

Учредитель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Редакционная коллегия

Коновалов С.В.
(главный редактор)

Запольская Е.М.
(отв. секретарь)

Агеев Е.В.
Бецофен С.Я.
Бурков В.Н.
Буркова И.В.
Гречников Ф.В.
Громов В.Е.
Данилов В.И.
Деев В.Б.
Jayalakshmi Subramanian
Жеребцов С.В.
Захарова А.А.
Затеякин О.А.
Зеркаль С.М.
Зимин А.В.
Коган А.Б.
Колубаев Е.А.
Копеин В.В.
Нехорошева Л.Н.
Осколкова Т.Н.
Пантелеев В.И.
Петрова Т.В.
Ramachandra Arvind Singh
Рыбенко И.А.
Симченко Н.А.
Siddiquee Arshad Noor
Смагин В.И.
Стрижак П.А.
Султангузин И.А.
Темлянцев М.В.
Хамзаева А.М.
Chen Xizhang
Чехонадских А.В.
Шиплюк А.Н.
Юлдашев Н.Х.
Юрьев А.Б.

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Худойбердизод С.У., Ганиев И.Н., Эшов Б.Б., Муллоева Н.М., Отаджонов С.Э. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций сплавов системы Pb – Cu.....3
- Гостевская А.Н., Маркидонов А.В. Выявление структурных изменений в ОЦК кристалле при лазерном воздействии методом молекулярной динамики11

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Буинцев В.Н., Рыбенко И.А., Мартусевич Е.А., Белавенцева Д.Ю. Автоматическая обучающая экспертная система.....19
- Байдалин А.Д. Исследование аномальных показателей процесса коксования углей на основе машинного обучения.....27
- Короблина Т.В., Бабичева Н.Б., Гусев М.М. Использование графовой модели для описания распространения информации в социальной сети.....33

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Крюков Р.Е., Громов В.Е., Михно А.Р., Жуков А.В. Структурно-фазовое состояние и поверхность разрушения металла сварных швов, выполненных с применением новых материалов на основе техногенного сырья.....40
- Осколкова Т.Н. Разработка способов поверхностного упрочнения твердого сплава ВК10КС.....47
- Уманский А.А., Симачев А.С., Думова Л.В., Сафонов С.О. Исследования влияния технологических параметров производства мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали на их ударную стойкость.....54
- Панфилов А.О., Зыкова А.П., Чумаевский А.В., Воронцов А.В., Никонов С.Ю., Колубаев Е.А. Влияние протяженности градиентной зоны функционально-градиентного изделия системы Cu/Al на структурно-фазовое состояние и механические свойства.....61
- Аугсткалн А.И., Гурьев М.А., Иванов С.Г. Влияние термической обработки на ликвацию углерода в отливках полученных литьем по газифицируемым моделям.....74

Озеров М.С., Соколовский В.С., Поголяева Е.А., Ноздрачева Е.И., Жеребцов С.В. Горячая прокатка композита Ti/TiB, полученного искровым плазменным спеканием.....	80
Агеева Е.В., Переверзев А.С., Павлов А.Д. Влияние среды диспергирования на свойства шихты свинцово-оловянной бронзы.....	86
Полевой Е.В., Мартынов М.А., Коновалов С.В., Чумачков И.И. Исследование распределения остаточных напряжений в зоне сварного шва рельсов типа Р65 категории ДТ350.....	92
Хардинов С.В., Грашков С.А., Агеева Е.В. Анализ характеристик спеченных изделий из хромсодержащих электроэрозионных порошков.....	100
Варнавский Е. В. Анализ механических характеристик буровых штанг из стали 30ХГСА, изготовленных по улучшенной технологии.....	106

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

Ефремкова Т.И., Блохина Е.С., Петрова Т.В., Хренова А.В. Разработка модели стимулирования управляемой подсистемы благотворительного фонда.....	112
Нагайцев И.А. Элементы реализации климатической повестки.....	124
Пьянкова Л.А., Затепякин О.А. Качество рабочей силы в современных социально-экономических условиях.....	132
ГРОМОВУ ВИКТОРУ ЕВГЕНЬЕВИЧУ – 75 ЛЕТ.....	142
К сведению авторов	144

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации:
ПИ № ФС77-77872 от 03.03.2021 г.

Адрес редакции:

654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет
 каб. 433 М
 тел. 8-3843-74-86-28
<http://www.sibsiiu.ru>
 e-mail: vestnicsibgiu@sibsiiu.ru

Адрес издателя:

654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет
 каб. 336 Г
 тел. 8-3843-46-35-02
 e-mail: rector@sibsiiu.ru

Адрес типографии:

654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет
 каб. 280 Г
 тел. 8-3843-46-44-02

Подписные индексы:

Объединенный каталог «Пресса России» – 41270

Подписано в печать

29.12.2022 г.

Выход в свет

29.12.2022 г.

Формат бумаги 60×88 1/8.

Бумага писчая.

Печать офсетная.

Усл.печ.л. 7,8.

Уч.-изд.л. 8,4.

Тираж 300 экз.

Заказ № 338.

Цена свободна

Оригинальная статья

УДК 621.039.534.54:621.364:634.3

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-3-10

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЕМКОСТИ И ИЗМЕНЕНИЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Pb – Te

© 2022 г. С. У. Худойбердизода¹, И. Н. Ганиев², Б. Б. Эшов¹, Н. М. Муллоева¹, С. Э. Отаджонов³

¹Центр по исследованию инновационных технологий НАН Таджикистана (734063, Республика Таджикистан, Душанбе, ул. Айни, 299/3)

²Институт химии им. В.И. Никитина НАН Таджикистана (734063, Республика Таджикистан, Душанбе, ул. Айни, 299/2)

³Худжандский государственный университет имени академика Б. Гафурова (735700, Республика Таджикистан, Худжанд, проезд Мавлонбеков, 1)

Аннотация. Свинец в сравнении с другими металлами обладает малой химической активностью и высокой коррозионной стойкостью. Комплексное легирование свинца сурьмой, теллуром и медью в оптимальных концентрациях позволило получить высокоэффективные сплавы для защитных кабельных оболочек. Свинцовый сплав Pb – Sb – Cu – Te обеспечивает кабельной оболочке высокое сопротивление усталости, ползучести и активной деформации в широкой области температур, а также хорошую технологичность при ее изготовлении. Основой для такого комплекса положительных характеристик является специфическая мелкозернистая термостабильная структура, обуславливающая стабильность свойств в эксплуатации. Сплавы такой композиции находятся на уровне мировых стандартов: они обладают лучшим комплексом эксплуатационных и технологических характеристик по сравнению с наиболее перспективными отечественными и иностранными аналогами. В работе теплоемкость сплавов системы Pb – Te определялась в режиме «охлаждения» по известной теплоемкости эталонного образца из меди марки М00. Получены полиномы, описывающие температурную зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций сплавов. Установлено, что с ростом температуры и содержания теллура теплоемкость, энтальпия и энтропия свинца незначительно увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшаются.

Ключевые слова: сплавы системы Pb – Te, теплоемкость, режим «охлаждения», энтальпия, энтропия, энергия Гиббса

Для цитирования: Худойбердизода С.У., Ганиев И.Н., Эшов Б.Б., Муллоева Н.М., Отаджонов С.Э. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций сплавов системы Pb – Te // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 3–10. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-3-10](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-3-10)

Original article

TEMPERATURE DEPENDENCE OF HEAT CAPACITY AND CHANGES IN THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF ALLOYS OF THE Pb – Te SYSTEM

© 2022 S. U. Khudoiberdizoda¹, I. N. Ganiev², B. B. Eshov¹, N. M. Mulloeva¹,
S. E. Otadzhonov³

¹State Scientific Institution “Center of Innovation Development of Science and New Technologies” of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan (299/3, Aini str., Dushanbe, 734063, Republic of Tajikistan)

²V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan (299/2, Aini str., Dushanbe, 734063, Republic of Tajikistan)

³Khujand State University named after Academician B. Gafurov (1, Mavlonbekov Passage, Khujand, 735700, Republic of Tajikistan)

Annotation. Lead, in comparison with other metals, has low chemical activity and high corrosion resistance. Complex alloying of lead with antimony, tellurium and copper in optimal concentrations made it possible to obtain highly effective alloys for protective cable sheaths. Pb – Sb – Cu – Te lead alloy provides the cable sheath with high resistance to fatigue, creep and active deformation in a wide temperature range, as well as good manufacturability. The basis for such a complex of positive characteristics is a specific fine-grained thermostable structure, which determines the stability of properties in operation. Alloys of this composition are at the level of world standards: they have the best complex of operational and technological characteristics compared to the most promising domestic and foreign analogues. In the work, the heat capacity of the alloys of the Rb – Te system was determined in the "cooling" mode by the known heat capacity of a reference sample made of copper grade M00. Polynomials describing the temperature dependence of the heat capacity and changes in the thermodynamic functions of alloys are obtained. It is found that with increasing temperature and tellurium content, the heat capacity, enthalpy and entropy of lead increase slightly, and the Gibbs energy values decrease.

Keywords: alloys of the Rb–Te system, heat capacity, "cooling" mode, enthalpy, entropy, Gibbs energy

For citation: Khudoiberdizoda S.U., Ganiev I.N., Eshov B.B., Mulloeva N.M., Otajonov S.E. Temperature dependence of heat capacity and changes in thermodynamic functions of Rb – Te alloys. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4 (42), pp. 3–10. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-3-10](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-3-10)

Введение

В современной промышленности широко применяются различные сплавы на основе свинца с добавками различных элементов. Эти сплавы отличаются легкоплавкостью и относительно низкой ценой. Легированные свинцовые сплавы обладают высокими антифрикционными свойствами, что позволяет использовать их в производстве деталей, работающих в условиях трения и скольжения [1].

Для изготовления свинцовых листов обычно используют материалы, которые обладают достаточной конструкционной прочностью, структура таких сплавов представляет собой разнородную систему с включением мягких и твердых элементов в различных пропорциях. Таким образом, получаются детали с гибкой структурой, которая в процессе работы, благодаря наличию мягкого свинца, приспособляется к поверхностям сопряженных механизмов, а наличие твердых элементов обеспечивает высокую прочность и износостойкость изделиям [1, 2].

Основные легирующие элементы свинцовых сплавов: олово, сурьма, кальций, медь, никель, мышьяк, кадмий. Эти элементы вводят для повышения основных физико-химических характеристик конечного металла. Так, мышьяк увеличивает термическую устойчивость, медь минимизирует ликвацию в процессе литья, кадмий улучшает антикоррозионные свойства, никель придает структуре поверхности износостойкость. Особой популярностью пользуются свинцовые сплавы, легированные кальцием (так называемые кальциевые баббиты), которые обладают высокой плотностью и термической устойчивостью. Сопоставимой по объему спроса является еще одна большая группа сплавов:

свинцово-сурьмянистые, применяющиеся в производстве аккумуляторных батарей и изготовлении долговечных оболочек электрических кабелей высокого напряжения [3, 4].

Теплоемкость – это характеристика процесса перехода между двумя состояниями термодинамической системы, которая зависит и от пути процесса (например, от проведения его при постоянном объеме или постоянном давлении), и от способа нагревания или охлаждения (квазистатического или нестатического). Неоднозначность в определении теплоемкости на практике устраняется тем, что выбирают и фиксируют путь квазистатического процесса (обычно оговаривается, что процесс происходит при постоянном давлении, равном атмосферному). При однозначном выборе процесса теплоемкость становится параметром состояния и теплофизическим свойством вещества, образующего термодинамическую систему [5, 6].

Практическое значение исследований теплоемкости важно для расчетов энергетических балансов процессов в химических реакторах и других аппаратах химического производства, а также для выбора оптимальных теплоносителей. Экспериментальное измерение теплоемкости для разных интервалов температур (от предельно низких до высоких) является основным методом определения термодинамических свойств веществ. Обычно измерения теплоемкости проводятся в режиме «нагрева» или «охлаждения» [5, 6].

Теория метода и описание установки

Исследование теплоемкости металлов проводилось по методике, описанной в работах [7 – 13], на установке, схема которой представлена на рис. 1. Прибор основан на применении дина-

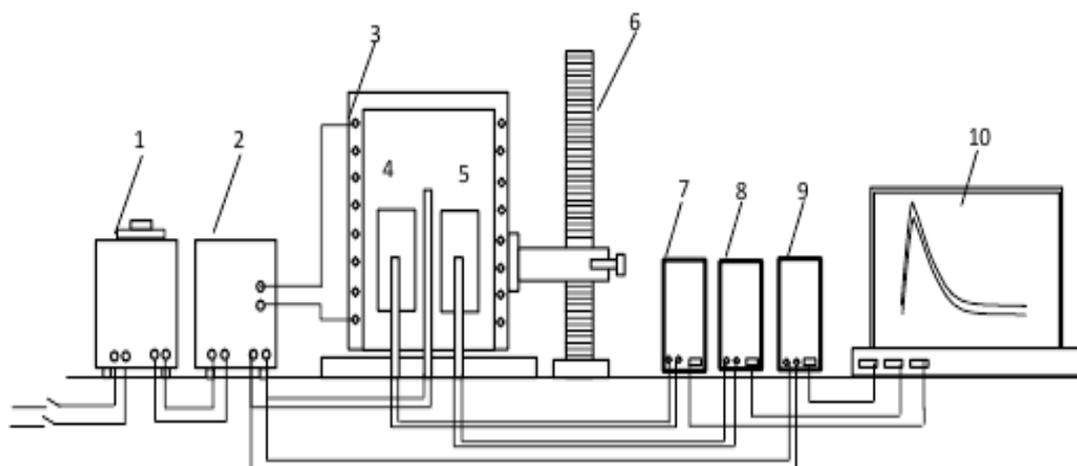


Рис. 1. Схема установки для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»:

1 – автотрансформатор; 2 – терморегулятор; 3 – электропечь; 4 – образец измеряемый; 5 – эталон; 6 – стойка электропечи; 7 – цифровой термометр измеряемого образца; 8 – цифровой термометр общего назначения; 9 – цифровой термометр эталона; 10 – регистрационный прибор (малый патент Республики Таджикистан № TJ 877, приоритет изобретения от 20.04.2017)

Fig. 1. Installation diagram for determining the heat capacity of solids in the "cooling" mode:

1 – autotransformer; 2 – thermometer; 3 – electric furnace; 4 – measured sample; 5 – reference standard; 6 – electric furnace rack; 7 – digital thermometer of the measured sample; 8 – general purpose digital thermometer; 9 – digital thermometer of the reference standard; 10 – registration device (small patent of the Republic of Tajikistan No. TJ 877, priority of the invention dated 04/20/2017)

мического С-калориметра с адиабатической оболочкой и тепломером.

