 4010–4016.

[31] Guo J., Cao T., Cheng C., Meng X., Zhao J. Microstructure evolution and mechanical properties degradation of HPNb alloy after a five-2021 service // Mater. Res. Express. 2018. V. 5. Is. 4. 046509.

[32] Bonaccorsi L., Guglielmino E., Pino R., Servetto C., Sili A. Damage analysis in Fe-Cr-Ni centrifugally cast alloy tubes for reforming furnaces // Eng. Failure Anal. 2014. V. 36. P. 65–74.

[33] Alvino A., Lega D., Giacobbe F., Mazzocchi V., Rinaldi A. Damage characterization in two reformer heater tubes after nearly 10 2021s of service at different operative and maintenance conditions // Eng. Failure Anal. 2010. V. 17. Is. 7-8. P. 1526–1541.

[34] Liu C.J., Chen Y. Variations of the microstructure and mechanical properties of HP40Nb hydrogen reformer tube with time at elevated temperature // Mater. Des. 2011. V. 32. Is. 4. P. 2507–2512.

[35] Allahkaram S.R., Borjali S., Khosravi H. Investigation of weldability and property changes of high pressure heat-resistant cast stainless steel tubes used in pyrolysis furnaces after a five-2021 service // Mater. Des. 2012. V. 33. P. 476–484.

[36] **Guglielmino E., Pino R., Servetto C., Sili A**. Damage investigation on welded tubes of a reforming furnace // La Metallurgia Italiana. 2015. V. 107. Is. 1. P. 53–58.

[37] Shinozaki K., Kuroki H., Nakao Y., et al. Deterioration of weldability of long-term aged HP heat-resistant cast steel containing Nb, Mo, and W // Weld. Int. 1999. V. 13. Is. 1. P. 39–48.

[38] Guan K., Wang Q. Analysis of failed electron beam welds in ethylene cracking tubes // Eng. Failure Anal. 2011. V. 18. Is. 5. P. 1366–1374.

[39] **Reihani A. Razavi S.A., Abbasi E., et al.** Failure analysis of welded radiant tubes made of cast heat-resisting steel // J. Fail. Anal. Prevent. 2013. V. 13. Is. 6. P. 658–665.

[40] Kenik E.A., Maziasz P.J., Swindeman R.W., Cervenka J., May D. Structure and phase stability in cast modified-HP austenite after long-term ageing // Scr. Mater. 2003. V. 49. Is. 2. P. 117–122.

[41] **Monobe L.S., Schön C.G.** Microstructural and fractographic investigation of a centrifugally cast 20Cr32Ni + Nb alloy tube in the 'as cast' and aged states // J. Mater. Res. Technol. 2013. V. 2. Is. 2. P. 195–251.

[42] Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Орыщенко А.С., Фукс М.Д., Петров С.Н. Трансформация структуры жаропрочного сплава 0,45С – 26Сг – 33Ni – 2Si – 2Nb при длительной высокотемпературной выдержке // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 10 (700). С. 7–14.

[43] Рудской А.И., Анастасиади Г.П., Кондратьев С.Ю., Орыщенко А.С., Фукс М.Д. Влияние фактора числа электронных вакансий на кинетику образования, роста и растворения фаз при длительных высокотемпературных выдержках жаропрочного сплава 0,45С-26Сг-33Ni-2Si-2Nb // Физика металлов и металловедение. 2014. Т. 115. № 1. С. 3–13.

[44] Alvino A., Ramires D., Tonti A., Lega D. Influence of chemical composition on microstructure and phase evolution of two HP heat resistant stainless steels after long term plant-service aging // Mater. High Temp. 2014. V. 31. Is. 1. P. 2–11.

[45] Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д., Петров С.Н. Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 0,45С-26Сг-33Ni-2Si-2Nb при температурах эксплуатации. Сообщение 1. Литое состояние // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. № 1 (142). С. 155–163.

[46] **Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д., Петров С.Н.** Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 0.45С-26Сг-33Ni-2Si-2Nb при температурах эксплуатации. Сообщение 2. Влияние высокотемпературной выдержки // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. № 1-1 (147). С. 217–228.

[47] Рудской А.И., Анастасиади Г.П., Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Фукс М.Д. Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 0,45С-26Сг-33Ni-2Si-2Nb при температурах эксплуатации. Сообщение 3. Механизм и кинетика фазовых превращений // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. № 3-2 (154). С. 143–150.

[48] Рудской А.И., Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д. Механизм и кинетика фазовых превращений в жаропрочном сплаве 45Х26Н33С2Б2 при длительных высокотемпературных выдержках. Часть 1 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 1 (703). С. 3–8.

[49] Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Орыщенко А.С., Фукс М.Д. Механизм и кинетика фазовых превращений в жаропрочном сплаве 45Х26Н33С2Б2 при длительных высокотемпературных выдержках. Часть 2 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 3 (705). С. 12–19.

[50] Кондратьев С.Ю., Пташник А.В., Анастасиади Г.П., Петров С.Н. Анализ превращений карбидных фаз в сплаве 25Сr35Ni методом количественной электронной микроскопии // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 7 (721). С. 36–43.

[51] Talis A.L., Kraposhin V.S., Kondrat'ev S.Y., Nikolaichik V.I., Svyatysheva E.V., Everstov A.A. Non-crystallographic symmetry of liquid metal, flat crystallographic faults and polymorph transformation of the M7C3 carbide // Acta Crystallogr. A. 2017. V. 73. P. 209–217.

[52] Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Петров С.Н., Пташник А.В., Святышева Е.В. Морфологические характеристики карбидов хрома в жаропрочных сплавах HP40NbTi в литом состоянии и после высокотемпературной выдержки // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2016. – № 1 (727). – С. 22–29.

[53] Kondrat'ev S.Yu., Anastasiadi G.P., Petrov S.N., Ptashnik A.V. Kinetics of the formation of intermetallic phases in HP-type heat-resistant alloys at long-term high-temperature exposure // Metall. Mater. Trans. A. 2017. V. 48. Is. 1. P. 482–492.

[54] Attarian M., Taheri A.K., Jalilvand S., et al. Microstructural and failure analysis of welded primary reformer furnace tube made of HP-Nb micro alloyed heat resistant steel // Eng. Failure Anal. 2016. V. 68. P. 32–51.

[55] Кондратьев С.Ю., Фролов М.А., Фукс М.Д., Святышева Е.В. Особенности строения трубного сварного соединения из сплава HP40NbTi // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26, № 3. С. 33–55.

[56] **Фролов М.А., Фукс М.Д., Кондратьев С.Ю.** Влияние структуры на эксплуатационные свойства сварного соединения из жаропрочного сплава Fe – 25Cr – 35Ni // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. Т. 18. № 12. С. 551–562.

[57] Кондратьев С.Ю., Фукс М.Д., Фролов М.А., Петров С.Н. Анализ структуры, фазового состава и механических свойств трубного сварного соединения из жаропрочного сплава HP40NbTi // Металловедение и термическая обработка металлов. 2020. № 11 (785). С. 21–31.

[58] **Beattie H.J., Versnyder F.L.** A new complex phase in a high-temperature alloy // Nature. 1956. V. 178. P. 208–209.

[59] **Bergman G., Waugh J.L.T.** The crystal structure of the intermetallic compound M6Si7Cu16 // Acta Crystallogr. 1956. V. 9. Pt 3. P. 214–217.

[60] Villars P., Calvert L.D. (Eds.) Pearson's handbook of crystallographic data for intermetallic phases.  $-2^{nd}$  ed., in 4 vols. – Materials Park, Ohio: ASM International, 1991. – V. 3. P. 4531–4532.

[61] Chen Y., Dai X., Chen X., Yang B. The characterization of G-phase in Fe20Cr9Ni cast duplex stainless steel // Mater. Charact. 2019. V. 149. P. 74–81.

[62] **Ribeiro A.F., Borges R.M.T., de Almeida L.H.** Phase transformation in heat resistant steels observed by STEM (NbTi)C–NiNbSi (G-Phase) // Acta Microscopica. 2002. V. 11. Is. 1. P. 59–63.

[63] **Piekarski B.** Effect of Nb and Ti additions on microstructure, and identification of precipitates in stabilized Ni-Cr cast austenitic steels // Mater. Charact. 2001. V. 47. Is. 3-4. P. 181–186.

[64] Chen Q.Z., Thomas C.W., Knowles D.M. Characterisation of 20Cr32Ni1Nb alloys in as-cast and ex-service conditions by SEM, TEM and EDX // Mater. Sci. Eng., A. 2004. V. 374. Is. 1-2. P. 398–408.

[65] Ecob R.C., Lobb R.C., Kohler V.L. The formation of G-phase in 20/25 Nb stainless steel AGR fuel cladding alloy and its effect on creep properties // J. Mater. Sci. 1987. V. 22. Is. 8. P. 2867–2880.

[66] **Knowles D.M., Thomas C.W., Keen D.J., Chen Q.Z.** In service embrittlement of cast 20Cr32-Ni1Nb components used in steam reformer applications // Int. J. Pressure Vessels Piping. 2004. V. 81. Is. 6. P. 499–506.

[67] Abbasi M., Park I., Ro Y., Ji Y., Ayer R., Shim J.-H. G-phase formation in twenty-2021s aged heat-resistant cast austenitic steel reformer tube // Mater. Charact. 2019. V. 148. P. 297–306.

[68] **Ibañez R.A.P., de Almeida Soares G.D., de Almeida L.H., Le May I.** Effects of Si content on the microstructure of modified-HP austenitic steels // Mater. Charact. 1993. V. 30. Is. 4. P. 243–249.

[69] **Powell D.J., Pilkington R., Miller D.A.** The precipitation characteristics of 20% Cr/25% Ni–Nb stabilised stainless steel // Acta Metall. 1988. V. 36. Is. 3. P. 713–724.

[70] **Yoshida M.** The segregation of silicon on austenite grain boundaries and on austenite/carbide interfaces in high carbon steels // Scr. Metall. 1982. V. 16. Is. 7. P. 787–790.

[71] Nunes F.C., de Almeida L.H., Dille J., Delplancke J.-L., Le May I. Microstructural changes caused by yttrium addition to NbTi-modified centrifugally cast HP-type stainless steels // Mater. Charact. 2007. V. 58. P. 132–142.