Установка состоит из следующих узлов: электропечь 3 смонтирована на стойке 6, по которой она может перемещаться вверх и вниз (стрелкой показано направление перемещения). Образец 4 и эталон 5 (тоже могут перемещаться) представляют собой цилиндр длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термодпары. Концы термодпар подведены к цифровому многоканальному термометру (7 – 9), который подсоединен к компьютеру 10.

Электропечь включается через автотрансформатор 1, с помощью терморегулятора 2 устанавливается нужная температура. По показаниям цифрового многоканального термометра отмечается значение начальной температуры. Измеряемый образец и эталон устанавливаются в электропечь и нагреваются до нужной температуры, проводится контроль температуры по показаниям цифрового многоканального термометра на компьютере 10. Далее измеряемый образец и эталон одновременно вынимаются из электропечи. С этого момента фиксируется снижение температуры. Записываются показания цифровых термометров на компьютере через фиксированное время 10 с. Образец и эталон охлаждаются до температуры ниже 30 °С.

Одним из методов, позволяющим корректно установить температурную зависимость теплоемкости металлов и сплавов в области высоких температур, является метод сравнения скоростей охлаждения двух образцов (исследуемого и эта-

лонного), по закону охлаждения Ньютона–Рихмана.

Теряемое ранее разогретым телом массой m при его охлаждении на dT градусов количество теплоты δQ рассчитано по формуле

$$\delta Q = C_p^0 m dT, \quad (1)$$

где C_p^0 – удельная теплоемкость вещества, из которого состоит тело.

Допуская, что через поверхность тела происходит потеря энергии, считают, что теряемое через поверхность тела за промежуток времени dt количество теплоты δQ_s будет пропорционально разности температур тела T и окружающей среды T_0 , площади поверхности S и времени:

$$\delta Q_s = -\alpha(T - T_0) S dt, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи.

Если тело выделяет теплоту так, что температура всех его точек изменяется одинаково, тогда будет справедливо

$$\delta Q = \delta Q_s + C_p^0 m dT = -\alpha(T - T_0) S dt. \quad (3)$$

Выражение (3) можно представить в виде

$$C_p^0 m \frac{dT}{dt} = -\alpha(T - T_0) S. \quad (4)$$

Полагая, что C_p^0 , α , T и T_0 в малых интервалах температур не зависят от координат точек

поверхности образца, разогретых до равной температуры окружающей среды, для двух образцов соотношение (4) будет следующим:

$$\frac{C_p^0 m_1}{S_1 \alpha_1} \left(\frac{dT}{d\tau} \right)_1 = - \frac{C_p^0 m_2}{S_2 \alpha_2} \left(\frac{dT}{d\tau} \right)_2, \quad (5)$$

где S_1, S_2 и α_1, α_2 – площадь поверхности и коэффициент теплоотдачи эталона и исследуемых образцов.

Применение данного равенства для двух образцов (один из которых является эталоном), имеющих одинаковые состояния обработки поверхностей и размеры ($S_1 = S_2$), позволяет предположить, что их коэффициенты теплоотдачи будут равны $\alpha_1 = \alpha_2$ и это равенство выразится уравнением:

$$C_{p_1}^0 m_1 \left(\frac{dT}{d\tau} \right)_1 = C_{p_2}^0 m_2 \left(\frac{dT}{d\tau} \right)_2. \quad (6)$$

Зная удельную теплоемкость эталона $C_{p_1}^0$, скорости охлаждения эталона $\left(\frac{dT}{d\tau} \right)_1$ и исследуемого образца $\left(\frac{dT}{d\tau} \right)_2$, массы образцов m_1 и m_2 , можно рассчитать теплоемкость неизвестного вещества по формуле

$$C_{p_2}^0 = \frac{C_{p_1}^0 m_1 \left(\frac{dT}{d\tau} \right)_1}{m_2 \left(\frac{dT}{d\tau} \right)_2}. \quad (7)$$

При использовании формулы (7) допускается, что $\alpha_1 = \alpha_2$.

Полученные в ходе эксперимента зависимости температуры от времени охлаждения эталонного образца и образцов из сплавов системы Pb – Te представлены на рис. 2, а и описываются уравнением вида

$$T = ae^{-b\tau} + pe^{-k\tau}, \quad (8)$$

где a, b, p, k – постоянные величины для данного образца; τ – время охлаждения.

Дифференцируя уравнения (8) по времени, получаем уравнение для определения скорости охлаждения образцов из сплавов

$$\frac{dT}{d\tau} = -abe^{-b\tau} - pk^{-k\tau}. \quad (9)$$

По уравнению (9) рассчитана скорость охлаждения образцов из сплавов системы Pb – Te, которая графически представлена на рис. 2, б. Значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk по уравнению (9) для исследованных сплавов приведены в табл. 1.

Температурная зависимость удельной теплоемкости сплавов системы Pb – Te описывается уравнением

$$C_p^0 = a + bT + cT^2 + dT^3. \quad (10)$$

Значения коэффициентов в уравнении (10) представлены в табл. 2.

Результаты расчета по формулам (7) и (10) значений удельной теплоемкости сплавов системы Pb – Te через 50 К представлены в табл. 3. Как видно, с ростом температуры и содержания теллура удельная теплоемкость сплавов увеличивается.

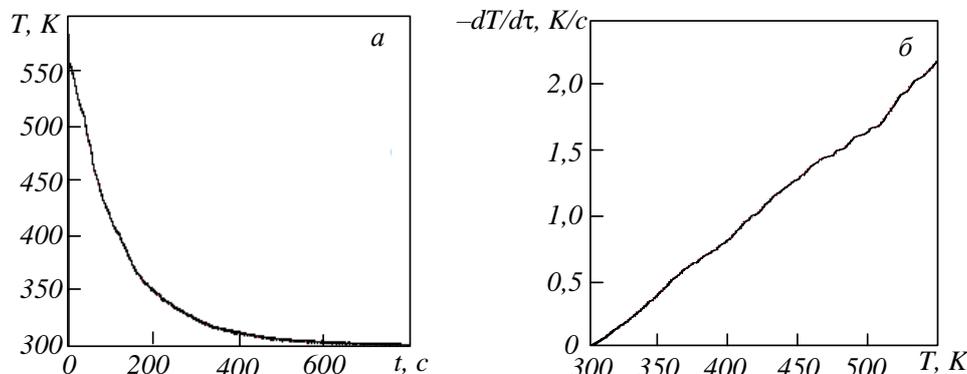


Рис. 2. График зависимости температуры от времени охлаждения (а) и скорости охлаждения образцов от температуры (б) для образцов из сплавов системы Pb – Te:

— эталон (Cu марки М00); – Pb; - - - - - + 0,01 Te; - · - · - · + 0,05 Te; — — — — + 0,10 Te; - · - · - · + 0,50 Te

Fig. 2. Graph of temperature dependence on cooling time (a) and cooling rate of samples from temperature (б) for samples from alloys of the Pb – Te system:

— — — — philodontox (Cu chodon M00); – Pb; - - - - - + 0,01 Te; - · - · - · + 0,05 Te; — — — — + 0,10 Te; - · - · - · + 0,50 Te

Значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнении (2) для сплавов системы Pb – Te и эталона (медь марки М00)

Table 1. The values of the coefficients a, b, p, k, ab, pk in equation (2) for alloys of the system Pb – Te and the reference standard (M00 grade copper)

Содержание теллура в сплаве, % (по массе)	a , К	$b \cdot 10^{-3}$, $с^{-1}$	p , К	$k \cdot 10^{-4}$, $с^{-1}$	ab , $К \cdot с^{-1}$	$pk \cdot 10^{-3}$, $К \cdot с^{-1}$
0	264,440	8,87	306,18	0,281	2,34	8,59
0,01	264,440	8,87	307,59	0,280	2,35	8,60
0,05	264,440	8,87	307,28	0,280	2,35	8,60
0,10	264,440	8,87	308,08	0,279	2,34	8,59
0,50	264,440	8,87	307,98	0,279	2,34	8,59
Эталон	264,438	8,87	307,18	0,280	2,34	8,59

Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи эталона (Cu) и сплавов системы Pb – Te приведены на рис. 3.

Для расчета изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по формулам (11) – (13) были использованы интегралы от удельной теплоемкости по уравнению (10):

$$[H^{\circ}(T) - H^{\circ}(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (11)$$

$$[S^{\circ}(T) - S^{\circ}(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (12)$$

$$[G^{\circ}(T) - G^{\circ}(T_0)] - [H^{\circ}(T) - H^{\circ}(T_0)] - T[S^{\circ}(T) - S^{\circ}(T_0)].$$

Результаты расчета изменений термодинамических функций для сплавов системы Pb – Te и эталона (Cu марки М00) через 50 К представлены в табл. 4.

Результаты исследования показывают, что при повышении температуры и концентрации теллура удельная теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов системы Pb – Te увеличиваются, а значение энергии Гиббса снижается.

Выводы

В режиме «охлаждения» по известной теплоемкости эталонного образца из меди марки М00 определены теплоемкости сплавов системы Pb – Te. В результате математической обработки получены полиномы, описывающие температурную зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций этих сплавов в интервале температур 300 – 550 К. Полученные данные исследования показывают, что с ростом температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшаются. Добавки теллура в пределах 0,01 – 0,50 % (по массе) незначительно увеличивает теплоемкость, энтальпию и энтропию сплава. При этом значения энергии Гиббса уменьшаются. Изменение теплоемкости сплавов системы Pb – Te в зависимости от содержания теллура объясняется ростом степени гетеро-

Значения коэффициентов a, b, c, d в уравнении (10) для сплавов системы Cu – Te и эталона (медь марки М00)

Table 2. The values of the coefficients a, b, c, d in equation (10) for alloys of the system Cu – Te and the reference standard (M00 grade copper)

Содержание теллура в сплаве, % (по массе)	a , Дж/(кг·К)	$b \cdot 10^{-2}$, Дж/(кг·К ²)	$c \cdot 10^{-4}$, Дж/(кг·К ³)	$d \cdot 10^{-7}$, Дж/(кг·К ⁴)	Коэффициент корреляции R^2
Эталон	324,45	27,51	-2,87	0,142	1
Pb	105,60	9,40	-0,85	0,050	1
+ 0,01 Te	105,61	9,40	-0,85	0,050	0,999
+ 0,05 Te	105,65	9,40	-0,85	0,050	0,999
+ 0,10 Te	105,70	9,40	-0,85	0,500	0,999
+ 0,50 Te	106,11	9,33	-0,84	0,490	0,999

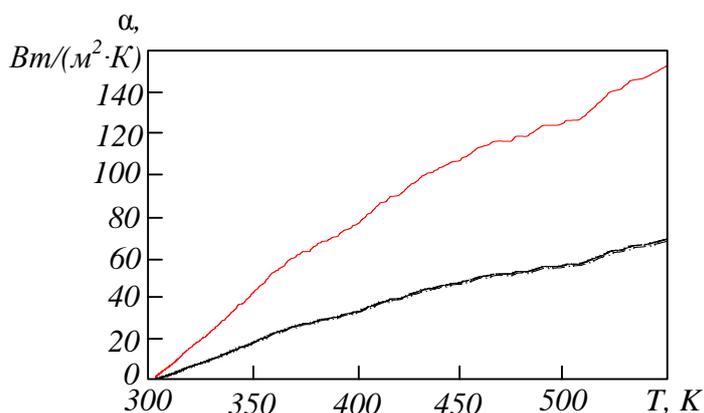


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи эталона (Cu) и сплавов системы Pb – Te
 Fig. 3. Temperature dependence of the heat transfer coefficient of the reference standard (Cu) and alloys of the Pb – Te system

генности структуры сплавов при их легировании теллуром. Рост изменений термодинамических функций сплавов в зависимости от температуры связано с увеличением энергии колебаний кристаллической решетки сплавов системы Pb – Te.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов М.П. Рафинирование свинца и переработка полупродуктов. Москва: Металлургия, 1977. 280 с.
2. Электрохимия металлов и химия амальгам / В.И. Брянцева, Л.А. Цхе, В.Г. Бундже, Ю.Д. Дунаев, Г.З. Кирьяков. Алма-ата: «Наука» Каз. ССР, 1969. 67 с.
3. Худойбердизода С.У., Ганиев И.Н., Отаджонов С.Э., Эшов Б.Б., Якубов У.Ш. Влияние меди на теплоемкость и изменений термодинамических функции свинца // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. № 1. С. 55–61.
4. Ганиев И.Н., Окилов Ш.Ш., Эшов Б.Б., Муллоева Н.М., Якубов У.Ш. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций свинцово-сурьмяного сплава SSu_3 с калием // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2021. Т. 77. № 1. С. 24–30.
5. Ивлиев А.Д. Метод температурных волн в теплофизических исследованиях // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. № 5. С. 771–792.
6. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Москва: Металлургия, 1989. 384 с.
7. Ганиев И.Н., Окилов Ш.Ш., Эшов Б.Б., Муллоева Н.М., Якубов У.Ш. Влияние добавок натрия на температурную зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций свинцово-сурьмяного сплава SSu_3 // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2021. № 1. С. 89–94.
8. Худойбердизода С.У., Ганиев И.Н., Эшов Б.Б., Муллоева Н.М., Якубов У.Ш. Влияние теллура на кинетику окисления свинцово-сурьмяного сплава SSu_3 , в твердом состоянии // Вестник ТНУ. Серия естественных наук. 2020. № 3. С. 172–180.

Т а б л и ц а 3

Значения удельной теплоемкости сплавов системы Pb – Te и эталона (медь марки M00)
 Table 3. Values of the specific heat capacity of the alloys of the system Pb – Te and reference standard (copper grade M00)

Содержание меди в сплаве, % (по массе)	C_p^0 , Дж/(кг·К), при T, К					
	300	350	400	450	500	550
Pb	384,98	391,67	397,66	403,07	408,00	412,56
+ 0,01 Te	127,50	130,23	132,80	135,24	137,60	139,90
+ 0,05 Te	127,51	130,24	132,81	135,25	137,61	139,91
+ 0,10 Te	127,53	130,26	132,82	135,27	137,62	139,93
+ 0,50 Te	127,58	130,32	132,88	135,32	137,68	139,99

Изменения термодинамических функций сплавов системы Pb – Te и эталона (медь марки M00)
Table 4. Changes in thermodynamic functions of the alloys of the system Pb–Te and reference standard (copper mark M00)

Содержание теллура в сплаве, % (по массе)	$[H^\circ(T) - H^\circ(T_0^\circ)],$ кДж/кг, для сплавов					
	T, К					
	300	350	400	450	500	550
Эталон	0,71199	20,1315	39,8675	59,8880	80,1667	100,6823
Pb	0,23578	6,67982	13,2562	19,9577	26,7791	33,7169
+ 0,01 Te	0,23579	6,68024	13,2570	19,9589	26,7808	33,71894
+ 0,05 Te	0,23583	6,68114	13,2587	19,9614	26,7839	33,7227
+ 0,10 Te	0,23594	6,68422	13,2649	19,9707	26,7964	33,7386
+ 0,50 Te	0,23648	6,69929	13,2941	20,0137	26,8530	33,8086
	$[S^\circ(T) - S^\circ(T_0^\circ)],$ кДж/(кг·К), для сплавов					
Эталон	0,002381	0,062238	0,114937	0,162092	0,204819	0,243922
Pb	0,000788	0,020650	0,038209	0,053993	0,068365	0,081588
+ 0,01 Te	0,000788	0,020651	0,038212	0,053996	0,068369	0,081593
+ 0,05 Te	0,000789	0,020654	0,038217	0,054004	0,068378	0,081603
+ 0,10 Te	0,000789	0,020664	0,038234	0,054028	0,068409	0,081641
+ 0,50 Te	0,000791	0,020710	0,038319	0,054145	0,068555	0,081812
	$[G^\circ(T) - G^\circ(T_0^\circ)],$ кДж/кг, для сплавов					
Эталон	-0,00220	-1,65181	-6,10716	-13,0534	-22,2427	-33,475
Pb	-0,00073	-0,54769	-2,02751	-4,33911	-7,40333	-11,1565
+ 0,01 Te	-0,00073	-0,54772	-2,02763	-4,33938	-7,40379	-11,1572
+ 0,05 Te	-0,00073	-0,54786	-2,02805	-4,3402	-7,40513	-11,1591
+ 0,10 Te	-0,00073	-0,54805	-2,02884	-4,34195	-7,40816	-11,1637
+ 0,50 Te	-0,00073	-0,5493	-2,03339	-4,35155	-7,42434	-11,1879

- Ганиев И.Н., Норова М.Т., Эшов Б.Б., Иброхимов Н.Ф., Иброхимов С.Ж. Влияние добавок скандия на температурную зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминиево-магниевого сплава // Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121. № 1. С. 25–31.
- Ганиев И.Н., Одинаев Ф.Р., Сафаров А.Г., Якубов У.Ш., Кабутов К. Температурная зависимость теплоемкости и термодинамических функции сплава АЖ 4.5 легированного висмутом // Металлы. 2020. № 1. С. 21–29.
- Ганиев И.Н., Назарова М.Т., Якубов У.Ш., Сафаров А.Г., Курбонова М.З. Влияния литья на удельную теплоемкость и изменение термодинамических функции алюминиевого сплава АБ1 // Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58. № 1. С. 55–60.
- Ганиев И.Н., Назарова М.Т., Курбонова М.З., Якубов У.Ш. Влияния натрия на удельную теплоемкость и изменение термодинамических функции алюминиевого сплава АБ1 // Известия Санкт-Петербургский государственной технологический институт (технический институт). 2019. № 51 (77). С. 2–30.
- Ганиев И.Н., Якубов У.Ш., Назарова М.Т., Курбонова М.З. Влияние добавок калия на

температурную зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава АБ1 // Вестник Казанского государственного технического университета им А.Н. Туполева. 2019. Т. 75. № 4. С. 16–22.

REFERENCES

- Smimov M.P. *Lead refining and processing of intermediates*. Moscow: Metallurgiya, 1977, 280 p. (In Russ.).
- Bryantseva V.I., Tskhe L.A., Bundzhe V.G., Dunaev Yu.D., Kir'yakov G.Z. *Electrochemistry of metals and chemistry of amalgams*. Alma-ata: «Nauka» Kaz. SSR, 1969, 67 p. (In Russ.).
- Khudoiberdizoda S.U., Ganiev I.N., Otadzhonov S.E., Eshov B.B., Yakubov U.Sh. The influence of copper on the heat capacity and changes in the thermodynamic functions of lead. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2021, vol. 59, no. 1, pp. 55–61. (In Russ.).
- Ganiev I.N., Okilov Sh.Sh., Eshov B.B., Mulloeva N.M., Yakubov U.Sh. Temperature dependence of heat capacity and changes in thermodynamic functions of lead-antimony alloy CCu3 with potassium. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2021, vol. 77, no. 1, pp. 24–30. (In Russ.).

5. Ivliev A.D. The method of temperature waves in thermophysical research. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2009, vol. 47, no. 5, pp. 771–792. (In Russ.).
6. Zinov'ev V.E. Thermophysical features of metals at high temperatures. Moskva: Metallurgiya, 1989, 384 p. (In Russ.).
7. Ganiev I.N., Okilov Sh.Sh., Eshov B.B., Mulloeva N.M., Yakubov U.Sh. The effect of sodium additives on the temperature dependence of the heat capacity and changes in the thermodynamic functions of the lead-antimony alloy SSu3. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizaina. Seriya 1. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2021, no. 1, pp. 89–94. (In Russ.).
8. Khudoiberdizoda S.U., Ganiev I.N., Eshov B.B., Mulloeva N.M., Yakubov U.Sh. Effect of tellurium on the kinetics of oxidation of lead-antimony alloy SSu3, in the solid state. *Vestnik TNU. Seriya estestvennykh nauk*. 2020, no. 3, pp. 172–180. (In Russ.).
9. Ganiev I.N., Norova M.T., Eshov B.B., Ibrokhimov N.F., Ibrokhimov S.Zh. The effect of scandium additives on the temperature dependence of the heat capacity and changes in the thermodynamic functions of aluminum-magnesium alloys. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2020, vol. 121, no. 1, pp. 25–31. (In Russ.).
10. Ganiev I.N., Odinaev F.R., Safarov A.G., Yakubov U.Sh., Kabutov K. Temperature dependence of the heat capacity and thermodynamic functions of a bismuth-doped alloy AJ 4.5. *Metally*. 2020, no. 1, pp. 21–29. (In Russ.).
11. Ganiev I.N., Nazarova M.T., Yakubov U.Sh., Safarov A.G., Kurbonova M.Z. Effects of lithium on the specific heat capacity and changes in the thermodynamic functions of aluminum alloy A1. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2020, vol. 58, no. 1, pp. 55–60. (In Russ.).
12. Ganiev I.N., Nazarova M.T., Kurbonova M.Z., Yakubov U.Sh. Effects of sodium on specific heat capacity and changes in thermodynamic functions of aluminum alloy AB1. *Izvestiya Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii institut (tekhnicheskii institut)*. 2019, no. 51 (77), pp. 2–30. (In Russ.).
13. Ganiev I.N., Yakubov U.Sh., Nazarova M.T., Kurbonova M.Z. The effect of potassium additives on the temperature dependence of the heat capacity and changes in the thermodynamic functions of aluminum alloy AB1. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im A.N. Tupoleva*. 2019, vol. 75, no. 4, pp. 16–22. (In Russ.).

Сведения об авторах

Саидмири Убайдулло Худойбердизода, старший научный сотрудник, Центр по исследованию инновационных технологий НАН Таджикистана
E-mail: saidmir010992@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5797-2738

Изатулло Наврузович Ганиев, академик НАНТ, д.х.н., профессор, заведующий лабораторией, Институт химии В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана
E-mail: ganiev48@mail.ru
ORCID: 0000-0002-2791-6508

Бахтиёр Бадалович Эшов, д.т.н., доцент, директор, Центр исследования инновационных технологий при Национальной академии наук Таджикистана
E-mail: ishov1967@mail.ru

Нукра Мазабиоевна Муллоева, к.х.н., заведующий лабораторией, Центр по исследованию инновационных технологий НАН Таджикистана
E-mail: mulloeva.1984@mail.ru

Сухроб Эргашалиевич Отаджонов, старший преподаватель кафедры общей физики и твердого тела, Худжандский государственный университет имени Б. Гафурова
E-mail: suhrob_22.10.91@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3362-8529

Information about the authors

Saidmiri U. Khudoiberdizoda, Senior Researcher, Centre for Innovative Development of Science and New Technologies at the National Academy of Sciences of Tajikistan
E-mail: saidmir010992@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5797-2738

Izatullo N. Ganiev, Academician at NAST, doctor of chemical sciences, professor, head of the laboratory, V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan
E-mail: ganiev48@mail.ru
ORCID: 0000-0002-2791-6508

Bakhtier B. Eshov, Doctor of Engineering Science, associate lecturer, director, State Scientific Institution “Center of Innovation Development of Science and New Technologies” of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan
E-mail: ishov1967@mail.ru

Nukra M. Mulloeva, Candidate of Chemical Sciences, head of the laboratory, State Scientific Institution “Center of Innovation Development of Science and New Technologies” of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan
E-mail: mulloeva.1984@mail.ru

Sukhrob E. Otadzhonov, Senior lecturer of the Department of General Physics and Solid State, Khujand State University named after Academician B. Gafurov
E-mail: suhrob_22.10.91@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3362-8529

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
 The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 01.04.2022
 После доработки 23.09.2022
 Принята к публикации 01.11.2022

Received 01.04.2022
 Revised 23.09.2022
 Accepted 01.11.2022

Оригинальная статья

УДК 669.539.382:669.17:669.046

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-11-18

ВЫЯВЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ОЦК КРИСТАЛЛЕ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

© 2022 г. А. Н. Гостевская¹, А. В. Маркидонов^{1,2}

¹Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

²Кузбасский гуманитарно-педагогический институт Кемеровского государственного университета, (Россия, 654027, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Циолковского, 23)

Аннотация. В представленной работе излагаются результаты молекулярно-динамического моделирования изменения поверхностного слоя расчетной ячейки при кратковременном высокоэнергетическом воздействии. Интерес к данной теме обусловлен тем, что процессы, протекающие в пребывающем в жидком состоянии поверхностном слое в последующем окажут свое влияние при его кристаллизации, и, как следствие, скажутся на различных физических и геометрических характеристиках поверхности материала в целом. Построенная и описанная в работе модель, температура расчетной ячейки в которой распределяется в соответствии с решением линейной задачи теплопроводности, позволила выявить нарушение сплошности поверхностного слоя, заключающееся в локализации избыточного свободного объема в виде группы сферических пор. Размеры этих несовершенств, а также длительность их существования имеют отличия при моделировании при разной плотности энергии лазерного излучения. Дальнейшее исследование позволило выявить условия, при которых поры остаются стабильными на протяжении всего времени моделирования, а также выявить связь между кристаллографической ориентацией межфазной границы твердое тело – жидкость и размерами образуемых пор.

Ключевые слова: кристалл, модель, температура, плавление, пора, поверхность, межфазная граница

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания 0809-2021-0013.

Для цитирования: Гостевская А.Н., Маркидонов А.В. Выявление преобразования структурных изменений в ОЦК кристалле при лазерном воздействии методом молекулярной динамики // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. №4 (42). С. 11 – 18. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-10-18](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-10-18)

Original article

DETECTION OF STRUCTURAL CHANGES IN A BCC CRYSTAL-LE DYNAMICS UNDER LASER INFLUENCE BY THE METHOD OF MOLECULAR

© 2022 A. N. Gostevskaya¹, A. V. Markidonov^{1,2}

¹Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

²Kuzbass Humanitarian Pedagogical Institute of Kemerovo State University (23 Tsiolkovsky st., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The presented work presents the results of molecular dynamics modeling of changes in the surface layer of the computational cell under a short-term high-energy impact. Interest in this topic is because the processes occurring in the surface layer, which is in a liquid state, will subsequently have an impact during its

crystallization, and, as a result, will affect various physical and geometric characteristics of the surface of the material as a whole. The model constructed and described in the work, in which the temperature of the computational cell is distributed in accordance with the solution of the linear problem of heat conduction, made it possible to reveal the discontinuity of the surface layer, which consists in the localization of excess free volume in the form of a group of spherical pores. The sizes of these imperfections, as well as the duration of their existence, have differences when modeling different energy densities of laser radiation. Further research made it possible to reveal the conditions under which the pores remain stable throughout the entire simulation time, as well as to reveal the relationship between the crystallographic orientation of the “solid-liquid” interface and the sizes of the formed pores.

Keywords: crystal, model, temperature, melting, pore, surface, interface

Financing: The work was carried out within the framework of the state task 0809-2021-0013.

For citation: Gostevskaya A.N., Markidonov A.V. Revealing the transformation of structural changes in a bcc crystal dynamics under laser exposure by the method of molecular. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4 (42), pp. 11 – 18. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-11-18](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-11-18)

Введение

Внешние высокоэнергетические воздействия на поверхность твердого тела, например, ультракороткими сверхмощными лазерными импульсами, могут приводить к фазовым переходам, в результате которых структура поверхности претерпевает кардинальные изменения. Скорость протекания таких процессов может быть настолько большой, что не позволяет проводить их исследование путем прямого наблюдения, поэтому наиболее рациональным видится применение методов компьютерного моделирования, которые в условиях возрастающей вычислительной мощности современных компьютеров позволяют рассматривать все более сложные системы.

Практический интерес представляют процессы неравновесного нагрева вещества при лазерном воздействии, поэтому они служат объектом различных экспериментальных и теоретических исследований [1 – 3].

Облучение материала высокоэнергетическими лазерными импульсами приводит к плавлению и движению расплава, вызванному резкими температурными градиентами и релаксацией давления, с последующим отрывом вещества от поверхности (абляция), что находит свое применение в различных областях. Явление лазерной абляции успешно изучается с помощью метода молекулярной динамики [4 – 6], хотя и предполагает целый ряд допущений. Например, в рамках классической молекулярной динамики рассматриваются временные интервалы, соответствующие характеристическому времени электронно-фононной релаксации.

Структурные изменения, происходящие в аморфной фазе на стадии остывания после прекращения воздействия, несомненно, окажут влияние на характеристики полностью или частично кристаллизованной структуры. Поэтому исследования

аморфной структуры материала после лазерного воздействия вызывают практический интерес.