[72] Shi S., Lippold J.C. Microstructure evolution during service exposure of two cast, heat-resisting stainless steels – HP-Nb modified and 20–32Nb // Mater. Charact. 2008. V. 59. P. 1029–1040.

[73] **Kargarnejad S., Abbasi-Chianeh V.** Failure analysis of a burner ring made of 20Cr32NiNb alloy in gas turbine combustion chamber // Case Studies in Eng. Failure Anal. 2014. V. 2. Is. 2. P. 138–143.

[74] **Hoffman J.J., Magnan J.** Cast 20Cr32Ni1Nb alloy aged mechanical property improvements via chemistry modifications / In: NACE International, CORROSION 2003, San Diego, California, 2003. – Paper Number: NACE-03469.

[75] Vaché N., Steyer P., Duret-Thual C., Perez M., Douillard T., Rauch E., Véron M., Renou G., Dupoiron F., Augustin C., Cazottes S. Microstructural study of the NbC to G-phase transformation in HP-Nb alloys // Materialia. 2020. V. 9. 100593. [76] Yan J., Gu Y., Dang Y., Zhao X., Lu J., Yuan Y., Yang Z., Yin H. Effect of carbon on the microstructure evolution and mechanical properties of low Si-containing centrifugal casting 20Cr32Ni1Nb alloy // Mater. Chem. Phys. 2016. V. 175. P. 107–117.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ФУКС Михаил Дмитриевич** — начальник лаборатории, ФГУП "ЦНИИ КМ "ПРОМЕТЕЙ" им. И.В. Горынина" — НИЦ "КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ", канд. техн. наук. E-mail: stoma\_87@mail.ru

ФРОЛОВ Максим Алексеевич — инженер, ФГУП "ЦНИИ КМ "ПРОМЕТЕЙ" им. И.В. Горынина" — НИЦ "КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ", без степени. E-mail: frol\_maks20@mail.ru

**ЦЕМЕНКО Алина Вадимовна** — инженер 1-й категории, ФГУП "ЦНИИ КМ "ПРОМЕТЕЙ" им. И.В. Горынина" — НИЦ "КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ", без степени. E-mail: ptashnik.avp1993@yandex.ru

#### Дата поступления статьи в редакцию: 24.03.2021

## REFERENCES

[1] **M. Garbiak, W. Jasinski, B. Piekarski,** Materials for reformer furnace tubes. History of evolution // Arch. Foundry Eng. 2011. V. 11. Is. 2. P. 47–52.

[2] L.H. de Almeida, A.F. Ribeiro, I. Le May, Microstructural characterization of modified 25Cr-35Ni centrifugally cast steel furnace tubes // Mater. Charact. 2003. V. 49. Is. 3. P. 219–229.

[3] **B. Hu, X. Chen, C. Liu, C. Lian, T. Chen,** Study on microstructure and properties of centrifugal casting 35Cr45NiNb+MA furnace tubes during service // Mater. High Temp. 2019. V. 36. Is. 6. P. 489–498.

[4] A. Ghatak, P.S. Robi, High-temperature tensile properties and creep life assessment of 25Cr35NiNb micro-alloyed steel // J. Mater. Eng. Perform. 2016. V. 25. Is. 5. P. 2000–2007.

[5] S.W. Nam, Assessment of damage and life prediction of austenitic stainless steel under high temperature creep-fatigue interaction condition // Mater. Sci. Eng. A. 2002. V. 322. P. 64–72.

[6] A.I. Rudskoy, A.S. Oryshchenko, S.Yu. Kondratyev, G.P. Anastasiadi, M.D. Fuks, S.N. Petrov, Osobennosti struktury i dlitelnaya prochnost litogo zharoprochnogo splava 45Kh26N33S2B2 // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2013. No 4 (694). S. 42–47.

[7] **M.N. Ilman, Kusmono,** Analysis of material degradation and life assessment of 25Cr-38Ni-Mo-Ti wrought alloy steel (HPM) for cracking tubes in an ethylene plant // Eng. Failure Anal. 2014. V. 42. P. 100–108.

[8] I. Le May, T. Da Silveira, C. Vianna, Criteria for the evaluation of damage and remaining life in reformer furnace tubes // Int. J. Pressure Vessels Piping. 1996. V. 66. Is. 1. P. 233–241.

[9] J.M. Gong, S.T. Tu, K.B. Yoon, Damage assessment and maintenance strategy of hydrogen reformer furnace tubes // Eng. Failure Anal.1999. V. 6, Is. 3. P. 143–153.

[10] A.A. Kaya, P. Krauklis, D.J. Young, Microstructure of HK40 alloy after high-temperature service in oxidizing/carburizing environment: I. Oxidation phenomena and propagation of a crack // Mater. Charact. 2002. V. 49. P. 11–21.

[11] **S.Yu. Kondratyev, S.N. Petrov, G.P. Anastasiadi, A.V. Tsemenko,** Strukturnyye osobennosti vysokotemperaturnogo okisleniya litogo zharoprochnogo splava HP40NbTi. Chast I. Kinetika okisleniya // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2020. № 1 (775). S. 35–46. [12] S.Yu. Kondratyev, S.N. Petrov, G.P. Anastasiadi, A.V. Tsemenko, Strukturnyye osobennosti vysokotemperaturnogo okisleniya litogo zharoprochnogo splava HP40NbTi. Chast II. Evolyutsiya mikrostruktury i fazovogo sostava // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2020.  $\mathbb{N}$  1 (775). S. 47–56.

[13] **S.Y. Kondrat'ev, G.P. Anastasiadi, A.V. Ptashnik, S.N. Petrov,** Kinetics of the high-temperature oxidation of heat-resistant statically and centrifugally cast HP40NbTi alloys // Oxid. Met. 2019. V. 91. Is. 1-2. P. 33–53.

[14] S.Yu. Kondrat'ev, G.P. Anastasiadi, G.P. Ptashnik, S.N. Petrov, Evolution of the microstructure and phase composition of a subsurface of cast HP-type alloy during a long-term high-temperature aging // Mater. Charact. 2019. V. 150. P. 166–173.

[15] **S.Yu. Kondrat'ev, G.P. Anastasiadi, A.V. Ptashnik, S.N. Petrov,** The mechanisms of scale and subsurface diffusion zone formation of heat-resistant HP40NbTi alloy at long-term high-temperature exposure // Materialia. 2019. V. 7. Article 100427.

[16] G.P. Anastasiadi, S.Yu. Kondratyev, A.I. Rudskoy, Izbiratelnoye vysokotemperaturnoye okisleniye faz v litom zharoprochnom splave sistemy 25Cr - 35Ni - Si - Nb - C // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2014. N= 8 (710). S. 3-8.

[17] A.I. Kondratyev, G.P. Anastasiadi, A.I. Rudskoy, Nanostrukturnyy mekhanizm obrazovaniya oksidnoy plenki v zharostoykikh splavakh na osnove Fe -25Cr -35Ni // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2014. No 10 (712). S. 15–20. [Kondrat'ev S.Yu., Anastasiadi G.P., Rudskoy A.I. Nanostructure mechanism of formation of oxide film in heat-resistant Fe-25Cr-35Ni superalloys // Met. Sci. Heat. Treat. 2015. V. 56, No. 9-10. P. 531–536.

[18] **S. Borjali, S.R. Allahkaram, H. Khosravi,** Effects of working temperature and carbon diffusion on the microstructure of high pressure heat-resistant stainless steel tubes used in pyrolysis furnaces during service condition // Mater. Des. 2012. V. 34. P. 65–73.

[19] **A.A. Kaya**, Microstructure of HK40 alloy after high-temperature service in oxidizing/carburizing environment: II. Carburization and carbide transformations // Mater. Charact. 2002. V. 49. P. 23–34.

[20] C. Singhatham, K. Eidhed, Effect of carburizing on microstructure and weldability of 35Cr-45Ni-Nb alloys in the ethylene heating furnace // Appl. Mech. Mater. 2016. V. 848. P. 39–42.

[21] C. Singhatham, K. Eidhed, The study of welding repair parameters of tube 35Cr-45Ni-Nb alloy of the ethylene heating furnace // Appl. Mech. Mater. 2016. N 848. P. 35–38.

[22] M. Abbasi, I. Park, Y. Ro, J. Nam, Y. Ji, J. Kim, R. Ayer, Microstructural evaluation of welded freshto-aged reformer tubes used in hydrogen production plants // Eng. Failure Anal. 2018. V. 92. P. 368–377.

[23] **A. Reihani, R.D. Haghighi,** Failure analysis and weld ability improvement of 35%Cr-45%Ni heat resistant alloy // Eng. Failure Anal. 2015. V. 52. P. 97–108.

[24] **H.M. Tawancy,** Failure of a furnace outlet pipe in a benzene plant by internal oxidation due to improper welding practice // Eng. Failure Anal. 2009. V. 16. Is. 7. P. 2179–2185.

[25] L.H. de Almeida, P.R.O. Emygdio, I. Le May, F.C. Ferraz, Microstructural characterization and geometrical analysis of welded joints of high temperature stainless steel tubes / In: Burke M.G., Clark E.A., Palmiere E.J., editors. Microstructural science. Understanding microstructure: key to advances in materials, Vol. 24. Materials Park (OH): ASM; 1996. – P. 193–198.

[26] M. Mostafaei, M. Shamanian, H. Purmohamad, et al., Increasing weldability of service-aged reformer tubes by partial solution annealing // J. Mater. Eng. Perform. 2016. V. 25. Is. 4. P. 1291–1303.

[27] A.K. Ray, S.K. Sinha, Y.N. Tiwari, et al., Analysis of failed reformer tubes // Eng. Failure Anal. 2003.V. 10. Is. 3. P. 351–362.

[28] A. Ul-Hamid, H.M. Tawancy, A.-R.I. Mohammed, et al., Failure analysis of furnace radiant tubes exposed to excessive temperature // Eng. Failure Anal. 2006. V. 13. Is. 6. P. 1005–1021.

[29] M. Santos, M. Guedes, R. Baptista, V. Infante, R.A. Cláudio, Effect of severe operation conditions on the degradation state of radiant coins in pyrolysis furnaces // Eng. Failure Anal. 2015. V. 56. P. 194–203.