Материал и методы исследования

В рамках проводимого исследования изучались структурные изменения, происходящие в материале при высокотемпературном воздействии в рамках молекулярно-динамического моделирования. Модель строилась следующим образом. В прямоугольной системе координат задавали размер расчетной ячейки в трех взаимно ортогональных кристаллографических направлениях, совпадающих с координатными осями. Затем формировали элементарную ячейку, расположение частиц в которой соответствовало ОЦК решетке, и путем трансляции такими ячейками заполняли весь заданный объем. Расчетная ячейка представляла собой прямоугольный параллелепипед размерами $(20 \times 100 \times 12) a_0$ (где a_0 – равновесный параметр решетки). Предполагалось проведение исследования на модели кристаллита железа, то $a_0 = 2,866 \text{ \AA}$. Общее количество моделируемых частиц – 48000 ед. Вдоль осей X и Z использовали периодические граничные условия, а вдоль оси Y – свободные, имитирующие поверхность кристалла. Ориентацию расчетной ячейки в пространстве устанавливали таким образом, чтобы ось X совпадала с кристаллографическим направлением $[100]$, ось Y – с направлением $[010]$, а Z – с $[001]$. В качестве функции межчастичного взаимодействия использовали потенциал, построенный с использованием метода погруженного атома [7]. Для интегрирования уравнений движения, описывающих поведение системы частиц, использовали скоростной алгоритм Верле с временным шагом 1 фс. Для выполнения расчетов использовали пакет XMD [8]. Визуализацию результатов моделирования осуществляли при помощи пакета визуализации OVITO [9].

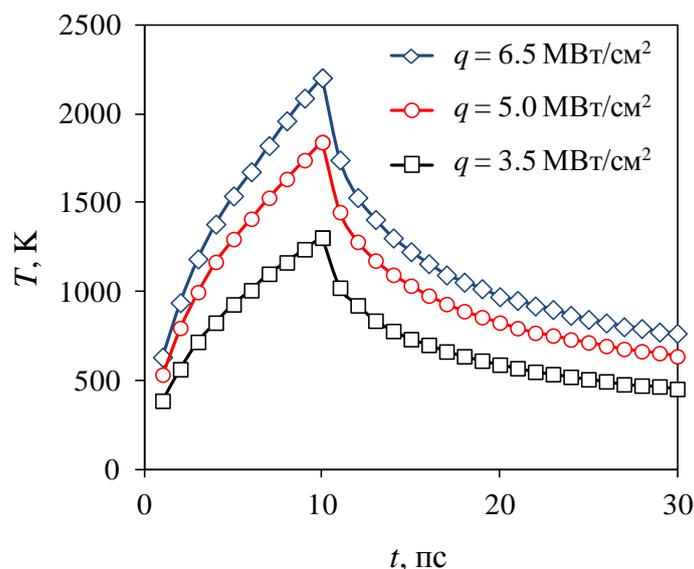


Рис. 1. Изменение температуры расчетной ячейки в процессе моделирование при плотности энергии 6,5, 5,0 и 3,5 МВт/см²
 Fig. 1. Change in the temperature of the computational cell in the process of modeling with a change in the energy density 6,5, 5,0 и 3,5 МВт/см²

Для моделирования нагрева мишени под воздействием лазерного излучения расчетную ячейку разбивали на 10 слоев равной толщины вдоль оси Y , в каждом из которых задавали определенное значение температуры, убывающее по мере удаления от поверхности. При установлении теплового равновесия между электронами и фононами для описания распространения тепла можно использовать модель теплопроводности. При использовании модели полубесконечного твердого тела аналитически точное решение тепловой задачи можно получить путем интегральных преобразований [9]. При этом, если интенсивность источника не зависит от времени, а физические параметры постоянны и не зависят от температуры (линейная задача теплопроводности), то распределение температуры по глубине образца на стадии нагрева определяется как функция координат следующим образом (при $t < \tau$):

$$Th(y, t) = \frac{2Aq}{\lambda} \sqrt{at} \cdot \text{ierfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{at}}\right), \quad (1)$$

где A – поглощательная способность; q – плотность энергии; λ – теплопроводность; a – температуропроводность; τ – длительность воздействия.

Функция $\text{ierfc}(x)$, входящая в зависимость (1), представляет собой интеграл от функции интеграла вероятности:

$$\text{ierfc}(x) = \int_x^{\infty} \text{erfc}(x) dx. \quad (2)$$

После окончания лазерного воздействия ($t > \tau$) наступает стадия охлаждения и распределение температуры определяется как

$$Tc(y, t) = \frac{2Aq}{\lambda} \left[\sqrt{at} \cdot \text{ierfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{at}}\right) - \sqrt{a(t-\tau)} \cdot \text{ierfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{a(t-\tau)}}\right) \right]. \quad (3)$$

Для вычисления температуры использовали следующие параметры: $A = 0,68$; $q = 3,5 \div 6,5$ МВт/см²; $\lambda = 80$ Вт/(м·К); $a = 2,621 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $\tau = 10 \cdot 10^{-12}$ с.

Результаты и их обсуждение

Процесс моделирования состоял из двух этапов. На начальном этапе расчетную ячейку подвергали неравномерному нагреву в течение 10 пс модельного времени в соответствии с формулой (1). Второй этап заключался в неравномерном охлаждении в течение 20 пс, при котором температура расчетной ячейки устанавливалась в соответствии с формулой (3). На рис. 1 представлено изменение средней температуры расчетной ячейки в процессе моделирования.

После того, как локальная температура расчетной ячейки на этапе нагрева начинает превышать температуру плавления, происходит фазовый переход и в ячейке формируется граница раздела твердой и жидкой фаз. Последующее повышение температуры приводит к отслоению частиц. Этап охлаждения сопровождается локализацией областей разряднения, сформированных на предыдущем этапе нагрева (рис. 2, а),

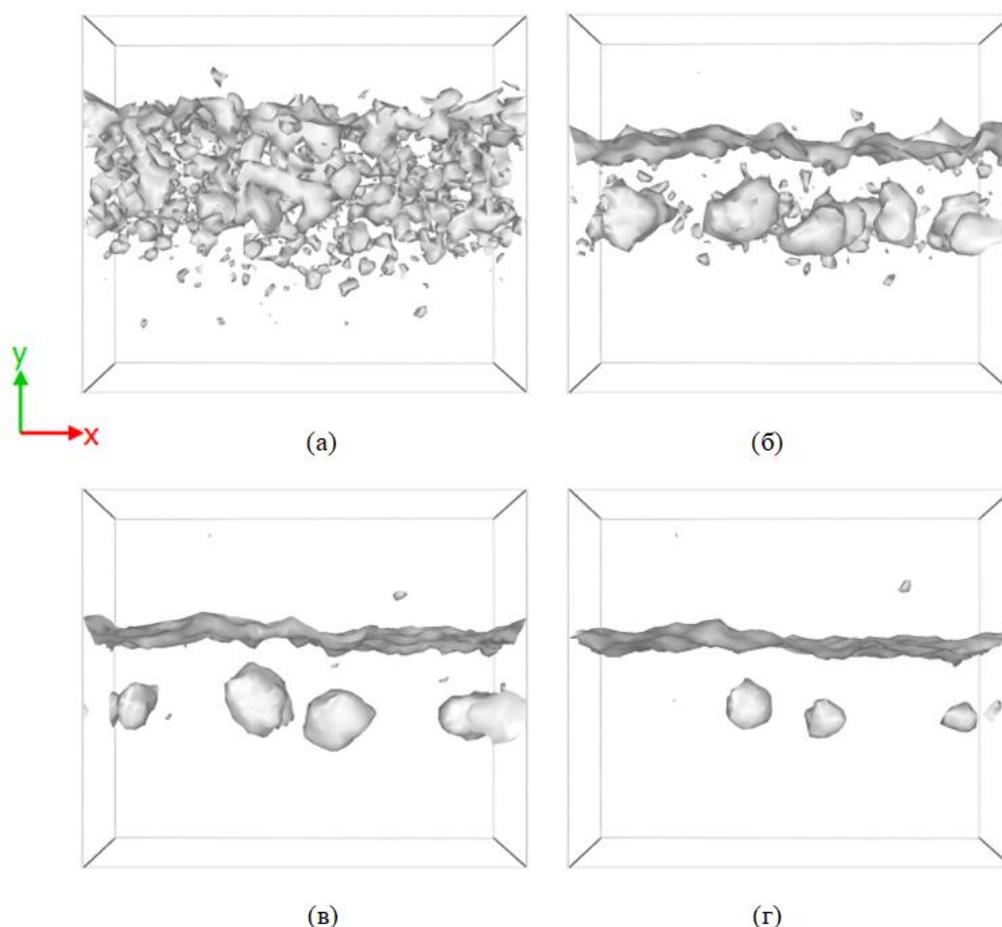


Рис. 2. Визуализация свободной поверхности, образующейся в расчетной ячейке, через 11, 15 19 и 22 пс модельного времени (а – д)

Fig. 2. Visualization of the free surface formed in the computational cell after 11, 15 19 and 22 ps of simulation time (a – d)

их коалесценцией и образованием сферических пор (рис. 2, б – д).

Для идентификации пустот и в последующем оценки площади их поверхности использовали алгоритм [10], основанный на методе альфа-формы Эдельсбруннера и Мюкке, в котором геометрическое множество точек объединяется поверхностной сеткой при помощи тетраэдризации Делоне с последующей процедурой сглаживания. Идентификация пустоты в объеме твердого тела определяется радиусом виртуальной сферы, которая вписывается в межатомные пространства. Радиус такой сферы должен как минимум превышать половину кратчайшего межатомного расстояния, иначе в расчеты будут включены «искусственные» пустоты. В настоящей работе радиус виртуальной сферы принимали равным параметру решетки.

При моделировании различной плотности поглощенной энергии излучения, достигаемой изменением значения q в формулах (1) и (3), наблюдаются различные структурные изменения в приповерхностных слоях расчетной ячейки. Как правило, для количественной оценки подобного рода изменений используют коэффициент пористости, выражаемый через плотности аморфной и кристалличе-

ской структур. В рассматриваемом случае более наглядным будет являться коэффициент пористости θ , определяемый как доля свободной поверхности, создаваемой порами, в общей свободной поверхности, идентифицируемой в расчетной ячейке. На рис. 3 представлено изменение θ в процессе моделирования при различных q . При $q \leq 3,5$ МВт/см² пустоты, формирующиеся в ячейке, в процессе моделирования растворяются. При более высоких значениях q в аморфной области формируются протяженные пустоты, остающиеся стабильными на протяжении всего моделирования.

Механизмом растворения пор в поверхностном слое расчетной ячейки является диффузионно-вязкое течение материала в образовавшуюся пустоту. Скорость протекания диффузионных процессов во многом определяется температурой, и, следовательно, стабильность поры на втором этапе моделирования будет зависеть от скорости охлаждения расчетной ячейки. Эта величина при реализации охлаждения в соответствии с формулой (3) оценивается как $3,53 \cdot 10^{13}$ К/с. Для достижения других скоростей в формулу был добавлен коэффициент $(\tau/t)^n$ (где n – произ-

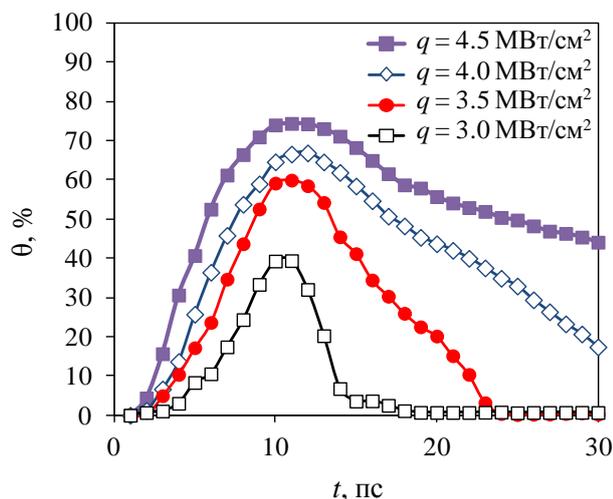


Рис. 3. Изменение коэффициента пористости в течении 30 пс при $q = 4,5$ МВт/см² (■), $q = 4,0$ МВт/см² (◇), $q = 3,5$ МВт/см² (●), $q = 3,0$ МВт/см² (□)

Fig. 3. Porosity coefficient change within 30 ps при $q = 4,5$ МВт/см² (■), $q = 4,0$ МВт/см² (◇), $q = 3,5$ МВт/см² (●), $q = 3,0$ МВт/см² (□)

вольное рациональное число).

Стоит отметить, что с точки зрения квази-термодинамического подхода к описанию образования новой фазы в конденсированной среде формирование флуктуационным путем зародыша поры («фазы пустоты») с размером, превышающим некоторое критическое значение, определяемое удельной поверхностной энергией, маловероятно. В связи с этим для гомогенного зарождения поры необходимы упругие растягивающие напряжения, источником которых могут являться избыточные вакансии [11]. Еще одним источником напряжений в твердом теле может являться ударная волна [12 – 14]. В рассматриваемом случае напряженное состояние расчетной ячейки обусловлено неравномерным нагревом, и, кроме того, граница раздела создает собственное поле напряжений, величина которых пропорциональна свободной поверхностной энергии γ . Свободная энергия границы раздела кристалл – расплав анизотропна и зависит от кристаллографической ориентации твердой фазы [15]. При этом, как следует из результатов работы [16], для ОЦК структуры анизотропия проявляется в гораздо меньшей степени, чем для ГЦК. В работе [17] при выполнении расчетов анизотропии свободной поверхностной энергии железа с помощью различных методов исследования получены результаты с разбросом порядка 5 %. При анализе результатов можно сделать вывод, что справедливо соотношение $\gamma_{110} \leq \gamma_{111} < \gamma_{100}$. Следовательно, чем выше ретикулярная плотность кристаллографической плоскости, обра-

зующей поверхность раздела, тем меньше значение энергии.

В настоящей работе проведено моделирование расчетных ячеек, содержащих границы раздела различной кристаллографической ориентации. Оказалось, что размеры пор и время их существования при этом также меняются, хотя температура верхних слоев при моделировании межфазных границ различной кристаллографической ориентации меняется пренебрежимо мало. На рис. 4, а приведены результаты расчетов коэффициента пористости на стадии охлаждения (показан временной отрезок, содержащий наиболее наглядный результат).