[30] W.Z. Wang, F.Z. Xuan, Z.D. Wang, B. Wang, C.J. Liu, Effect of overheating temperature on the microstructure and creep behavior of HP40Nb alloy // Mater. Des. 2011. V. 32. Is. 7. P. 4010–4016.

[31] J. Guo, T. Cao, C. Cheng, X. Meng, J. Zhao, Microstructure evolution and mechanical properties degradation of HPNb alloy after a five-year service // Mater. Res. Express. 2018. V. 5. Is. 4. 046509.

[32] L. Bonaccorsi, E. Guglielmino, R. Pino, C. Servetto, A. Sili, Damage analysis in Fe-Cr-Ni centrifugally cast alloy tubes for reforming furnaces // Eng. Failure Anal. 2014. V. 36. P. 65–74.

[33] A. Alvino, D. Lega, F. Giacobbe, V. Mazzocchi, A. Rinaldi, Damage characterization in two reformer heater tubes after nearly 10 years of service at different operative and maintenance conditions // Eng. Failure Anal. 2010. V. 17. Is. 7-8. P. 1526–1541.

[34] C.J. Liu, Y. Chen, Variations of the microstructure and mechanical properties of HP40Nb hydrogen reformer tube with time at elevated temperature // Mater. Des. 2011. V. 32. Is. 4. P. 2507–2512.

[35] **S.R. Allahkaram, S. Borjali, H. Khosravi,** Investigation of weldability and property changes of high pressure heat-resistant cast stainless steel tubes used in pyrolysis furnaces after a five-year service // Mater. Des. 2012. V. 33. P. 476–484.

[36] E. Guglielmino, R. Pino, C. Servetto, A. Sili, Damage investigation on welded tubes of a reforming furnace // La Metallurgia Italiana. 2015. V. 107. Is. 1. P. 53–58.

[37] K. Shinozaki, H. Kuroki, Y. Nakao, et al., Deterioration of weldability of long-term aged HP heat-resistant cast steel containing Nb, Mo, and W // Weld. Int. 1999. V. 13. Is. 1. P. 39–48.

[38] **K. Guan, Q. Wang,** Analysis of failed electron beam welds in ethylene cracking tubes // Eng. Failure Anal. 2011. V. 18. Is. 5. P. 1366–1374.

[39] A. Reihani, S.A. Razavi, E. Abbasi, et al., Failure analysis of welded radiant tubes made of cast heat-resisting steel // J. Fail. Anal. Prevent. 2013. V. 13. Is. 6. P. 658–665.

[40] E.A. Kenik, P.J. Maziasz, R.W. Swindeman, J. Cervenka, D. May, Structure and phase stability in cast modified-HP austenite after long-term ageing // Scr. Mater. 2003. V. 49. Is. 2. P. 117–122.

[41] **L.S. Monobe, C.G. Schön,** Microstructural and fractographic investigation of a centrifugally cast 20Cr32Ni + Nb alloy tube in the 'as cast' and aged states // J. Mater. Res. Technol. 2013. V. 2. Is. 2. P. 195–251.

[42] A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondratyev, G.P. Anastasiadi, A.S. Oryshchenko, M.D. Fuks, S.N. Petrov, Transformatsiya struktury zharoprochnogo splava 0,45C - 26Cr - 33Ni - 2Si - 2Nb pri dlitelnoy vysokotemperaturnoy vyderzhke // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2013. No 10 (700). S. 7–14.

[43] A.I. Rudskoy, G.P. Anastasiadi, S.Yu. Kondratyev, A.S. Oryshchenko, M.D. Fuks, Vliyaniye faktora chisla elektronnykh vakansiy na kinetiku obrazovaniya, rosta i rastvoreniya faz pri dlitelnykh vysokotemperaturnykh vyderzhkakh zharoprochnogo splava 0.45C-26Cr-33Ni-2Si-2Nb // Fizika metallov i metallovedeniye. 2014. T. 115. № 1. S. 3–13.

[44] A. Alvino, D. Ramires, A. Tonti, D. Lega, Influence of chemical composition on microstructure and phase evolution of two HP heat resistant stainless steels after long term plant-service aging // Mater. High Temp. 2014. V. 31. Is. 1. P. 2–11.

[45] A.S. Oryshchenko, S.Yu. Kondratyev, G.P. Anastasiadi, M.D. Fuks, S.N. Petrov, Osobennosti strukturnykh izmeneniy v zharoprochnom splave 0,45C-26Cr-33Ni-2Si-2Nb pri temperaturakh ekspluatatsii. Soobshcheniye 1. Litoye sostoyaniye // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. 2012. No 1 (142). S. 155–163.

[46] A.S. Oryshchenko, S.Yu. Kondratyev, G.P. Anastasiadi, M.D. Fuks, S.N. Petrov, Osobennosti strukturnykh izmeneniy v zharoprochnom splave 0,45C-26Cr-33Ni-2Si-2Nb pri temperaturakh ekspluatatsii. Soobshcheniye 2. Vliyaniye vysokotemperaturnoy vyderzhki // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbG-PU. 2012. No 1-1 (147). S. 217–228.

[47] A.I. Rudskoy, G.P. Anastasiadi, A.S. Oryshchenko, S.Yu. Kondratyev, M.D. Fuks, Osobennosti strukturnykh izmeneniy v zharoprochnom splave 0,45C-26Cr-33Ni-2Si-2Nb pri temperaturakh ekspluatatsii. Soobshcheniye 3. Mekhanizm i kinetika fazovykh prevrashcheniy // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. 2012. № 3–2 (154). S. 143–150.

[48] A.I. Rudskoy, A.S. Oryshchenko, S.Yu. Kondratyev, G.P. Anastasiadi, M.D. Fuks, Mekhanizm i kinetika fazovykh prevrashcheniy v zharoprochnom splave 45Kh26N33S2B2 pri dlitelnykh vysokotemperaturnykh vyderzhkakh. Chast 1 // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2014.  $\mathbb{N}$  1 (703). S. 3–8.

[49] A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondratyev, G.P. Anastasiadi, A.S. Oryshchenko, M.D. Fuks, Mekhanizm i kinetika fazovykh prevrashcheniy v zharoprochnom splave 45Kh26N33S2B2 pri dlitelnykh vysokotemperaturnykh vyderzhkakh. Chast 2 // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2014.  $\mathbb{N}$  3 (705). S. 12–19.

[50] **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. 2015. № 7 (721). S. 36–43.

[51] A.L. Talis, V.S. Kraposhin, S.Y. Kondrat'ev, V.I. Nikolaichik, E.V. Svyatysheva, A.A. Everstov, Non-crystallographic symmetry of liquid metal, flat crystallographic faults and polymorph transformation of the M7C3 carbide // Acta Crystallogr. A. 2017. V. 73. P. 209–217.

[52] S.Yu. Kondratyev, G.P. Anastasiadi, S.N. Petrov, A.V. Ptashnik, Ye.V. Svyatysheva, Morfologicheskiye kharakteristiki karbidov khroma v zharoprochnykh splavakh HP40NbTi v litom sostoyanii i posle vysokotemperaturnoy vyderzhki // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov.  $-2016. - N \ge 1$  (727). -S. 22–29.

[53] **S.Yu. Kondrat'ev, G.P. Anastasiadi, S.N. Petrov, A.V. Ptashnik,** Kinetics of the formation of intermetallic phases in HP-type heat-resistant alloys at long-term high-temperature exposure // Metall. Mater. Trans. A. 2017. V. 48. Is. 1. P. 482–492.

[54] **M. Attarian, A.K. Taheri, S. Jalilvand, et al.,** Microstructural and failure analysis of welded primary reformer furnace tube made of HP-Nb micro alloyed heat resistant steel // Eng. Failure Anal. 2016. V. 68. P. 32–51.

[55] S.Yu. Kondratyev, M.A. Frolov, M.D. Fuks, Ye.V. Svyatysheva, Osobennosti stroyeniya trubnogo svarnogo soyedineniya iz splava HP40NbTi // Materialovedeniye. Energetika. 2020. T. 26, № 3. S. 33–55.

[56] M.A. Frolov, M.D. Fuks, S.Yu. Kondratyev, Vliyaniye struktury na ekspluatatsionnyye svoystva svarnogo soyedineniya iz zharoprochnogo splava Fe–25Cr–35Ni // Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii. 2020. T. 18. № 12. S. 551–562.

[57] S.Yu. Kondratyev, M.D. Fuks, M.A. Frolov, S.N. Petrov, Analiz struktury, fazovogo sostava i mekhanicheskikh svoystv trubnogo svarnogo soyedineniya iz zharoprochnogo splava HP40NbTi // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. 2020.  $\mathbb{N}$  11 (785). S. 21–31.

[58] **H.J. Beattie, F.L. Versnyder,** A new complex phase in a high-temperature alloy // Nature. 1956. V. 178. P. 208–209.

[59] **G. Bergman, J.L.T. Waugh,** The crystal structure of the intermetallic compound M6Si7Cu16 // Acta Crystallogr. 1956. V. 9. Pt 3. P. 214–217.

[60] **P. Villars, L.D. Calvert,** (Eds.) Pearson's handbook of crystallographic data for intermetallic phases.  $-2^{nd}$  ed., in 4 vols. – Materials Park, Ohio: ASM International, 1991. – V. 3. P. 4531–4532.

[61] **Y. Chen, X. Dai, X. Chen, B. Yang,** The characterization of G-phase in Fe20Cr9Ni cast duplex stainless steel // Mater. Charact. 2019. V. 149. P. 74–81.

[62] **A.F. Ribeiro, R.M.T. Borges, L.H. de Almeida,** Phase transformation in heat resistant steels observed by STEM (NbTi)C–NiNbSi (G-Phase) // Acta Microscopica. 2002. V. 11. Is. 1. P. 59–63.

[63] **B. Piekarski**, Effect of Nb and Ti additions on microstructure, and identification of precipitates in stabilized Ni-Cr cast austenitic steels // Mater. Charact. 2001. V. 47. Is. 3-4. P. 181–186.

[64] Q.Z. Chen, C.W. Thomas, D.M. Knowles, Characterisation of 20Cr32Ni1Nb alloys in as-cast and ex-service conditions by SEM, TEM and EDX // Mater. Sci. Eng., A. 2004. V. 374. Is. 1-2. P. 398–408.
[65] **R.C. Ecob, R.C. Lobb, V.L. Kohler,** The formation of G-phase in 20/25 Nb stainless steel AGR fuel cladding alloy and its effect on creep properties // J. Mater. Sci. 1987. V. 22. Is. 8. P. 2867–2880.

[66] **D.M. Knowles, C.W. Thomas, D.J. Keen, Q.Z. Chen,** In service embrittlement of cast 20Cr32-Ni1Nb components used in steam reformer applications // Int. J. Pressure Vessels Piping. 2004. V. 81. Is. 6. P. 499–506.

[67] M. Abbasi, I. Park, Y. Ro, Y. Ji, R. Ayer, J.-H. Shim, G-phase formation in twenty-years aged heat-resistant cast austenitic steel reformer tube // Mater. Charact. 2019. V. 148. P. 297–306.

[68] **R.A.P. Ibañez, G.D. de Almeida Soares, L.H. de Almeida, I. Le May,** Effects of Si content on the microstructure of modified-HP austenitic steels // Mater. Charact. 1993. V. 30. Is. 4. P. 243–249.

[69] **D.J. Powell, R. Pilkington, D.A. Miller,** The precipitation characteristics of 20% Cr/25% Ni–Nb stabilised stainless steel // Acta Metall. 1988. V. 36. Is. 3. P. 713–724.

[70] **M. Yoshida**, The segregation of silicon on austenite grain boundaries and on austenite/carbide interfaces in high carbon steels // Scr. Metall. 1982. V. 16. Is. 7. P. 787–790.

[71] F.C. Nunes, L.H. de Almeida, J. Dille, J.-L. Delplancke, I. Le May, Microstructural changes caused by yttrium addition to NbTi-modified centrifugally cast HP-type stainless steels // Mater. Charact. 2007. V. 58. P. 132–142.

[72] S. Shi, J.C. Lippold, Microstructure evolution during service exposure of two cast, heat-resisting stainless steels – HP-Nb modified and 20–32Nb // Mater. Charact. 2008. V. 59. P. 1029–1040.

[73] S. Kargarnejad, V. Abbasi-Chianeh, Failure analysis of a burner ring made of 20Cr32NiNb alloy in gas turbine combustion chamber // Case Studies in Eng. Failure Anal. 2014. V. 2. Is. 2. P. 138–143.

[74] J.J. Hoffman, J. Magnan, Cast 20Cr32Ni1Nb alloy aged mechanical property improvements via chemistry modifications / In: NACE International, CORROSION 2003, San Diego, California, 2003. – Paper Number: NACE-03469.

[75] N. Vaché, P. Steyer, C. Duret-Thual, M. Perez, T. Douillard, E. Rauch, M. Véron, G. Renou, F. Dupoiron, C. Augustin, S. Cazottes, Microstructural study of the NbC to G-phase transformation in HP-Nb alloys // Materialia. 2020. V. 9. 100593.

[76] J. Yan, Y. Gu, Y. Dang, X. Zhao, J. Lu, Y. Yuan, Z. Yang, H. Yin, Effect of carbon on the microstructure evolution and mechanical properties of low Si-containing centrifugal casting 20Cr32Ni1Nb alloy // Mater. Chem. Phys. 2016. V. 175. P. 107–117.

#### THE AUTHORS

**FUKS Mikhail D.** – "CENTRAL RESEARCH INSTITUTE OF STRUCTURAL MATERIALS "PRO-METEY" NAMED BY I.V. GORYNIN OF NATIONAL RESEARCH CENTER "KURCHATOV INSTI-TUTE". E-mail: stoma\_87@mail.ru

**FROLOV Maksim A.** – "CENTRAL RESEARCH INSTITUTE OF STRUCTURAL MATERIALS "PROMETEY" NAMED BY I.V. GORYNIN OF NATIONAL RESEARCH CENTER "KURCHATOV INSTITUTE". E-mail: frol maks20@mail.ru

**TCEMENKO Alina V.** – "CENTRAL RESEARCH INSTITUTE OF STRUCTURAL MATERIALS "PROMETEY" NAMED BY I.V. GORYNIN OF NATIONAL RESEARCH CENTER "KURCHATOV INSTITUTE". E-mail: ptashnik.avp1993@yandex.ru

#### Received: 24.03.2021

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021

DOI: 10.18721/JEST.27106 УДК 669-539.5

# И.А. Зайцев, А.Н. Блохин

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

# УПРОЧНЕНИЕ ЭПОКСИДНЫХ СМОЛ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОМАТЕРИАЛАМИ

В работе изучено современное состояние области создания композитов на основе эпоксидных матриц с углеродными наноматериалами. Эти композиты считают главными конкурентами многим традиционным конструкционным материалам. В статье проведены исследования углеродных наноматериалов, таких как графен, оксид графена, углеродные нанотрубки, которые позволяют улучшить физико-механические или эксплуатационные характеристики композиционных материалов. Рассмотрены методы их введения в полимерную матрицу и выбраны способы, ориентированные на промышленное производство, а также приведены сравнительные результаты улучшения прочностных характеристик полученных нанокомпозитов. Исследовано улучшение физико-механических свойств полимерного композиционного материала с наполнителем в виде модифицированных углеродных нанотрубок. Лучший образец, содержащий 0,1 масс. % фторированных УНТ в составе композита, продемонстрировал увеличение прочности на разрыв на 48%.

*Ключевые слова:* композит, полимер, эпоксидная смола, углеродные нанотрубки, прочность.

Ссылка при цитировании:

Зайцев И.А., Блохин А.Н. Упрочнение эпоксидных смол углеродными наноматериалами // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 1. С. 74–86. DOI: 10.18721/JEST.27106

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

I.A. Zaytsev, A.N. Blokhin

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

# STRENGTHENING OF EPOXY RESINS WITH CARBON NANOMATERIALS

The paper studies the current state of the art in the field of creating composites based on epoxy matrices with carbon nanomaterials. These composites are considered major competitors to many traditional structural materials. The article studies carbon nanomaterials such as graphene, graphene oxide, carbon nanotubes, which can improve the physical and mechanical or operational characteristics of composite materials. Methods of their introduction into a polymer matrix are considered and way oriented to industrial production are selected, and comparative results of improving the strength characteristics of the obtained nanocomposite material with a filler in the form of modified carbon nanotubes has been investigated. The best sample containing 0.1 mass. % of fluorinated CNTs in the composite showed an increase in tensile strength by 48%.

Keywords: composite, polymer, epoxy resin, carbon nanotubes, strength.

Citation:

I.A. Zaytsev, A.N. Blokhin, Strengthening of epoxy resins with carbon nanomaterials, Materials Science. Power Engineering, 27 (01) (2021) 74–86, DOI: 10.18721/JEST.27106

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

Введение. Полимерные материалы являются основным компонентом для производства изделий, применяемых в решении разноплановых задач, начиная от изготовления детских игрушек и украшений, заканчивая использованием их в авиационной и космической промышленности. Из-за повсеместного использования полимеров, требования, предъявляемые к их прочностным характеристикам, становятся все более высокими. Соответствовать этим требованиям могут помочь углеродные наноматериалы (УНМ) используемые в качестве модификатора полимерных матриц. Чаще всего, при создании полимерных композиционных материалов (ПКМ) используют эпоксидную смолу, так как она является одним из распространённых связующих в промышленности, что объясняется разнообразием доступных марок и отверждающих агентов, это позволяет получить материалы с различным сочетанием свойств. С появлением промышленного производства углеродных наноматериалов [1] прослеживается тенденция использования их в качестве нанонаполнителя для ПКМ.

Целью данной статьи является исследование современного состояния сферы создания композитов на основе эпоксидных матриц с углеродными наноматериалами.

#### Углеродные наноматериалы

В научных публикациях большой интерес вызывают углеродные наполнители, согласно базе данных рецензируемой научной литературы насчитывается более 10000 статей, из них более 1000 публикаций посвящено углеродным нанонаполнителям, которые имеют высокую прочность, обладают упорядоченной структурой и уникальной геометрией. Применение разных по структуре и свойствам углеродных нанонаполнителей, процентов их внесения и способов введения, позволяет получить материалы с требуемым сочетанием свойств. В научных исследованиях большое внимание уделяют углеродным нанотрубкам (УНТ), как одностенным (ОУНТ) [2–5], так и многостенным (МУНТ) [5–9], которые используются в качестве наполнителя для улучшения прочностных и электропроводящих свойств. В источниках [10–14] рассматривается введение графена в полимерную матрицу, а в статьях [15–17] нанодобавками являются оксид графена и восстановленный графен соответственно.

#### Методы внесения нанонаполнителей в эпоксидную матрицу

Одной из самых главных проблем, с которой сталкиваются многие исследователи, является внесение дисперсного нанонаполнителя в полимерном связующем, что нашло отражение во многих научных статьях [7–9] и работах [18–35].

Наиболее распространённым методом, исходя из простоты аппаратурного исполнения, является введение УНМ в эпоксидное связующее с помощью механического воздействия (диспергаторы, мешалки) [9, 15, 16, 18–22]. Но не всегда возможно разрушить агломераты и распределить УНМ с помощью только механического метода. В публикациях [8, 10, 12, 20, 23–25] распределение нанонаполнителя в эпоксидном связующем осуществляется с помощью ультразвукового воздействия, где происходит деагломерация УНМ в эпоксидной матрице. В научных исследованиях [12, 26–31] используют сочетание нескольких методов, на первом этапе осуществляется внесение углеродного наноматериала связующее с помощью перемешивающего устройства, а затем материал диспергируют в ультразвуковой установке. В работах [10, 18, 19, 32, 33] УНМ диспергируют в растворителях с помощью ультразвука. Далее полученную смесь добавляют в эпоксидное связующее и удаляют растворитель. В работах [34, 35] используют предварительное измельчение УНМ в шаровой мельнице и ультразвуковой установке, далее вносят УНМ в эпоксидное связующее. Выбор методики введения нанонаполнителей зависит от качества и структуры наноматериала и вязкости эпоксидного мономера. Например, в работах [36–40] вводят УНМ постадийно, с помощью трехвалковой мельницы, которая работает по принципу приложения к материалу высокого значения силы сдвига между двумя валками, вращающимися в противоположных направлениях и с разными скоростями. Далее материал диспергируется в ультразвуковой установке.