Существует взаимосвязь между кристаллографической ориентацией границы и размерами формируемых пустот (рис. 4, а), но отчетливо она проявляется лишь на определенном временном интервале. По-видимому, в наибольшей степени влияние границы начинает проявляться в том момент, когда она в процессе своего смещения на стадии охлаждения расчетной ячейки приближается к пустотам. При этом межфазная граница, обладающая большей энергией γ , движется с большей скоростью. В результате этого уплотнение поверхностного слоя идет более интенсивно и большее количество свободного объема локализуется в виде пор, а не растворяется. Поэтому при моделировании межфазной границы с кристаллографической ориентацией (100) формируются более крупные поры, но так как скорость охлаждения одинакова, то во всех случаях они растворяются за примерно равный промежуток времени. Подтверждением этого механизма является тот факт, что доля атомов с локальным ОЦК окружением в трех верхних слоях при моделировании межфазной границы с ориентацией (100) на этапе охлаждения увеличивается гораздо быстрее по сравнению с другими моделируемыми ориентациями границ (рис. 4, б). В данном случае для проведения структурного анализа применялась идентификация локального окружения частиц с использованием метода углов и связей Экланда-Джонса [18].

Выводы

Быстропротекающие процессы в твердых телах на сегодняшний день успешно изучаются с помощью методов компьютерного моделирования. Построена молекулярно-динамическая модель для изучения процессов, происходящих в поверхностных слоях материала при внешнем кратковременном высокоэнергетическом воздействии. Обнаружено, что в поверхностном слое после прекращения внешнего воздействия

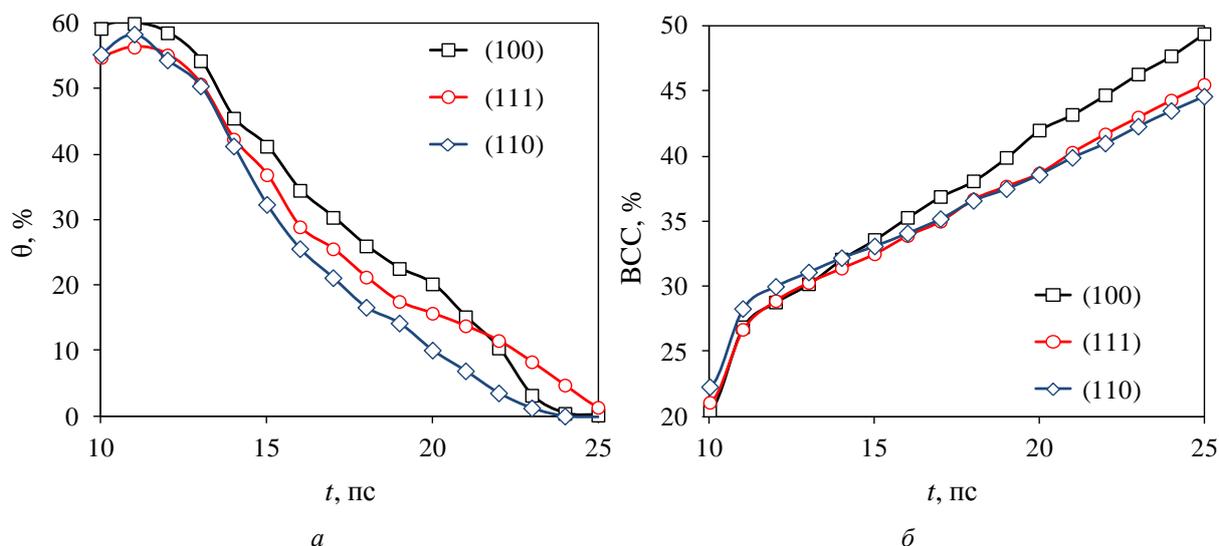


Рис. 4. Изменение коэффициента пористости расчетной ячейки (a) и доли атомов с локальным ОЦК окружением (b) на заключительной стадии моделирования при кристаллографической ориентации межфазной границы:

□ – (110); ○ – (111); ◇ – (110)

Fig. 4. Changes in the porosity coefficient of the computational cell (a) and the fraction of atoms with a local bcc environment (b) at the final stage of modeling for different crystallographic orientations of the interfacial boundary:

□ – (110); ○ – (111); ◇ – (110)

свободный объем локализуется в виде группы пор, которые растворяются в процессе усадки. Стабилизировать данные поры можно путем увеличения скорости охлаждения расчетной ячейки. Установлено влияние ориентации межфазной границы твердое тело – жидкость на размеры формируемых пор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Markidonov A.V., Starostenkov M.D., Gostevskaya A.N., et al. Molecular dynamics study of structural changes in the BCC crystal surface layer under short-term high-energy external impact. In book: Materials in external fields. Second, revised and supplemented edition. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University, 2022. P. 145–155.
2. Gostevskaya A.N., Markidonov A.V. Modeling of structural changes in metals under high-intensity external action. In book: Materials in external fields: proceedings of the 11th International online symposium, Novokuznetsk, 15–16 February 2022 г. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University, 2022. P. 55 – 57.
3. Явтушенко Т.О., Кадочников А.С., Новиков С.Г., Беринцев А.В., Столяров Д.А. Экспериментальное исследование процесса структурирования поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами высокой мощности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 4 (5). С. 1033–1037.
4. Kuo J.-K., Huang P.-H., Chien S.-K., Huang K.-Y., Chen K.-T. Molecular dynamics simulations of crater formation induced by laser ablation on the surface of α -Fe substrate // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 167. Article 03011.
5. Gong X.-F., Yang G.-X., Li P., Wang Y., Ning X.-J. Molecular dynamics simulation of pulsed laser ablation // International Journal of Modern Physics B. 2011. Vol. 25. No. 4. P. 543–550.
6. Cheng C., Wu A.Q., Xu X. Molecular dynamics simulation of ultrafast laser ablation of fused silica // Journal of Physics: Conference Series. 2007. Vol. 59. P. 100–104.
7. Mendeleev M.I., Han S., Srolovitz D.J., Ackland G.J., Sun D.Y., Asta M. Development of new interatomic potentials appropriate for crystalline and liquid iron // Philosophical Magazine. 2003. Vol. 83. No. 35. P. 3977–3994.
8. Stukowski A. Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO – the open visualization tool // Modelling and Simulation Materials Science and Engineering. 2010. Vol. 18. Article 015012.
9. Рыкалкин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник. Москва: Машиностроение, 1985. 496 с.
10. Stukowski A. Computational analysis methods in atomistic modeling of crystals // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. 2014. Vol. 66. No. 3. P. 399–407.
11. Орлов В.Л., Малышкина А.Г. Образование нанометровых упорядоченных структур радиационных пор // Известия вузов. Физика. 2003. Т. 46. № 2. С. 31–35.
12. Маркидонов А.В., Старostenkov М.Д. О возможности гомогенного зарождения поры в зернограничной области под воздействи-

ем ударных послекаскадных волн // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Математическое моделирование физических процессов». 2016. № 3. С. 37–46.

13. Маркидонов А.В., Старостенков М.Д., Павловская Е.П. Влияние послекаскадных ударных волн на процессы укрупнения вакансионных пор // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2012. Т. 9. № 4-2. С. 694–701.
14. Маркидонов А.В., Старостенков М.Д., Захаров П.В. Рост малых вакансионных скоплений, инициированный послекаскадными ударными волнами // Письма о материалах. 2012. Т. 2. № 2. С. 111–114.
15. Morris J.R., Song X. The anisotropic free energy of the Lennard-Jones crystal-melt interface // Journal of Chemical Physics. 2003. Vol. 119. No. 7. P. 3920–3925.
16. Sun D.Y., Asta M., Hoyt J.J., Mendeleev M.I., Srolovitz D.J. Crystal-melt interfacial free energies in metals: fcc versus bcc // Physical Review B. 2004. Vol. 69. No. 2. Article 020102.
17. Liu J., Davidchack R.L., Dong H.B. Molecular dynamics calculation of solid-liquid interfacial free energy and its anisotropy during iron solidification // Computational Materials Science. 2013. Vol. 74. P. 92–100.
18. Ackland G.J., Jones A.P. Applications of local crystal structure measures in experiment and simulation // Physical Review B. 2006. Vol. 73. No. 5. Article 054104.
4. Kuo J.-K., Huang P.-H., Chien S.-K., Huang K.-Y., Chen K.-T. Molecular dynamics simulations of crater formation induced by laser ablation on the surface of α -Fe substrate. *MATEC Web of Conferences*. 2018, vol. 167, article 03011.
5. Gong X.-F., Yang G.-X., Li P., Wang Y., Ning X.-J. Molecular dynamics simulation of pulsed laser ablation. *International Journal of Modern Physics B*. 2011, vol. 25, no. 4, pp. 543–550.
6. Cheng C., Wu A.Q., Xu X. Molecular dynamics simulation of ultrafast laser ablation of fused silica. *Journal of Physics: Conference Series*. 2007, vol. 59, pp. 100–104.
7. Mendeleev M.I., Han S., Srolovitz D.J., Ackland G.J., Sun D.Y., Asta M. Development of new interatomic potentials appropriate for crystalline and liquid iron. *Philosophical Magazine*. 2003, vol. 83, no. 35, pp. 3977–3994.
8. Stukowski A. Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO – the open visualization tool. *Modelling and Simulation Materials Science and Engineering*. 2010, vol. 18, article 015012.
9. Rykalkin N.N., Uglov A.A., Zuev I.V., Kokora A.N. Laser and electron beam processing of materials: reference. Moscow: Mashinostroyeniye, 1985, 496 p. (In Russ.).
10. Stukowski A. Computational analysis methods in atomistic modeling of crystals. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 2014, vol. 66, no. 3, pp. 399–407.
11. Orlov V.L., Malyshkina A.G. Formation of nanometer ordered structures of radiation pores. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2003, vol. 46, no. 2, pp. 31–35. (In Russ.).
12. Markidonov A.V., Starostenkov M.D. On the possibility of homogeneous pore generation in the grain boundary region under the influence of shock post-cascade waves. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya «Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov»*. 2016, no. 3, pp. 37–46. (In Russ.).
13. Markidonov A.V., Starostenkov M.D., Pavlovskaya E.P. The influence of post-cascade shock waves on the processes of enlargement of vacancy pores. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2012, vol. 9, no. 4-2, pp. 694–701. (In Russ.).
14. Markidonov A.V., Starostenkov M.D., Zakharov P.V. Growth of small vacancy clusters initiated by post-cascade shock waves. *Pis'ma o materialakh*. 2012, vol. 2, no. 2, pp. 111–114. (In Russ.).
15. Morris J.R., Song X. The anisotropic free energy of the Lennard-Jones crystal-melt interface. *Journal of Chemical Physics*. 2003, vol. 119, no. 7, pp. 3920–3925.

REFERENCES

1. Markidonov A.V., Starostenkov M.D., Gostevskaya A.N. et al. *Molecular dynamics study of structural changes in the BCC crystal surface layer under short-term high-energy external impact*. In: *Materials in external fields. Second, revised and supplemented edition*. Novokuznetsk: ITs Sibirskii gosudarstvennyi industrial'nyi universitet, 2022, pp. 145–155.
2. Gostevskaya A.N., Markidonov A.V. *Modeling of structural changes in metals under high-intensity external action*. In: *Materials in external fields: proceedings of the 11th International online symposium, Novokuznetsk, February 15-16, 2022*. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University, 2022, pp. 55 – 57.
3. Yavtushenko T.O., Kadochnikov A.S., Novikov S.G., Berintsev A.V., Sto-lyarov D.A. Experimental study of the process of structuring a metal surface by femtosecond laser pulses of high power. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2013, vol. 15, no. 4 (5), pp. 1033–1037. (In Russ.).

16. Sun D.Y., Asta M., Hoyt J.J., Mendeleev M.I., Srolovitz D.J. Crystal-melt interfacial free energies in metals: fcc versus bcc. *Physical Review B*. 2004, vol. 69, no. 2, article 020102.
17. Liu J., Davidchack R.L., Dong H.B. Molecular dynamics calculation of solid-liquid interfacial free energy and its anisotropy during iron solidification. *Computational Materials Science*. 2013, vol. 74, pp. 92–100.
18. Ackland G.J., Jones A.P. Applications of local crystal structure measures in experiment and simulation. *Physical Review B*. 2006, vol. 73, no. 5, article 054104.

Сведения об авторах

Анастасия Николаевна Гостевская, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображения, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: gostevskaya_an@mail.ru

ORCID: 0000-0002-7328-5444

Артем Владимирович Маркидонов, д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой информатики и вычислительной техники им. В.К. Буторина, Кузбасский гуманитарно-педагогический институт Кемеровского государственного университета; профессор кафедры

прикладной математики и информатики, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: markidonov_artem@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4566-528X

Information about the authors

Anastasia N. Gostevskaya, postgraduate student of the Department of Natural Sciences named after professor V.M. Finkelya, Researcher, Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

E-mail: gostevskaya_an@mail.ru

ORCID: 0000-0002-7328-5444

Artem V. Markidonov, Dr. Sci. (Phys.-math.), Associate Professor, Head of the Department of IVT im. Butorina, Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute of Kemerovo State University; Professor of the Department of Applied Mathematics and Computer Science, Siberian State Industrial University

E-mail: markidonov_artem@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4566-528X

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 24.08.2022

После доработки 08.09.2022

Принята к публикации 17.10.2022

Received 24.08.2022

Revised 08.09.2022

Accepted 17.10.2022

Оригинальная статья

УДК 004.853

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-19-26

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОБУЧАЮЩАЯ ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА

© 2022 г. В. Н. Буинцев, И. А. Рыбенко, Е. А. Мартусевич, Д. Ю. Белавенцева

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Групповое обучение в общем среднем образовании, средних и высших специальных учебных заведениях предполагает передачу знаний и освоение умений с ориентацией на «среднего» по способностям обучаемого. При этом достижение такого уровня обученности как навыки в принципе невозможно. Уровень навыков требует, как правило, индивидуального обучения с применением разного рода обучающе-тренирующих систем совместно с методикой итеративного научения. Пандемия коронавируса (COVID-19) и переход на дистанционную форму обучения активизировал разработку информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) обучения без присутствия учителя. Все это обуславливает актуальность разработки автоматической системы обучения на базе экспертной системы, обеспечивающей при отсутствии преподавателя достижение максимального для каждого обучаемого необходимого уровня обученности в зависимости от его интеллекта. Предложена структура автоматической обучающей системы, обеспечивающей усвоение учебного материала до заданного уровня обученности без участия преподавателя. На примере использования такой системы для обучения операторов дуговой сталеплавильной печи (ДСП) показана работа элементов системы: модели – имитатора объекта, блоков анализа ошибок обучаемого, синтеза обучающей информации, а также функций баз данных и знаний. Отдельно рассмотрены вопросы получения и формализации знаний экспертов (учителей). Приведены примеры формирования фреймов знаний для обучения сталеваров ДСП. Для обучения процессу шихтовки электросталеплавильного процесса необходим 81 фрейм информации, обеспечивающий учебные комментарии для всевозможных ошибок обучаемых.