Эффективное влияние УНМ на ПКМ в целом зависит от равномерного распределения нанонаполнителя в связующем, поэтому рекомендована методика введения УНМ в полимерный материал через предварительное механическое воздействие с последующим или одновременной ультразвуковой обработкой. Выбранная методика влияет на равномерность локализации нанонаполнителя в связующем, а это в свою очередь сказывается на эксплуатационных характеристиках, таких как модуль упругости и предел прочности наноПКМ.

# Результаты исследования влияния углеродных наноматериалов на физико-механические свойства полимерных нанокомпозитов

Результаты использования различных нанонаполнителей с целью увеличения прочностных характеристик эпоксидных матриц приведены в табл. 1, в процентном соотношении.

Таблица 1

# Влияние углеродных нанонаполнителей на физико-механические свойства полимерных нанокомпозитов

Table 1

# Effect of carbon nanofillers on the physical and mechanical properties of polymer nanocomposites

Наноматериалы	Увеличение прочностных характеристик	Источник
УНТ (1,5%)	+ 7% Предел прочности	[41]
УНТ (0,3%)	+ 5% Предел прочности	[42]
УНТ (0,3%)	+ 37% Предел прочности	[43]
МУНТ (0,51%)	+ 9% Предел прочности	[8]
МУНТ (0,3%)	+ 35% Предел прочности	[5]
МУНТ (0,17%)	+ 47% Предел прочности	[8]
ОУНТ (0,3%)	+ 44% Предел прочности	[5]
Двустенные УНТ (0,3%)	+ 37% Предел прочности	[5]
АБС пластик/УНТ (6%)	+ 12% Предел прочности	[6]
Графеновые нанопластинки (0,25%)	+ 20% Предел прочности	[12]
Графеновые нанопластинки (6%)	+ 1% Предел прочности	[6]
Оксид графена (1%)	— 18% Предел прочности	[15]
Оксид графена (0,75%)	— 9% Предел прочности	[15]
Оксид графена (0,5%)	+ 71% Предел прочности	[44]
Оксид графена (0,5%)	+ 3% Предел прочности	[15]
Оксид графена (0,25%)	+ 3% Предел прочности	[15]
Оксид графена (0,1%)	+ 38% Предел прочности	[44]
Углеродное нановолокно (1,5%)	+ 11% Предел прочности	[45]
Углеродное нановолокно (0,5%)	+ 18% Предел прочности	[46]
Углеродное волокно + УНТ	+ 19% Предел прочности	[47]
Стекловолокно + Углеродное нановолокно	+ 26% Предел прочности	[48]

Из представленных в таблице данных, можно сделать вывод, что использование углеродных нанонаполнителей позволяет значительно увеличить прочностные характеристики композиционного материала. Среди всего разнообразия нанодобавок, УНТ рассматриваются в качестве наполнителя с большим потенциалом для улучшения физико-механических свойств. Углеродные нанотрубки показали лучшее влияния на прочность, чем остальные представленные наполнители. Также из обзора научной литературы выявлен большой потенциал модификаций и функционализации углеродных нанонаполнителей [49–54] для раскрытия их полного потенциала в качестве армирующих наполнителей для композитов.

#### Экспериментальная часть

Основным сырьем для проведения исследований, направленных на определение влияния модифицированных углеродных нанотрубок на физико-механические характеристики эпоксидного связующего, является: эпоксидная смола BFE-170, отвердитель Л-19 и фторированные углеродные нанотрубки «Таунит-М» (производство ООО «Нанотехцентр», г. Тамбов) с наружным диаметром 8-15 нм, внутренним диаметром 4-8 нм, длиной более 2 мкм, с общим содержанием примесей не более 1 мас. %. Фторирование УНТ проводилось в стальном реакторе при давлении газообразного фтора от 0.7 до 1 атм при температурах от 100 до 250 °C. Фтор вводился в предварительно нагретый реактор. Давление фтора в реакторе контролировалось по манометру.

Методика изготовления образцов:

1. Подготовка разборных заливочных форм (чистка, нанесение разделителя, сборка);

2. Добавление наномодификатора (0,01; 0,1 и 0,5 масс. %) в 100 граммов эпоксидной смолы;

3. Первичное смешивание на механической мешалке;

4. Распределение наполнителя в связующем на трехвалковой мельнице EXACT в зазоре 5 мкм со сдвиговым течением (3 прохода);

5. Обработка суспензии на ультразвуковой установке ИЛ-10, 15 минут постадийно (5 мин. + 4 мин. + 3 мин. + 3 мин.);

6. Смешивание полученного мономера с отвердителем в пропорциях 1:50;

7. Заливка смеси из смолы с наномодификатором и отвердителя в формы;

8. Вакуумирование в вакуумно-сушильный шкафу для удаления воздушных пузырьков;

9. Полимеризация образцов при температуре t = 80 °С в течении 4 часов;

10. После полной полимеризации, происходит извлечение образцов из формы, соответствующих геометрии ГОСТ (см. рис. 1; табл. 2).

#### Размеры образца

Таблица 2

Table 2

### Sample dimensions

Общая длина l <sub>1</sub> , не менее	150 мм
Расстояние между метками, определяющими положение кромок зажимов на образце, 12	115 ± 5 мм
Длина рабочей части l <sub>3</sub>	60 ±1 мм
Расчетная длина l <sub>0</sub>	50 ±1 мм
Ширина головки b <sub>1</sub>	20 ±0,5 мм
Ширина рабочей части в <sub>2</sub>	$10\pm0,5$ мм
Толщина h	4 ± 0,4 мм (от 1 до 10)



Рис. 1. Размеры образца по ГОСТ Fig. 1. Sample dimensions according to GOST

Измерения прочностных характеристик проводятся на универсальной испытательной машине Testometric M350-5AT при скорости растяжения 50 мм/мин. Результаты представлены в табл. 3 и на рис. 2.

### Таблица 3

#### Механические свойства эпоксидных композитов

Table 3

Концентрация введенных в композит УНТ, массовый %	Прочность на растяжение, МПа	Модуль Юнга, МПа	Разрывное удлинение, %
0 (ненаполненный композит)	$18,2 \pm 1,09$	$849 \pm 51$	$4,3\pm0,22$
0,01% исходных УНТ	$20 \pm 1,1$	$1077 \pm 44$	$4,2\pm0,2$
0,1% исходных УНТ	$24 \pm 1,2$	1137 ± 46	$4,9\pm0,2$
0,5% исходных УНТ	$23 \pm 1,1$	$1245\pm50$	$4\pm0,16$
0,01% фторированных УНТ	$22 \pm 0,88$	$1352\pm54$	$4\pm0,15$
0,1% фторированных УНТ	$27 \pm 1,05$	1479 ± 56	$3,5 \pm 0,14$
0,5% фторированных УНТ	$25 \pm 1,0$	$1588 \pm 65$	$3,2 \pm 0,13$

### Mechanical properties of epoxy composites

Наблюдается улучшение прочностных характеристик композиционного материала при использовании фторированных УНТ по сравнению с исходными углеродными нанотрубками.

Лучший образец, содержащий 0,1 масс. % фторированных УНТ в составе композита, продемонстрировал увеличение предела прочности на разрыв на 48%.

Сравнительные данные, представленные на рис. 2 и табл. 3, полученные в результате исследования по увеличению прочностных характеристик превосходят литературные. Только в одной работе [53] получено такое же увеличение предела прочности на растяжение, как и в наших экспериментах, однако количество введенных в эпоксидную композицию многостенных модифицированных нанотрубок составляет 1%. В наших же экспериментах мы получили такой же эффект при концентрации фторированных УНТ 0,1%, т.е. в 10 раз меньше. Исходя из анализа рис. 2 и табл. 3, можно сделать вывод, что не только процент внесения углеродного наноматериала влияет на прочностные характеристики, но и способ внесения, а следовательно равномерность распределения и наноразмерность, и тип УНТ.



Рис. 2. Относительное увеличение предела прочности при растяжении в зависимости от концентрации УНТ для случая исходных УНТ (красные ромбы, сплошная линия) и фторированных УНТ (синие треугольники, пунктирная линия). Пустые квадраты – литературные данные по армирующим композитам [5, 6, 8, 12, 15, 41–48]
Fig. 2. Relative increase in tensile strength as a function of the CNT concentration for the case of initial CNTs (red rhombuses, solid line) and fluorinated CNTs (blue triangles, dashed line). Empty squares – literature data on reinforcing composites [5, 6, 8, 12, 15, 41–48]

#### Заключение

За счет использования нанонаполнителей ПКМ могут конкурировать по физико-механическим свойствам с другими материалами, такими как керамика, стекло или даже металл. Фторированные УНТ показали себя как эффективный модификатор эпоксидной матрицы с целью создания нанокомпозита с улучшенными прочностными характеристиками.

Стоит отметить, что проведенный литературный обзор научных публикаций не охватывает всего разнообразия нанодобавок, применяемых в качестве наполнителей ПКМ. Это связано с большим количеством проводимых в настоящее время исследований по улучшению физикомеханических свойств разной природы полимерных матриц для различных целей и большого количества наноматериалов.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований №18-29-19121\18.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] ООО "Нанотехцентр", Режим доступа: http://www.nanotc.ru/content-category1 (дата обращения: 4.10.2020).

[2] Zabihi O., Ahmadi M., Nikafshar S., Chandrakumar P.K., Naebe M. A technical review on epoxy-clay nanocomposites: structure, properties, and their applications in fiber reinforced composites, Composites part b: engineering. 135 (2018) 1–24.

[3] **Moon S.Y., Kim W.S.** High mechanical properties of super aligned carbon nanocomposite by polyurethane based crosslinking molecules, Composites science and technology. 161 (2018) 100–106. [4] Hsieh T.-H., Huang Y.-S., Shen M.-Y. Carbon nanotube size effect on the mechanical properties and toughness of nanocomposites, Polymer composites special issue: Carbon nanotube composites. 39 (2018).

[5] Aldousari S.M., Hedia H.S., Al T., Fouda N. Influence of different nanomaterials on the mechanical properties of epoxy matrix composites, Materials tesning. 60(6) (2018).

[6] **Dul S., Pegoretti A., Fambri L.** Effects of the nanofillers on physical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene nanocomposites: comparison of graphene nanoplatelets and multiwall carbon nanotubes, Nanomaterials. 8(9) (2018).

[7] **Faridirad F., Barmar M., Ahmadi S.** The effect of MWCNT on dynamic mechanical properties and crystallinity of in situ polymerized polyamide 12 nanocomposite, Polymers for advanced technologies. 29(7) (2018) 2134–2146.

[8] **Ranjbar M., Feli S.** Mechanical and low-velocity impact properties of epoxy-composite beams reinforced by MWCNTS, Journal of composite materials. 53(5) (2019) 693–705.

[9] Noor N.A.M., Razak J.A., Ismail S., Mohamad N., Yaakob M.Y., Theng T.H. Influence of MWCNTS addition on mechanical and thermal behaviour of epoxy/kenaf multi-scale nanocomposite, OP conf. series: materials science and engineering. 210 (2017).

[10] **Minoo N., Jing W., Abbas A., Hamid K., Nishar H., Lu H.L., Ying C., Bronwyn F.** Mechanical property and structure of covalent functionalised graphene/epoxy nanocomposites, Institute for frontier materials. 3216 (2014).

[11] Hadden C.M., Klimek-McDonald D.R., Pineda E.J., King J.A., Reichanadter A.M., Miskioglu I., Gowtham S., Odegard G.M. Mechanical properties of graphene nanoplatelet/carbon fiber/epoxyhybrid composites: multiscale modeling and experiments, Published in carbon. 95 (2015) 100–112.

[12] Ming-Yuan S., Tung-Yu C., Tsung-Han H., Yi-Luen L., Chin-Lung C., Hsiharng Y., Ming-Chuen Y. Mechanical properties and tensile fatigue of graphene nanoplate reinforced polymer nanocomposites, Journal of nanomaterials. 2013 (2013) 9.

[13] Mostapha T., Khalid L., Imane B., Debora D., Ali M. Effect of graphene nano-additives on the local mechanical behavior of derived polymer nanocomposites, Published in polymers. 10(6) (2018) 667.

[14] Zabihi O., Ahmadi M., Nikafshar S., Chandrakumar P.K., Naebe M. A technical review on epoxy-clay nanocomposites: structure, properties, and their applications in fiber reinforced composites, Composites part b: engineering. 135 (2018) 1–24.

[15] Huskić M., Bolka S., Vesel A., Mozetič M., Anžlovar A., Vizintine A., Žagar E. One-step surface modification of graphene oxide and influence of its particle size on the properties of graphene oxide/epoxy resin nanocomposites, European polymer journal. 101 (2018) 211–217.

[16] Lai W., Xuelong C., Kailiang H., Zhijuan Y., Lun W., Hongqing W., Zhen Q., Xue W., Zewen L., Zhe W. Enhancement in mechanical properties of epoxy nanocomposites by styrene-ethylene-butadienestyrene grafted graphene oxide, Journal composite interfaces. 26(2) (2018) 141–156.

[17] **Aradhana R., Mohanty S., Sanjay K.N.** Comparison of mechanical, electrical and thermal properties in graphene oxide and reduced graphene oxide filled epoxy nanocomposite adhesives, Polymer. 141 (2018) 109–123.

[18] **de Menezes B.R.C., Ferreira F.V., Silva B.C., Simonetti E.A.N., Bastos T.M., Cividanes L.S., Thim G.P.** Effects of octadecylamine functionalization of carbon nanotubes on dispersion, polarity, and mechanical properties of CNT/HDPE nanocomposites, Journal of materials. 53(20) (2018) 14311–14327.

[19] **Domun N., Paton K.R., Hadavinia H., Sainsbury T., Zhang T., Mohamud H.** Enhancement of fracture toughness of epoxynanocomposites by combining nanotubes and nanosheets as fillers, Materials (Basel). 10(10) (2017).

[20] **Dimitrios G.P., Kinloch I.A., Young R.J.** Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites, Progress in materials science. 90 (2017) 75–127.

[21] **Kim J.A., Seong D.G., Kang T.J., Youn J.R.** Effects of surface modification on rheological and mechanical properties of CNT/epoxy composites, Carbon. 44(10) (2006) 1898–1905. [22] de Villoria R.G., Miravete A., Cuartero J., Chiminelli A., Tolosana N. Mechanical properties of SWNT/ epoxy composites using two different curing cycles, Composites part b: engng. 37(4–5) (2006) 273–277.

[23] Buketov A.V., Dolgov N.A., Babich N.V. Mechanical characteristics of epoxy nanocomposite coatings with ultradisperse diamond particles, Strength of material. 49 (2017) 464–471.

[24] Shekar K.C., Prasad B.A., Prasad N.E. Effect of amino multi walled carbon nanotubes reinforcement on the flexural properties of neat epoxy, Applied mechanics and materials. 592–594 (2014) 912–916.

[25] **Rostamiyan Y., Fereidoon A., Mashhadzadeh A.H.** Experimental study on the mechanical properties of an epoxy-based nanocomposite using polymeric alloying and different nanoreinforcements: nanofiber, nanolayered and nanoparticulate materials, Science and engineering of composite materials. 22 (2015) 591–598.

[26] **Muhammad A., Muhammad A., Abraiz K.** Fabrication, mechanical, thermal, and electrical characterization of epoxy/silica composites for high-voltage insulation, Science and engineering of composite materials. 25(4) (2017).

[27] **Afrouzian A., Movahhedi A.H., Liaghat G.H.** Effect of nano-particles on the tensile, flexural and perforation properties of the glass/epoxy composites, Journal of reinforced plastics and composites. 36(12) 2017.

[28] **Sung H.S.** The effect of clay/multiwall carbon nanotube hybrid fillers on the properties of elastomer nanocomposites international, Journal of polymer science. 2018 (2018) 8.

[29] **Rana S.** Effect of carbon nanofiber functionalization on the inplane mechanical properties of carbon/ epoxy multiscale composites, Journal of applied polymer science. 125(3) (2012) 1951–1958.

[30] Rana S., Alagirusamy R., Joshi M. Effect of carbon nanofiber dispersion on the tensile properties of epoxy nanocomposites, Journal of composite materials. 45 (2011) 2247–2256.

[31] **Zhou Y.** Improvement in mechanical properties of carbon fabric-epoxy composite using carbon nanofibers, Journal mater processing technol. 198(1–2) (2008) 445–453.

[32] Rana S., Alagirusamy R., Joshi M. Mechanical behavior of carbon nanofibrereinforced epoxy composites, Journal of applied polymer science. 118(4) (2010) 2276–2283.

[33] Ahn S.-N., Lee H.-J., Kim B.-J. Epoxy/amine-functionalized short-length vapor-grown carbon nano-fiber composites, Journal of polymer sci part a. 46(22) (2008) 7473–7482.

[34] Wangab Q., Wenb G., Chenab J., Dang S.S. Reinforcing epoxy resin with nitrogen doped carbon nanotube: apotential lightweight structure material, Journal of materials science and technology. 34(11) (2018) 2205–2211.

[35] Jaemin C., Gwang H.J., Jong K.P., Jung C.K., Ho J.R., Soon H.H. Improvement of modulus, strength and fracture toughness of CNT/epoxy nanocomposites through the functionalization of carbon nanotubes, Composites part b: engineering. 129 (2017) 169–179.

[36] Singer G., Sinn G., Rennhofer H., Schuller R., Grünewald T.A., Unterlass M.M., Windberger U., Lichtenegger H.C. High performance functional composites by in-situ orientation of carbon nanofillers, Composite structures. 215 (2019) 178–184.

[37] Singer G., Rennhofer H., Sinn G., Unterlass M.M., Wendrinsky J., Windberger U., Lichtenegger H.C. Processing of carbon nanotubes and carbon nanofibers towards high performance carbon fiber reinforced polymers, Germany, Bremen: 21<sup>st</sup> symp. on composites. 742 (2017) 31–37.

[38] Li Y., Zhang H., Bilotti E., Peijs T. Optimization of three-roll mill parameters for in-situ exfoliation of graphene (conference paper), MRS advances. 1(19) (2016) 1389–1394.

[39] **Ahmadi-Moghadam B., Taheri F.** Effect of processing parameters on the structure and multi-functional performance of epoxy/GNP-nanocomposites, Journal of materials science. 49(18) (2014) 6180–6190.

[40] Hosur M., Barua R., Zainuddin S., Kumar A., Trovillion J., Jeelani S. Effect of processing techniques on the performance of epoxy/MWCNT nanocomposites, Journal of applied polymer science. 127(6) (2013) 4211–4224.

[41] **Chen W., Shen H., Auad M.L., Huang C., Nutt S.** Basalt fiber-epoxy laminates with functionalized multi-walled carbon nanotubes, Composites part a: applied science and manufacturing. 40(8) (2009) 1082–1089.

[42] Gojny F.H., Wichmann M.H.G., Fiedler B., Bauhofer W., Schulte K. Influence of nano-modification on the mechanical and electrical properties of conventional fibre-reinforced composites, Composites part a: applied science and manufacturing. 36(11) (2005) 1525–153.

[43] **Rahmanian S., Suraya A.R., Shazed M.A., Zahari R., Zainudin E.S.** Mechanical characterization of epoxy composite with multiscale reinforcements: carbon nanotubes and short carbon fibers, Materials & design. 60 (2014) 34–40.

[44] **Aradhana R., Mohanty S., Kumar S.N.** Comparison of mechanical, electrical and thermal properties in graphene oxide and reduced graphene oxide filled epoxy nanocomposite adhesives, Journal in polymer. 141 (2018) 109–123.

[45] Bhattacharyya A., Rana S., Parveen S., Fangueiro R., Alagirusamy R., Joshi M. Mechanical and thermal transmission properties of carbon nanofiber-dispersed carbon/phenolic multiscale composites, Journal of applied polymer science. 129(5) (2013) 2383–2392.

[46] **Rana S., Alagirusamy R., Joshi M.** Development of carbon nanofibre incorporated three phase carbon/ epoxy composites with enhanced mechanical, electrical and thermal properties, Composites part a: applied science and manufacturing. 42(5) (2011) 439–445.

[47] **Bekyarova E.** Multiscale carbon nanotube-carbon fiber reinforcement for advanced epoxy composites, Langmuir. 23(7) (2007) 3970–3974.

[48] Ali S., Boming Z., Changchun W. Mechanical characterization of glass/epoxy polymer composites sprayed with vapor grown carbon nano fibers, Pakistan: 11<sup>th</sup> international bhurban conference on applied sciences & technology (IBCAST) Islamabad. (2014) 52–56.