Ключевые слова: обучение, дистанционное обучение, обучение без учителя, автоматическая система обучения, экспертная система, формализация знаний

Для цитирования: Буинцев В.Н., Рыбенко И.А., Мартусевич Е.А., Белавенцева Д.Ю. Автоматическая обучающая экспертная система // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 19 – 26. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-19-26](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-19-26)

Original article

AUTOMATIC TRAINING EXPERT SYSTEM

© 2022 V. N. Buintsev, I. A. Rybenko, E. A. Martusevich, D. Y. Belaventseva

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. Group training in general secondary education, secondary and higher specialized educational institutions involves the transfer of knowledge and the development of skills, with an orientation to the "average" according to the abilities of the student. At the same time, achieving such a level of training as "skills" is, in principle, impossible. The level of skills requires, as a rule, individual training with the use of various kinds of teaching and training systems together with the method of iterative learning. The coronavirus pandemic (COVID-19) and the transition to distance learning have intensified the development of information and

communication technologies (ICT) for teaching without the presence of a teacher. All this determines the relevance of the development of an automatic training system based on an expert system that ensures, in the absence of a teacher, the achievement of the maximum for each student, depending on his intelligence, the required level of training. In this paper, the structure of an automatic learning system is proposed, which ensures the assimilation of educational material to a given level of learning without the participation of a teacher. Using the example of using such a system for training operators of an arc steelmaking furnace, the work of the system elements is shown: the object simulator model, the trainee error analysis blocks, the synthesis of training information, as well as database and knowledge functions. The issues of obtaining and formalizing the knowledge of expert teachers are considered separately. Examples of the formation of knowledge frames for the training of chipboard steelworkers are given. For example, to teach the process of mixing an electric steelmaking process, 81 frames of information are needed, providing educational comments for all kinds of mistakes of the trainees. Conclusions were drawn based on the results of the work.

Keywords: learning, distance learning, teaching without a teacher, automatic learning system, expert system, knowledge formalization

For citation: Buintsev V.N., Rybenko I.A., Martusevich E.A., Belaventseva D.Y. Automatic training expert system. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4 (42), pp. 19 – 26. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-19-26](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-19-26)

Введение

В настоящее время автоматизированное приобретение знаний и умений получило широкое распространение в связи с развитием IT-индустрии, а также в результате новых прикладных достижений в области программно-информационных разработок, определяющих современное развитие различных отраслей жизнедеятельности общества. Развитие современных IT-технологий открывает новые возможности в проектировании и высокоуровневой реализации современных программных комплексов, предназначенных для организации обучения с использованием элементов искусственного интеллекта [1].

Как известно из работы [2], имеется три уровня обученности: знания, умения и навыки. Уровень знания – когда обучаемый может воспроизвести ранее полученные знания; уровень умения – когда обучаемый умеет решать практические задачи с использованием ранее полученных знаний; уровень навыков – когда обучаемый решает практические задачи «автоматически», то есть не задумываясь.

Существующая в РФ система образования, как в школе, так в средних и высших профессиональных учебных организациях максимально доводит обучаемых до уровня умений. Уровень навыков требует, как правило, индивидуального обучения с применением разного рода обучающе-тренирующих систем совместно с методикой итеративного научения [3]. Для управления процессом обучения в тренирующей системе должен принимать участие опытный тренер-учитель (наставник), как правило, крайне дефицитная должность. Для исключения «человеческого» фактора и автоматизации процесса управления обучением на компьютерных тренажерах удобнее всего использовать экспертную систему с использованием концепции программированного обучения.

В 1954 г. Б. Скиннер (США) сделал доклад [4], где изложил концепцию программированного обучения, которая заключается в самостоятельном и индивидуальном усвоении знаний и умений по обучающей программе с помощью традиционных учебных средств, а также вычислительных устройств, в том числе компьютера. В традиционном варианте обучения обучающийся обычно читает, а затем воспроизводит текст учебника, при этом работа по воспроизведению полученных знаний почти никак не управляется и не регламентируется. Идея программированного обучения состоит в управлении учебными действиями ученика с помощью обучающей программы – ключевого понятия системы программированного обучения, согласно которой обучение идет по принципу «стимул – реакция – подкрепление», то есть ученику предъявляется материал, который стимулирует его проводить определенные познавательные действия с этим материалом, и эти действия тут же получают оценку или комментарий наставника. Также принципы программированного обучения приобрели большое распространение при получении навыков управления сложными технологическими процессами на компьютерных тренажерах [5].

Пандемия коронавируса (COVID-19) и переход на дистанционную форму обучения активизировал разработку информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) обучения без присутствия учителя. В этом случае чаще всего используются традиционные педагогические технологии и методы [6]: передача обучаемому текстовой или видеоинформации о новой учебной теме, выдача общих рекомендаций на практическое самостоятельное решение ряда задач, которые впоследствии можно проверить дистанционно. В дополнение к этому часто используется

компьютерное тестирование обучаемого по ранее пройденной теме.

Для реализации этой технологии разработана масса компьютерных программ разного качества и назначения. Однако практическое внедрение этих программ привело к резкому увеличению рутинной нагрузки на преподавателей-тьюторов и снижению уровня обученности учеников. При дистанционном обучении человек выбирает для себя свой ритм, темп и время обучения. Индивидуализация обучения требует развитой автоматизированной системы «интеллектуальных» подсказок, помощи, консультаций в течение всего периода дистанционного обучения, а это возможно только с использованием экспертных систем на основе различных алгоритмов обработки данных и искусственного интеллекта [7]. Анализ результатов исследований применения отечественных экспертных систем в области дистанционного образования показал, что рассматриваемое направление является очень актуальным, но до сих пор остается малоразвитым и малоизученным. Большая часть работ в этой области направлена на разработку систем контроля качества обучения и оценке уровня обученности [1, 8 – 10].

Обучающая экспертная система

Изначально экспертные системы разрабатывали в качестве систематизирующего хранилища знаний, накопленных многими специалистами в той или иной предметной области [11, 12]. Пионер в области экспертных систем Е.А. Фейгенбаум утверждает следующее: экспертная система – это интеллектуальная компьютерная программа, которая использует знания и процедуры вывода для решения проблем, которые настолько сложны, что для их решения требуется значительный опыт человека [13, 14]. Знания, необходимые для работы на таком уровне, плюс используемые процедуры вывода можно рассматривать как модель экспертных знаний лучших практиков в этой области [15]. Экспертные системы в основном предназначались для принятия решений в управлении сложными, плохо формализуемыми системами [16, 17], однако в восьмидесятые годы прошлого столетия они стали использоваться в обучающих и тренирующих системах [7, 18].

Разработка функционирующей экспертной системы применительно к задачам обучения связана с решением нескольких взаимосвязанных проблем:

– выбор дидактической концепции и адаптация ее к экспертной системе;

– разработка автоматической системы контроля за деятельностью обучаемого и распознавание его ошибок при решении учебных задач;

– разработка системы сбора и формализации знаний учителя-эксперта;

– синтез объяснительной системы, формирующей учебные комментарии по ходу обучения.

Рассмотрим структуру обучающей экспертной системы с использованием тренажера «Сталева ДСП» [19]. Обучение на тренажере происходит по схеме, представленной на рис. 1:

1 – обучаемый на тренажере выполняет задания инструктора (например, выплавить заданную марку стали, провести какой-то период плавки и т.д.);

2 – тренажер моделирует ход технологического процесса по введенным обучаемым управляющим воздействиям и выдает результат;

3 – инструктор и комментарии тренажера позволяют обучаемому обнаружить и исправить сделанные ошибки.

Стоит отметить, что наиболее ответственными и сложными при управлении сталеплавильными процессами являются интеллектуальнее навыки, связанные с оценкой состояния плавки и своевременным принятием решений по выбору правильных управляющих воздействий. Менее сложными являются моторные навыки. Поэтому обучение на тренажере должно основываться на достаточно глубоком знании теории и действующей технологии процесса, а также включать параллельное освоение прикладных теоретических вопросов.

При разработке автоматической обучающей экспертной системы (АОЭС) структура дополняется блоком распознавания ошибок обучаемых, базой знаний экспертов (наставников) и блоком формирования подсказок. Структура такой системы приведена на рис. 2.

Обучаемый оператор, как и в тренажере, осуществляет обучение методом проб и ошибок на модели технологического процесса. Задание на обучение он получает из базы данных через блок синтеза задач обучения.

Параллельно с обучаемым работает блок расчета оптимальных управляющих воздействий (блок «Оптимальный регулятор»). В блоке «Анализатор ошибок обучаемого» оптимальное решение сравнивается с выработанным обучаемым. Рассогласование оптимальных и учебных решений по управлению ΔX анализируется по правилам, хранимым в базе знаний, а затем с помощью блока «Синтез обучающей информации» преобразуется в подсказки обучаемому.

Рассмотрим подробнее работу этих блоков. В базу данных заносится заранее подготовленная программа обучения, представляющая собой

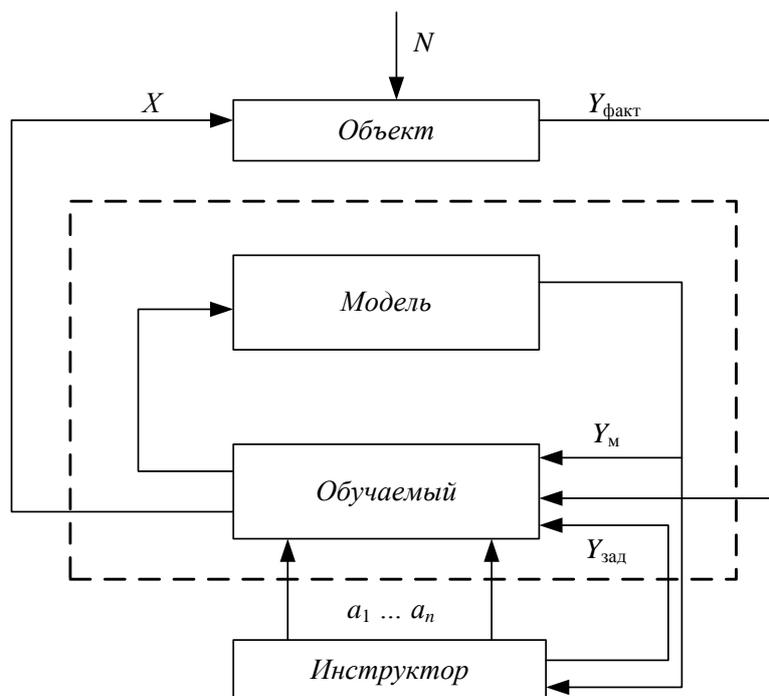


Рис. 1. Общая схема обучения на тренажере:

X и N – векторы входных управляющих параметров и помех; $Y_{\text{факт}}$, $Y_{\text{м}}$ и $Y_{\text{зад}}$ – фактическое, модельное и заданное значения выходного параметра; $a_1 \dots a_n$ – набор учебных комментариев

Fig. 1. The general scheme of training on the simulator:

X and N – vectors of input control parameters and interference; $Y_{\text{факт}}$, $Y_{\text{м}}$ and $Y_{\text{зад}}$ – actual, model and preset values of the output parameter; $a_1 \dots a_n$ – a set of training comments

упорядоченную от простого к сложному группу заданий, например по шихтовке стали различных марок. Через блок «Синтез задачи обучения» заданные значения технологических параметров передаются обучаемому, эксперту (если он есть) и в оптимальный регулятор, который на основе математических методов оптимизации рассчитывает управляющие параметры $X_{\text{оп}}$, обеспечивающие безусловное выполнение задания. Обучаемый, используя теоретические знания, свой опыт, вырабатывает собственные управляющие параметры и реализует их на модели технологического процесса. В блоке «Анализ ошибок обучения» проводится сравнение оптимальных управлений $X_{\text{оп}}$ с управлениями обучаемого $X_{\text{оп}}$ и вычисляется расхождение ΔX .

На основе этого анализа в блоке «Синтез обучающей информации» с использованием системы правил, хранящихся в базе знаний или комментариев эксперта, формируется учебная информация, которая доводится до обучаемого. В случае если имеются ошибки, обучаемому выдаются рекомендации по их устранению, а если задание выполнено правильно, то обучаемому передается соответствующее сообщение и выдается новое задание согласно заложенной программе обучения хранящейся в базе данных.

Отдельно нужно рассмотреть роль эксперта (наставника) в этой схеме (рис. 2). Эксперт получает ту же информацию, что и обучаемый, а

также результаты его учебной деятельности и оптимальные (наилучшие) управляющие воздействия от оптимального регулятора. Эксперт, анализируя работу обучаемого, формирует учебный комментарий, управляя и направляя процесс обучения. В таком режиме система работает как обычный тренажер с тренером-учителем. На этом этапе обучения базы знаний подобные учебные комментарии формализуются в блоке «Обучение (БЗ)» и используются при работе системы в автоматическом режиме.

Основной трудностью при разработке АОЭС является процесс сбора и формализации знаний эксперта (наставника-учителя) для последующего их хранения в базе знаний и использования в процессе автоматического научения. На этапе сбора и регистрации знаний возникают сложности при разработке системы (процедуры) выявления знаний эксперта и их фиксации на носителях информации.

Для выявления знаний можно использовать несколько приемов. Например, путем наблюдения за наставником во время его обычной работы с обучающимися на тренажере. При этом проводится запись учебных ситуаций, возникающих в процессе действий обучаемого и реакции тренера на них.

Выявить знания эксперта можно с помощью специально подготовленного анкетирования, в котором фиксируются ответы тренера и его ре-

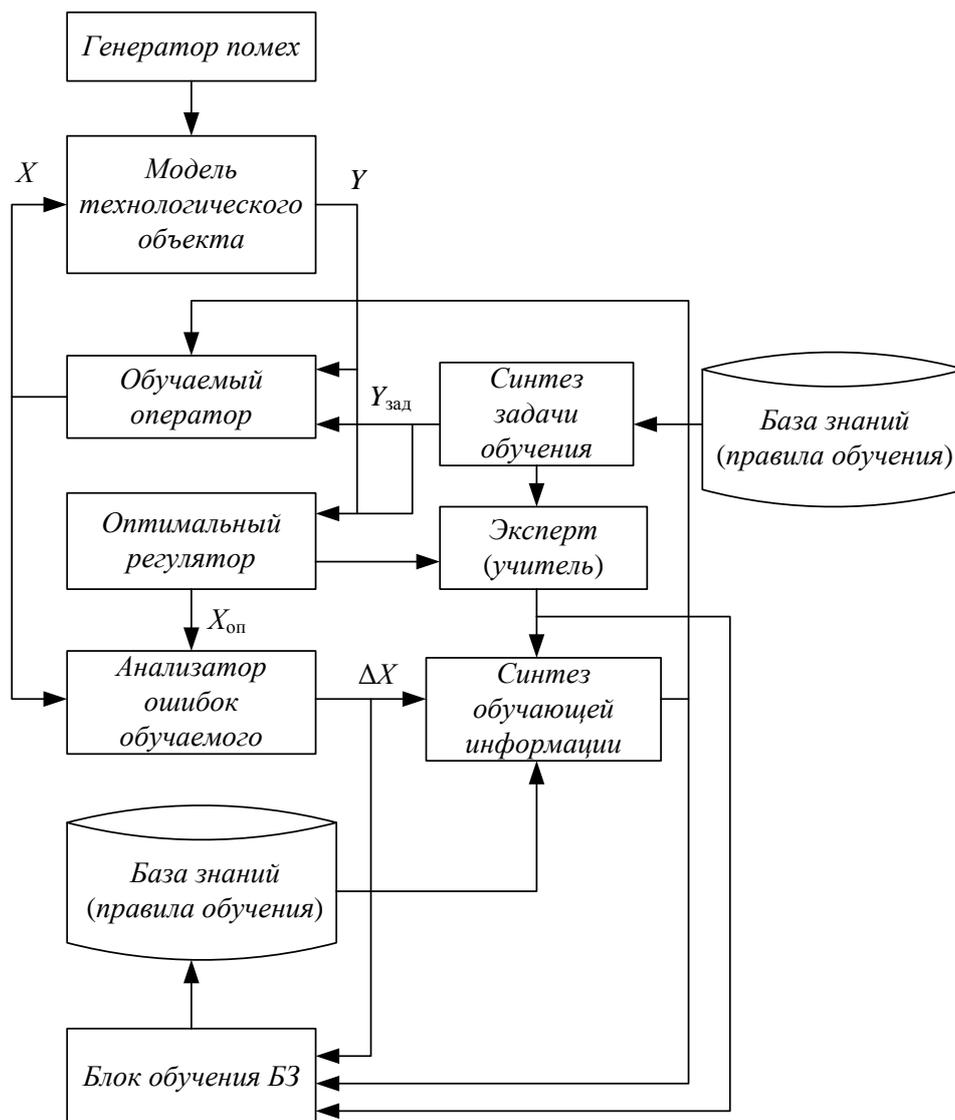


Рис. 2. Схема АОС на базе экспертной системы:

X и $X_{оп}$ – векторы входных управляющих параметров, сформированные обучаемым и оптимизатором;
 ΔX – ошибка обучаемого при выборе управлений; $Y_{зад}$ и Y – заданные фактические значения выходного параметра

Fig.2. AOS scheme based on an expert system:

X и $X_{оп}$ – are vectors of input control parameters formed by the trainee and the optimizer; ΔX – is the error of the trainee when choosing controls; $Y_{зад}$ и Y – are the specified actual values of the output parameter

акции на заранее подготовленные вопросы на ту или иную учебную ситуацию.

Наличие тренажера позволяет получить знания эксперта-учителя путем проведения натурного эксперимента, когда на тренажере по заранее подготовленному плану формируется учебная ситуация и записывается реакция эксперта на нее. Этот способ в какой-то степени объединяет первые два.

Независимо от способа получения знаний всегда встает вопрос о формальной их записи, пригодной для хранения, переработки и выдачи пользователю на понятном ему языке. Обучение профессиональным навыкам на тренажере несколько упрощает процесс управления обучением, так как первой и главной целью обучения является попадание в заданные значения не-

скольких выходных параметров при одновременном выполнении ограничений по входным параметрам, оговоренным технологической инструкцией.

Объем и вид ошибок обучаемого имеют конечное количество и могут быть однозначно логически описаны. В случае шихтовки электроплавки выходными параметрами являются концентрация углерода в расплаве (C), температура металла по расплавлению (T) и основность шлака (B). Каждый из этих параметров в зависимости от стали заданной марки должен соответствовать определенному значению с некоторым допустимым интервалом Δ , попадание в который также считается выполнением задания. Поэтому ошибками обучения считается

Примеры синтеза фреймов знаний Examples of knowledge frame synthesis

Если (логическое высказывание)	То (учебный комментарий)
$C = +1; T = 0; B = 0$	По температуре и основности шлака Вы попали в заданные пределы, но превысили концентрацию углерода в расплаве. Для исправления ошибки нужно уменьшить концентрацию углерода в шихте. Это можно сделать путем снижения расхода кокса или чугуна
$C = -1; T = 0; B = -1$	По температуре Вы попали в заданные пределы, но по основности шлака и концентрации углерода – ниже нижнего предела. Для исправления ошибки нужно увеличить расход кокса и извести
$C = 0; T = +1; B = 0$	По углероду и основности шлака – попадание в задание, а по температуре – перегрев. Для исправления ошибки нужно увеличить массу металлической части шихты

непопадание в допустимый диапазон по каждому из выходных параметров.

Введем логические переменные. Если параметр превышает верхнюю границу диапазона, то обозначим его состояние как +1, если меньше нижней границы, то –1, а в случае попадания в задание – 0.

Общее количество вариантов ошибок управления соответствует всевозможным перестановкам трех переменных на трех уровнях и равно $n = 3^3 = 27$. Каждый из двадцати семи случаев можно записать логическим высказыванием типа $C = \alpha; T = \beta; B = \gamma$, где $\alpha, \beta, \gamma = (\pm 1; 0)$ и каждому из этих случаев соответствует свой учебный комментарий, ранее полученный при обследовании реакций экспертов.

Известно, что фрейм (англ. frame – «каркас» или «рамка») – способ представления знаний в искусственном интеллекте, представляющий собой схему действий в реальной ситуации [20]. Таким образом, пара, логическое высказывание (соответствующий комментарий) является фреймом знаний. Набор из 27 фреймов составляет базу знаний в описываемой системе. В таблице приведен фрагмент из нескольких фреймов базы знаний.

Как видно из приведенных примеров в состав комментариев не входят подсказки о корректирующих воздействиях. В этом случае обучаемому методом проб и ошибок приходится самостоятельно искать эти значения. Однако возможен вариант количественных подсказок. Численные значения корректирующих воздействий можно рассчитать по математической модели технологического процесса и включить в состав комментария. Включать или не включать количественные подсказки в состав комментария определяет программа обучения, которая построена по принципу «От простого – к сложному».

Выводы

В ходе работы обоснована актуальность разработки автоматической системы обучения, в основном предназначенной для дистанционного способа усвоения знаний, получения умений и

навыков. Рассмотрены различные аспекты решения проблемы дистанционного обучения, в том числе с использованием экспертных систем.

Предложена структура автоматической экспертной обучающей системы, описаны функции ее основных узлов и блоков.

На примере АОС «Сталевар ДСП» приведен вариант формализованного представления знаний в виде обучающих фреймов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курейчик В.В., Сороколетов П.В., Щеглов С.Н. Анализ современного состояния автоматизированных систем приобретения и представления знаний // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск. 2008. С. 120–124.
2. Подласый И.П. Педагогика: 100 вопросов – 100 ответов. Москва: ВЛАДОС-пресс, 2004. 365 с.
3. Новиков Д.А. Закономерности итеративного научения. Москва: Институт проблем управления РАН, 1998. 77 с.
4. Fifty Modern Thinkers on Education: From Piaget to the Present / Liora Bresler, David Cooper, Joy Palmer ed. 2001. 320 p.
5. Калашников С.Н., Буинцев В.Н., Мартусевич Е.А. и др. Особенности применения информационных экспертных систем в металлургии на основе интеллектуальной обработки данных и знаний // Инженерный вестник Дона. 2020. № 1. С. 1–10.
6. Бородина Н.А., Подгорская С.В., Анисимова О.С. Информационные технологии в образовании. Донской ГАУ. Персиановский: Донской ГАУ, 2021. 168 с.
7. Edward P.K. A Study of the Uses of Expert Systems in the Training. Old Dominion University. 1990. 30 p.
8. Алиев Р.А., Абдикеев Н.М., Шахназаров М.М. Производственные системы с искусственным интеллектом. Москва: Радио и связь, 2016. 264 с.

9. Персианов В.В., Шайденок Н.А. Использование вычислительной техники в учебном процессе. Москва: Гостехиздат, 2017. 112 с.
10. Информационные технологии в управлении технологическими процессами цветной металлургии / Б.М. Горенский, О.В. Кирякова, С.В. Ченцов, Л.А. Лапина. Красноярск: Изд-во «СФУ». 2012. 148 с.
11. Michie Donald. Knowledge-based Systems. University of IL at Urbana-Champaign, Report 80-1001. 1980. 129 p.
12. Stefik M. The Organization of Expert Systems: A Prescriptive Tutorial, XEROX, Palo Alto Research Centers, VLSI-82-1. 1982, 238 p.
13. Feigenbaum E.A. Knowledge Engineering: The Applied Side of Artificial Intelligence. Computer Science Dept., Memo HPP-80-21, Stanford University. 1980.
14. Feigenbaum E.A. Knowledge Engineering for the 1980's. Computer Science Dept., Stanford University. 1982.
15. Buchanan B.G. Research on Expert Systems. Stanford University Computer Science Department, 1981.
16. Quinlin J.R. Discovering Rules by Induction from Large Collections of Examples in the expert environment in the era of microelectronics Age. In: Edinburgh University Press. 1979. pp. 168–201.
17. Hayes-Roth F. AI the New Wave – A Technical Tutorial for R&D Management. Santa Monica, CA: Rand Corp. 1981.
18. Thomas D. McFarland. Reese Parker Expert systems in education and training, Authors Info & Claims. 1990.
19. Буинцев В.Н., Рыбенко И.А., Мартусевич Е.А., Белавенцева Д.Ю. Автоматизированная обучающая система для дистанционного и самостоятельного обучения операторов сложных технологических процессов. В кн.: Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах. Труды V Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 14 апреля 2021 года. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2021. С. 128–130.
20. Дьяконов В.П., Борисов А.В. Фреймовая модель представления знаний // Основы искусственного интеллекта. 2007. С. 31.
21. Podlasyi I.P. *Pedagogy: 100 questions – 100 answers*. Moscow: VLADOS-press, 2004. 365 p. (In Russ.).
22. Novikov D.A. *Patterns of iterative learning*. Moscow: Institut problem upravleniya RAN, 1998, 77 p. (In Russ.).
23. Liora Bresler, David Cooper, Joy Palmer ed. *Fifty Modern Thinkers on Education: From Piaget to the Present*. 2001. 320 p.
24. Kalashnikov S.N., Buintsev V.N., Martusevich E.A. etc. Features of the use of information expert systems in metallurgy based on intelligent data processing and knowledge. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2020, no. 1, pp. 1–10. (In Russ.).
25. Borodina N.A., Podgorskaya S.V., Anisimova O.S. *Information technologies in education*. Persianovskii: Donskoi GAU, 2021, 168 p. (In Russ.).
26. Edward P.K. *A Study of the Uses of Expert Systems in the Training*. Old Dominion University, 1990. 30 p.
27. Aliev R.A., Abdikeev N.M., Shakhnazarov M.M. *Production systems with artificial intelligence*. Moscow: Radio i svyaz', 2016, 264 p. (In Russ.).
28. Persianov V.V., Shaidenko N.A. *The use of computer technology in the educational process*. Moscow: Gostekhizdat, 2017, 112 p. (In Russ.).
29. Gorenskii B.M., Kiryakova O.V., Chentsov S.V., Lapina L.A. *Information technologies in the management of technological processes of non-ferrous metallurgy*. Krasnoyarsk: Izd-vo «SFU», 2012, 148 p. (In Russ.).
30. Michie Donald. *Knowledge-based Systems*. University of IL at Urbana-Champaign, Report 80-1001. 1980, 129 p.
31. Stefik M. *The Organization of Expert Systems: A Prescriptive Tutorial*, XEROX, Palo Alto Research Centers, VLSI-82-1. 1982, 238 p.
32. Feigenbaum E.A. *Knowledge Engineering: The Applied Side of Artificial Intelligence*. Computer Science Dept., Memo HPP-80-21, Stanford University, 1980.
33. Feigenbaum E.A. Knowledge Engineering for the 1980's. Computer Science Dept., Stanford University. 1982.
34. Buchanan B.G. *Research on Expert Systems*. Stanford University Computer Science Department, 1981.
35. Quinlin J.R. Discovering Rules by Induction from Large Collections of Examples in the expert environment in the era of microelectronics Age. In: *Edinburgh University Press*. 1979, pp. 168–201.

REFERENCES

1. Kureichik V.V., Sorokoletov P.V., Shcheglov S.N. Analysis of the current state of automated systems for acquiring and presenting knowledge. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie*

17. Hayes-Roth F. *AI the New Wave – A Technical Tutorial for R&D Management*. Santa Monica, CA: Rand Corp. 1981.
18. Thomas D. McFarland. *Reese Parker Expert systems in education and training*, Authors Info & Claims. 1990.
19. Buintsev V.N., Rybenko I.A., Martusevich E.A., Belaventseva D.Yu. Automated training system for remote and independent training of operators of complex technological processes. In: *Modeling and high-tech information technologies in technical and socio-economic systems. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference, Novokuznetsk, 14 aprelya 2021 goda*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2021, pp. 128–130. (In Russ.).
20. D'yakonov V. P., Borisov A. V. Frame model of knowledge representation. *Osnovy iskusstvennogo intellekta*. 2007, pp. 31. (In Russ.).