[49] **Groult H., Crassous F., Lantelme D., Devilliers A., Tressaud C., Labrugere M., Dubois J.** Study of the fluorination of carbon anode in molten KF-2HF by XPS and NMR investigations, Fluorine chemistry. 130 (2009) 1080–1086.

[50] **Zhang X., He Q., Gu H., Colorado H.A., Wei S., Guo Z.** Flame-etardant electrical conductive nanopolymers based on bisphenol F epoxy resin reinforced with nano polyanilines, ACS appl mater interfaces. 5 (2013) 898–910.

[51] Wanga Z., Colorado H.A., Guo Z.-H., Kim H., Park C.-L., Hahna H.T., Lee S.-G., Lee K.-H., Shang Y.-Q. Effective functionalization of carbon nanotubes for bisphenol F epoxy matrix composites, Materials research. 15 (2012) 510–516.

[52] Wang D.H., Sihn S., Roy A.K., Baek J.-B., Tan L.-S. Nanocomposites based on vapor-grown carbon nanofibers and an epoxy: functionalization, preparation and characterization, Europen polymer. 46 (2010) 1404–1416.

[53] **Zhou Y., Pervin F., Lewis L., Jeelani S.** Experimental study on the thermal and mechanical properties of multiwalled carbon annotube-reinforced epoxy, Materials science engineering. 452 (2007) 657–664.

[54] **Theodore M., Hosur M., Thomas J., Jeelani S.** Characterization of epon 862 reinforced with functionalized MCNT's, Center for advanced materials. 11 (2007) 64–74.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЗАЙЦЕВ Игорь Анатольевич** — аспирант, Тамбовский государственный технический университет, без степени. E-mail: i.zayczew@rambler.ru

**БЛОХИН Александр Николаевич** — доцент, Тамбовский государственный технический университет, канд. техн. наук. E-mail: cha-cha@rambler.ru

#### Дата поступления статьи в редакцию: 29.10.2020

## REFERENCES

[1] LLC "Nanotechcenter", Access mode: http://www.nanotc.ru/content-category1 (data obrashcheniya: 4.10.2020).

[2] O. Zabihi, M. Ahmadi, S. Nikafshar, P.K. Chandrakumar, M. Naebe, A technical review on epoxy-clay nanocomposites: structure, properties, and their applications in fiber reinforced composites, Composites part b: engineering. 135 (2018) 1–24.

[3] S.Y. Moon, W.S. Kim, High mechanical properties of super aligned carbon nanocomposite by polyurethane based crosslinking molecules, Composites science and technology. 161 (2018) 100–106.

[4] **T.-H. Hsieh, Y.-S. Huang, M.-Y. Shen,** Carbon nanotube size effect on the mechanical properties and toughness of nanocomposites, Polymer composites special issue: Carbon nanotube composites. 39 (2018).

[5] S.M. Aldousari, H.S. Hedia, T. Al, N. Fouda, Influence of different nanomaterials on the mechanical properties of epoxy matrix composites, Materials tesning. 60(6) (2018).

[6] **S. Dul, A. Pegoretti, L. Fambri,** Effects of the nanofillers on physical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene nanocomposites: comparison of graphene nanoplatelets and multiwall carbon nanotubes, Nanomaterials. 8(9) (2018).

[7] **F. Faridirad, M. Barmar, S. Ahmadi,** The effect of MWCNT on dynamic mechanical properties and crystallinity of in situ polymerized polyamide 12 nanocomposite, Polymers for advanced technologies. 29(7) (2018) 2134–2146.

[8] **M. Ranjbar, S. Feli,** Mechanical and low-velocity impact properties of epoxy-composite beams reinforced by MWCNTS, Journal of composite materials. 53(5) (2019) 693–705.

[9] N.A.M. Noor, J.A. Razak, S. Ismail, N. Mohamad, M.Y. Yaakob, T.H. Theng, Influence of MWCNTS addition on mechanical and thermal behaviour of epoxy/kenaf multi-scale nanocomposite, OP conf. series: materials science and engineering. 210 (2017).

[10] N. Minoo, W. Jing, A. Abbas, K. Hamid, H. Nishar, H.L. Lu, C. Ying, F. Bronwyn, Mechanical property and structure of covalent functionalised graphene/epoxy nanocomposites, Institute for frontier materials. 3216 (2014).

[11] C.M. Hadden, D.R. Klimek-McDonald, E.J. Pineda, J.A. King, A.M. Reichanadter, I. Miskioglu, S. Gowtham, G.M. Odegard, Mechanical properties of graphene nanoplatelet/carbon fiber/epoxyhybrid composites: multiscale modeling and experiments, Published in carbon. 95 (2015) 100–112.

[12] S. Ming-Yuan, C. Tung-Yu, H. Tsung-Han, L. Yi-Luen, C. Chin-Lung, Y. Hsiharng, Y. Ming-Chuen, Mechanical properties and tensile fatigue of graphene nanoplate reinforced polymer nanocomposites, Journal of nanomaterials. 2013 (2013) 9.

[13] **T. Mostapha, L. Khalid, B. Imane, D. Debora, M. Ali,** Effect of graphene nano-additives on the local mechanical behavior of derived polymer nanocomposites, Published in polymers. 10(6) (2018) 667.

[14] O. Zabihi, M. Ahmadi, S. Nikafshar, P.K. Chandrakumar, M. Naebe, A technical review on epoxy-clay nanocomposites: structure, properties, and their applications in fiber reinforced composites, Composites part b: engineering. 135 (2018) 1–24.

[15] M. Huskić, S. Bolka, A. Vesel, M. Mozetič, A. Anžlovar, A. Vizintine, E. Žagar, One-step surface modification of graphene oxide and influence of its particle size on the properties of graphene oxide/epoxy resin nanocomposites, European polymer journal. 101 (2018) 211–217.

 [16] W. Lai, C. Xuelong, H. Kailiang, Y. Zhijuan, W. Lun, W. Hongqing, Q. Zhen, W. Xue, L. Zewen,
W. Zhe, Enhancement in mechanical properties of epoxy nanocomposites by styrene-ethylene-butadienestyrene grafted graphene oxide, Journal composite interfaces. 26(2) (2018) 141–156.

[17] **R. Aradhana, S. Mohanty, K.N. Sanjay,** Comparison of mechanical, electrical and thermal properties in graphene oxide and reduced graphene oxide filled epoxy nanocomposite adhesives, Polymer. 141 (2018) 109–123.

[18] B.R.C. de Menezes, F.V. Ferreira, B.C. Silva, E.A.N. Simonetti, T.M. Bastos, L.S. Cividanes, G.P. Thim, Effects of octadecylamine functionalization of carbon nanotubes on dispersion, polarity, and mechanical properties of CNT/HDPE nanocomposites, Journal of materials. 53(20) (2018) 14311–14327.

[19] N. Domun, K.R. Paton, H. Hadavinia, T. Sainsbury, T. Zhang, H. Mohamud, Enhancement of fracture toughness of epoxynanocomposites by combining nanotubes and nanosheets as fillers, Materials (Basel). 10(10) (2017).

[20] G.P. Dimitrios, I.A. Kinloch, R.J. Young, Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites, Progress in materials science. 90 (2017) 75–127.

[21] J.A. Kim, D.G. Seong, T.J. Kang, J.R. Youn, Effects of surface modification on rheological and mechanical properties of CNT/epoxy composites, Carbon. 44(10) (2006) 1898–1905.

[22] **R.G. de Villoria, A. Miravete, J. Cuartero, A. Chiminelli, N. Tolosana,** Mechanical properties of SWNT/epoxy composites using two different curing cycles, Composites part b: engng. 37(4–5) (2006) 273–277.

[23] **A.V. Buketov, N.A. Dolgov, N.V. Babich,** Mechanical characteristics of epoxy nanocomposite coatings with ultradisperse diamond particles, Strength of material. 49 (2017) 464–471.

[24] K.C. Shekar, B.A. Prasad, N.E. Prasad, Effect of amino multi walled carbon nanotubes reinforcement on the flexural properties of neat epoxy, Applied mechanics and materials. 592–594 (2014) 912–916.

[25] **Y. Rostamiyan, A. Fereidoon, A.H. Mashhadzadeh,** Experimental study on the mechanical properties of an epoxy-based nanocomposite using polymeric alloying and different nanoreinforcements: nanofiber, nanolayered and nanoparticulate materials, Science and engineering of composite materials. 22 (2015) 591–598.

[26] **A. Muhammad, A. Muhammad, K. Abraiz,** Fabrication, mechanical, thermal, and electrical characterization of epoxy/silica composites for high-voltage insulation, Science and engineering of composite materials. 25(4) (2017).

[27] A. Afrouzian, A.H. Movahhedi, G.H. Liaghat, Effect of nano-particles on the tensile, flexural and perforation properties of the glass/epoxy composites, Journal of reinforced plastics and composites. 36(12) 2017.

[28] **H.S. Sung,** The effect of clay/multiwall carbon nanotube hybrid fillers on the properties of elastomer nanocomposites international, Journal of polymer science. 2018 (2018) 8.

[29] **S. Rana**, Effect of carbon nanofiber functionalization on the inplane mechanical properties of carbon/ epoxy multiscale composites, Journal of applied polymer science. 125(3) (2012) 1951–1958.

[30] S. Rana, R. Alagirusamy, M. Joshi, Effect of carbon nanofiber dispersion on the tensile properties of epoxy nanocomposites, Journal of composite materials. 45 (2011) 2247–2256.

[31] **Y. Zhou**, Improvement in mechanical properties of carbon fabric-epoxy composite using carbon nanofibers, Journal mater processing technol. 198(1–2) (2008) 445–453.

[32] S. Rana, R. Alagirusamy, M. Joshi, Mechanical behavior of carbon nanofibrereinforced epoxy composites, Journal of applied polymer science. 118(4) (2010) 2276–2283.

[33] S.-N. Ahn, H.-J. Lee, B.-J. Kim, Epoxy/amine-functionalized short-length vapor-grown carbon nanofiber composites, Journal of polymer sci part a. 46(22) (2008) 7473–7482.

[34] Q. Wangab, G. Wenb, J. Chenab, S.S. Dang, Reinforcing epoxy resin with nitrogen doped carbon nanotube: apotential lightweight structure material, Journal of materials science and technology. 34(11) (2018) 2205–2211.

[35] **C. Jaemin, H.J. Gwang, K.P. Jong, C.K. Jung, J.R. Ho, H.H. Soon,** Improvement of modulus, strength and fracture toughness of CNT/epoxy nanocomposites through the functionalization of carbon nanotubes, Composites part b: engineering. 129 (2017) 169–179.

[36] G. Singer, G. Sinn, H. Rennhofer, R. Schuller, T.A. Grünewald, M.M. Unterlass, U. Windberger, H.C. Lichtenegger, High performance functional composites by in-situ orientation of carbon nanofillers, Composite structures. 215 (2019) 178–184.

[37] G. Singer, H. Rennhofer, G. Sinn, M.M. Unterlass, J. Wendrinsky, U. Windberger, H.C. Lichtenegger, Processing of carbon nanotubes and carbon nanofibers towards high performance carbon fiber reinforced polymers, Germany, Bremen: 21<sup>st</sup> symp. on composites. 742 (2017) 31–37.

[38] Y. Li, H. Zhang, E. Bilotti, T. Peijs, Optimization of three-roll mill parameters for in-situ exfoliation of graphene (conference paper), MRS advances. 1(19) (2016) 1389–1394.

[39] **B. Ahmadi-Moghadam, F. Taheri,** Effect of processing parameters on the structure and multi-functional performance of epoxy/GNP-nanocomposites, Journal of materials science. 49(18) (2014) 6180–6190.

[40] **M. Hosur, R. Barua, S. Zainuddin, A. Kumar, J. Trovillion, S. Jeelani,** Effect of processing techniques on the performance of epoxy/MWCNT nanocomposites, Journal of applied polymer science. 127(6) (2013) 4211–4224.

[41] W. Chen, H. Shen, M.L. Auad, C. Huang, S. Nutt, Basalt fiber-epoxy laminates with functionalized multi-walled carbon nanotubes, Composites part a: applied science and manufacturing. 40(8) (2009) 1082–1089.

[42] F.H. Gojny, M.H.G. Wichmann, B. Fiedler, W. Bauhofer, K. Schulte, Influence of nano-modification on the mechanical and electrical properties of conventional fibre-reinforced composites, Composites part a: applied science and manufacturing. 36(11) (2005) 1525–153.

[43] **S. Rahmanian, A.R. Suraya, M.A. Shazed, R. Zahari, E.S. Zainudin,** Mechanical characterization of epoxy composite with multiscale reinforcements: carbon nanotubes and short carbon fibers, Materials & design. 60 (2014) 34–40.

[44] **R. Aradhana, S. Mohanty, S.N. Kumar,** Comparison of mechanical, electrical and thermal properties in graphene oxide and reduced graphene oxide filled epoxy nanocomposite adhesives, Journal in polymer. 141 (2018) 109–123.

[45] A. Bhattacharyya, S. Rana, S. Parveen, R. Fangueiro, R. Alagirusamy, M. Joshi, Mechanical and thermal transmission properties of carbon nanofiber-dispersed carbon/phenolic multiscale composites, Journal of applied polymer science. 129(5) (2013) 2383–2392.

[46] **S. Rana, R. Alagirusamy, M. Joshi,** Development of carbon nanofibre incorporated three phase carbon/ epoxy composites with enhanced mechanical, electrical and thermal properties, Composites part a: applied science and manufacturing. 42(5) (2011) 439–445.

[47] **E. Bekyarova**, Multiscale carbon nanotube-carbon fiber reinforcement for advanced epoxy composites, Langmuir. 23(7) (2007) 3970–3974.

[48] **S. Ali, Z. Boming, W. Changchun,** Mechanical characterization of glass/epoxy polymer composites sprayed with vapor grown carbon nano fibers, Pakistan: 11<sup>th</sup> international bhurban conference on applied sciences & technology (IBCAST) Islamabad. (2014) 52–56.

[49] H. Groult, F. Crassous, D. Lantelme, A. Devilliers, C. Tressaud, M. Labrugere, J. Dubois, Study of the fluorination of carbon anode in molten KF-2HF by XPS and NMR investigations, Fluorine chemistry. 130 (2009) 1080–1086.

[50] **X. Zhang, Q. He, H. Gu, H.A. Colorado, S. Wei, Z. Guo,** Flame-etardant electrical conductive nanopolymers based on bisphenol F epoxy resin reinforced with nano polyanilines, ACS appl mater interfaces. 5 (2013) 898–910.

[51] Z. Wanga, H.A. Colorado, Z.-H. Guo, H. Kim, C.-L. Park, H.T. Hahna, S.-G. Lee, K.-H. Lee, Y.-Q. Shang, Effective functionalization of carbon nanotubes for bisphenol F epoxy matrix composites, Materials research. 15 (2012) 510–516.

[52] **D.H. Wang, S. Sihn, A.K. Roy, J.-B. Baek, L.-S. Tan,** Nanocomposites based on vapor-grown carbon nanofibers and an epoxy: functionalization, preparation and characterization, Europen polymer. 46 (2010) 1404–1416.

[53] **Y. Zhou, F. Pervin, L. Lewis, S. Jeelani,** Experimental study on the thermal and mechanical properties of multiwalled carbon annotube-reinforced epoxy, Materials science engineering. 452 (2007) 657–664.

[54] **M. Theodore, M. Hosur, J. Thomas, S. Jeelani,** Characterization of epon 862 reinforced with functionalized MCNT's, Center for advanced materials. 11 (2007) 64–74.

# THE AUTHORS

**ZAYTSEV Igor' A.** – *Tambov State Technical University.* E-mail: i.zayczew@rambler.ru

**BLOKHIN Aleksandr N.** – *Tambov State Technical University.* E-mail: cha-cha@rambler.ru

Received: 29.10.2020

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021

# Хроника

# ПАМЯТИ ПРОФЕССОРА МИХАИЛА РОМАНОВИЧА ПЕТРИЧЕНКО



31 января 2021 г. скончался выдающийся ученый, доктор технических наук, профессор Инженерностроительного института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого Михаил Романович Петриченко.

В 1974 г. Михаил Романович окончил Энергомашиностроительный факультет Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина. Работал в Центральном научно-исследовательском дизельном институте (ЦНИДИ, 1974—1994 гг.), где последовательно прошел все этапы становления исследователя-практика и ученого: от лаборанта и младшего научного сотрудника до заведующего лабораторией и заместителя начальника отдела.

С 1977 г. М.Р. Петриченко – кандидат технических наук, с 1991 г. – доктор технических наук.

Являясь признанным специалистом в области теплогидравлических расчетов двигателей и агрегатов различного назначения, Михаил Романович реализовывал обширные программы исследований быстропротекающих тепловых потоков в твердых телах, руководил работами по экспериментальной доводке нагревательных камер для двигателей с внешним подводом теплоты (1979–1984), участвовал в выполнении Постановлений правительства по совершенствованию новой техники (1982–1987 гг.). Петриченко М.Р. являлся членом научно-технического и диссертационного советов ЦНИДИ.

В 1995 г. Михаил Романович перешел на работу в Политехнический университет (СПбГТУ, СПбПУ), где работал до последних дней: сначала в должности профессора кафедры гидравлики

ИСИ, а с 2012 г. — в должности заведующего этой кафедрой. Продолжая заниматься научными исследованиями, Михаил Романович непрерывно расширял их тематику, решал новые для себя задачи из области гидротехники, строительства и машиностроения. Быстро выделяя главное и в совершенстве владея сложнейшим математическим аппаратом, М.Р. Петриченко находил оригинальные пути решения многих технических вопросов.

Профессор Петриченко М.Р. был неизменным участником многих научно-практических конференций и семинаров, проводимых в России и за ее пределами. Имел широкий круг общения в научном сообществе, многие ведущие специалисты хорошо знали и ценили его.

М.Р. Петриченко — автор более 200 научных трудов, в том числе 3 монографий, 21 изобретения и патента, 6 учебных пособий, 2 разделов в энциклопедических справочниках.

Член нескольких диссертационных советов, секретарь Ученого совета ИСИ, редактор нескольких периодических изданий, рецензируемых в международной системе SCOPUS и BAK.

Все годы работы в ВУЗе Михаил Романович активно занимался педагогической деятельностью. Имея широчайший научный кругозор и мощнейший потенциал ученого, М.Р. Петриченко охотно делился своими знаниями со студентами и коллегами-преподавателями. Тактичность и доброжелательность в общении с людьми сочетались в Михаиле Романовиче с удивительной твердостью в отстаивании полученных научных результатов и в защите достижений учеников. Профессор М.Р. Петриченко неустанно «растил и продвигал» специалистов высшей квалификации, подготовил более 10 аспирантов, руководил образовательной программой магистров.

Плодотворная и добросовестная работа Михаила Романовича неоднократно отмечалась благодарностями и грамотами различного достоинства, он удостоен звания "Почетный работник сферы образования Российской Федерации" (2017 г.).

Михаила Романовича отличали высочайшая эрудиция и феноменальная энциклопедическая память. Он хорошо знал историю, литературу, музыку, искусство; глубоко видел и умел ценить прекрасное.

В памяти друзей и коллег Михаил Романович навсегда останется крупным ученым, ярким преподавателем, светлым и обаятельным человеком.

Коллектив Инженерно-строительного института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого Научное издание

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА

## Том 27, № 1, 2021

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 ЭЛ № ФС 77-78004 от 27.03.2020 г.)

Ответственный секретарь — О.А. Матенев

Компьютерная верстка А.А. Кононовой

Телефон редакции (812) 294-22-86

E-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

Подписано в печать 31.03.2021.

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

#### УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ "МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА" (ранее «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки») 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Материаловедение. Энергетика» 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 27.03.2020 г. ЭЛ № ФС 77-78004);

имеет международный стандартный номер сериального периодического издания (ISSN 2687-1300);

внесен Высшей аттестационной комиссией Минобразования 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 2005 г. входит в национальную информационно-аналитическую систему «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)»;

сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН и включены в фонд научно-технической литературы (НТЛ) ВИНИТИ РАН, в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка», 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, ROAD.

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 повторений, 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 аббревиатуру 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 Редколлегия 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.