Сведения об авторах

Владимир Николаевич Буинцев, к.т.н., доцент кафедры прикладных информационных технологий, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: buintcev@mail.ru
ORCID: 0000-0003-4487-479X

Инна Анатольевна Рыбенко, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой прикладных информационных технологий и программирования, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: rybenko@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1679-0839

Ефим Александрович Мартусевич, преподаватель кафедры прикладных информационных технологий, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: program.pro666@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-2335-7788

Дарья Юрьевна Белавенцева, аспирант кафедры прикладных информационных технологий, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: dashau@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-7455-5664

Information about the authors

Vladimir N. Buintsev, *Cand. Sci. (Eng.)*, Assist. Professor of the Department of Applied Information Technologies, Siberian State Industrial University
E-mail: buintcev@mail.ru
ORCID: 0000-0003-4487-479X

Inna A. Rybenko, *Dr. Sci. (Eng.)*, Associate Professor, Head of the Department of Applied Information Technologies and Programming, Siberian State Industrial University
E-mail: rybenko@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1679-0839

Efim A. Martusevich, Lecturer of the Department of Applied Information Technologies, Siberian State Industrial University
E-mail: program.pro666@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-2335-7788

Darya U. Belaventseva, Postgraduate Student of the Department of Applied Information Technologies, Siberian State Industrial University
E-mail: dashau@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-7455-5664

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 27.09.2022
После доработки 17.10.2022
Принята к публикации 19.10.2022

Received 27.09.2022
Revised 17.10.2022
Accepted 19.10.2022

Оригинальная статья

УДК 54.062:004.032.26.

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-27-32

**ИССЛЕДОВАНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА КОКСОВАНИЯ
УГЛЕЙ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

© 2022 г. А. Д. Байдалин

АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (Россия, 654043, Кемеровская область – Кузбасс, Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)

Аннотация. На основе компьютерного моделирования и методов машинного обучения был составлен алгоритм подготовки и обучения. Данные взяты из технологических баз и журналов подготовки сырья для производства кокса. После проведения статистического анализа сделаны выводы, которые были приняты на производстве в реализацию. В условиях непрерывного производственного процесса возможность своевременно выявлять дефекты в оборудовании и логистике напрямую влияет на экономический эффект. Любые области в современном мире имеют тенденцию в развитии технологий искусственного интеллекта и машинного обучения. Предприятия Новокузнецка (в том числе металлургические) активно ведут разработку роботов – подсказчиков и систем прогнозирования качества продукции. Искусственный интеллект связан с задачей использования компьютеров для понимания человеческого интеллекта. Это важное направление в построении человекоподобных систем. На рассматриваемом этапе развития машинного обучения стали использовать ряд алгоритмов и программных систем, отличительным свойством которых является то, что они могут решать задачи, так как это делал бы размышляющий над их решением человек. Относительно активно развивающихся систем информационных технологий металлургические процессы живут намного дольше, соответственно поиск решений для объединения знаний и опыта технологов и искусственного интеллекта является трудной, но интересной задачей для поиска возможных проблем на производстве. Выявление внештатных отклонений помогает избежать незапланированных простоев (экономических потерь). Статья является демонстрацией пути, который был пройден для объединения информационных технологий в области искусственного интеллекта и металлургии, а именно получение коксующихся углей на основе технологических показателей коксохимического производства.

Ключевые слова: коксохимическое производство, коксовая батарея, уголь, машинное обучение, большие данные, коксовыткатыватель, нейронные сети, искусственный интеллект

Для цитирования: Байдалин А.Д. Исследование аномальных показателей процесса коксования углей на основе машинного обучения // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 27 – 32. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-27-32](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-27-32)

Original article

**STUDY OF ABNORMAL INDICATORS OF COAL COKING PROCESS ON THE
BASIS OF MACHINE LEARNING**

© 2022 A. D. Baydalin

JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant” (16 Kosmicheskoe Route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654043, Russian Federation)

Abstract. On the basis of computer modeling and machine learning methods, an algorithm for preparing and training data taken from technological databases and journals for the preparation of raw materials for coke production was compiled. After statistical analysis, conclusions were drawn, which were accepted in production for implementation. In a continuous production process, the ability to timely detect defects in

equipment and logistics directly affects the economic effect. Any field in the modern world tends to develop artificial intelligence and machine learning technologies. Novokuznetsk enterprises, including metallurgical ones, are also actively developing robots - prompters and systems for predicting product quality. Artificial intelligence is concerned with the task of using computers to understand human intelligence. This is an important direction in the construction of human-like systems. At this stage in the development of machine learning, a number of algorithms and software systems began to be attributed to it, the distinguishing feature of which is that they can solve some problems in the same way as a person thinking about their solution would do. But with respect to actively developing information technology systems, metallurgical processes live much longer, so finding solutions to combine the knowledge and experience of technologists and artificial intelligence is a difficult but interesting task for finding possible problems in production. Identification of abnormal deviations helps to avoid unplanned downtime, and, accordingly, avoid economic losses. This article is a demonstration of the path that has been taken to combine information technologies in the field of artificial intelligence and metallurgy, namely the production of coking coal, based on the technological indicators of coke production.

Keywords: coke production, coke oven battery, coal, machine learning, big data, coke pusher, neural networks, artificial intelligence

For citation: Baydalin A.D. Study of abnormal indicators of coal coking process on the basis of machine learning. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4 (42), pp. 27 – 32. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-27-32](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-27-32)

Введение

Коксохимическая промышленность – отрасль черной металлургии, занимающаяся переработкой каменного угля методом коксования [1].

Основная продукция коксохимической промышленности: 76 – 78 % каменноугольного кокса; 14 – 15 % коксового газа; 5 – 6 % химических продуктов (бензола, толуола, этилена, различных смол, масел и пр.).

Каменноугольный кокс используется в металлургии в качестве топлива в доменных и литейных производствах. Коксовый газ и другие продукты коксования служат сырьем для химических производств. На их основе выпускают различные полимеры, азотные удобрения, синтетические моющие средства, пестициды, лекарственные препараты и многое другое [2].

Каменноугольный кокс применяют для выплавки чугуна (доменный кокс) как высококачественное бездымное топливо, восстановитель железной руды, разрыхлитель шихтовых материалов. Кокс используют также как ваграночное топливо в литейном производстве (литейный кокс), для бытовых целей (бытовой кокс), в химической и ферросплавной отраслях промышленности (специальные виды кокса).

Основная часть

Доменный кокс должен иметь размеры кусков не менее 25 – 40 мм при ограниченном содержании кусков менее 25 мм (не более 3 %) и более 80 мм. В нижней части доменной печи кокс является единственным шихтовым материалом, находящимся в твердом состоянии, выполняя роль пористой коксовой насадки. Каменноугольный кокс является наиболее распространенным твердым топ-

ливом, используемым для выплавки чугуна в доменных и других шахтных печах.

Литейный кокс по размерам кусков крупнее доменного. Наиболее пригоден продукт, в котором присутствуют куски менее 60 – 80 мм. Главное отличие литейного кокса от доменного – малое содержание серы, которое не должно превышать 1 % (в доменном коксе до 2 %) [3].

При производстве ферросплавов используют мелкий кокс (фракции 10 – 25 мм), при этом в отличие от доменного и литейного производств предпочитают применять продукт с большей реакционной способностью. Требования по прочности к бытовому коксу менее жесткие, чем к доменному и литейному. Во всех производствах лучшее сырье – наиболее прочный малозольный и малосернистый кокс, содержащий небольшое количество мелких фракций. Современное мировое производство каменноугольного кокса составляет около 550 – 650 млн т/год (от 60 до 70 % мирового производства осуществляется в КНР) [4].

Физико-химические свойства каменноугольного кокса определяются его структурой, приближающейся к гексагональной слоистой структуре графита. Структура кокса характеризуется неполной упорядоченностью. Отдельные фрагменты (слои), связанные Ван-дер-Ваальсовыми силами, статистически занимают несколько возможных положений (накладываются один на другой). Наряду с атомами углерода в пространственной решетке кокса (особенно в ее периферийной части) могут располагаться гетероатомы (S, N, O) [5].

Строение и свойства каменноугольного кокса зависят от состава угольной шихты, конечной температуры и скорости нагрева коксуемой массы. С увеличением содержания в шихте газовых и других углей, характеризующихся малой сте-

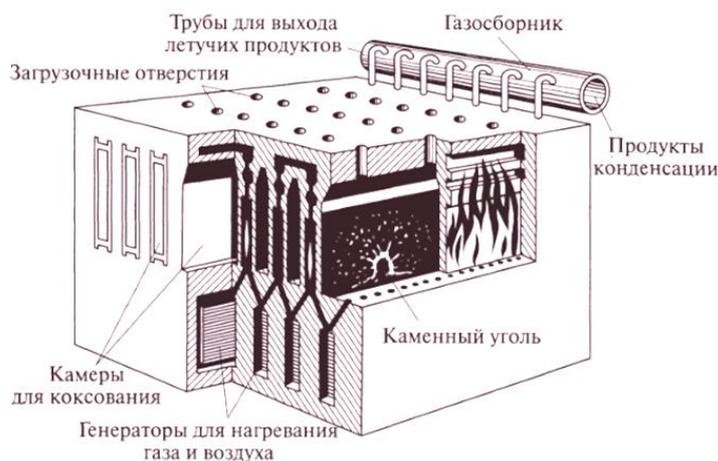


Рис. 1. Схема коксовой батареи
Fig. 1. Scheme of coke oven battery

пению метаморфизма, понижением конечной температуры коксования и уменьшением выдержки при этой температуре, реакционная способность и горючесть получаемого кокса увеличивается. При повышении содержания газовых углей в шихте прочность и средняя крупность кусков кокса уменьшаются, а пористость его возрастает. Повышение конечной температуры коксования способствует увеличению прочности каменноугольного кокса, особенно к истиранию. При удлинении периода коксования и снижении скорости нагрева коксуемой массы средняя крупность кусков кокса увеличивается.

Коксовыталкиватель – это машина коксовой батареи предназначена для выталкивания кокса из печи.

Разрушения в кладке камер коксования, возникающие в процессе эксплуатации и не поддающиеся профилактическим ремонтам, приводят к утяжелению хода коксового пирога при его выдаче из печей; это устанавливается по возрастанию силы тока (ампеража), потребляемого мотором штанги коксовыталкивателя против нормативов, установленных для рассматриваемой конструкции печей (рис. 1).

Для контроля за выполнением графика выдачи ведется запись производственных показателей в реляционную базу данных: заданная норма выдачи, то есть число печей, из которых должен быть выдан кокс за смену; заданное и фактическое время выдачи кокса из каждой печи; масса шихты и время ее загрузки в каждую камеру; температура; позиция штанги и ампераж при выдаче [6].

Тугой ход коксового пирога сокращает срок службы печей, снижает их производительность, усложняет работу цеха. Своевременное выявление причин повышенного ампеража при выдаче кокса из камер является необходимым условием устранения возможности забуривания коксового пирога.

Чтобы выявить причины высоких показателей силы тока, необходимо разработать алго-

ритм, который соберет значения из разных баз данных производства и сделает как статистический анализ, так и графический.

Python — высокоуровневый язык программирования общего назначения с динамической строгой типизацией и автоматическим управлением памятью, ориентированный на повышение производительности разработчика, читаемости кода и его качества, а также на обеспечение переносимости написанных на нем программ [7].

Сначала на языке Python прописывается класс, при вызове которого будет создаваться связь с серверами и выгружаться необходимая информация (рис. 2).

Таким образом сохраняются показания датчиков и времени спекания коксового пирога. Следующим этапом идет подготовка нескольких миллионов записей и около десятка технологических признаков. Большое количество записей обусловлено высокой частотой фиксации состояния коксовой батареи [8].

Также не стоит забывать об одной из самых важных характеристик, от которой зависит качество получаемого продукта: марка угля, которую использовали для производства шихты. Отличие от других типов каменных углей, коксующиеся угли при нагревании без доступа воздуха становятся пластичными и подвергаются спеканию [9].

Коксующиеся угли имеют зольность менее 10 % и относительно низкое содержание серы (менее 3,5 %), выход летучих веществ (V_{daf}) составляет 15 – 37 %. По способности к коксообразованию коксующиеся угли подразделяются на пять категорий (коксовые, жирные, отошенные коксовые, газовые, слабоспекающиеся) [10]. Для получения интересующих данных необходимо выгрузить журналы технологов коксохимического производства, в которых фиксируются марки угля. Они используются для получения более

```

class Dataload:
    def __init__(self, server, db, data_map):
        self.conn = pyodbc.connect(f'Driver=SQL Server;Server={server};Database={db};Trusted_Connection=yes;')
        self.data_map = data_map
        self.data = {}

    def load_table(self, table):
        data = pd.read_sql(f'SELECT * from {table}', con = self.conn)
        return data

    def load(self):
        for param in self.data_map:
            print('='*30)
            print(param)
            print(self.data_map[param])
            self.data[param] = self.load_table(table=self.data_map[param])
            print(self.data[param].columns)
            print(self.data[param].shape)
        return None

    def save(self, path):
        for param in self.data:
            self.data[param].to_feather(f'{path}{param}.feather')

```

Рис. 2. Подключение к базам данных

Fig. 2. Connection to databases

подробных характеристик (процента зольности, влажности, выхода летучих веществ).

Для подготовки данных использовали средства языка Python и дополнительные пакеты программ (библиотеки) [11]. После прохождения основных этапов подготовки данных (замена или удаление выбросов, работа с пропусками данных, объединение большого количества матриц в одну общую, переименование признаков для удобства воспроизведения модели), был проведен так называемый процесс конструирования признаков (feature engineering) [12], а также рассчитан процент участия в коксовании тех или иных марок угля. Как правило, этот процент не меняется, но иногда происходят сбои. В связи с этим одной из задач является выявление таких сбоев [13].

Основные используемые методы при решении этой задачи относятся к разделу машинного обучения. Это класс методов искусственного интеллекта, характерной чертой которых является обучение за счет применения решений множества сходных задач [14]. Для построения таких методов используются средства математической статистики, численных методов, математического анализа, методов оптимизации, теории вероятностей, теории графов, различные техники работы с данными в цифровой форме. Различают два типа обучения [15]:

1 – обучение по прецедентам или индуктивное обучение, основанное на выявлении эмпирических закономерностей в данных;

2 – дедуктивное обучение (предполагает формализацию знаний экспертов и их перенос в компьютер в виде базы знаний).

Дедуктивное обучение принято относить к области экспертных систем, поэтому термины

машинное обучение и обучение по прецедентам можно считать синонимами.

При решении поставленной задачи в равной степени использовали оба типа обучения.

Многие методы индуктивного обучения разрабатывали как альтернативу классическим статистическим подходам. Многие методы тесно связаны с извлечением информации (англ. information extraction, information retrieval), интеллектуальным анализом данных (data mining).

Основу методов data mining составляют всевозможные методы классификации, моделирования и прогнозирования, основанные на применении деревьев решений, искусственных нейронных сетей, генетических алгоритмов, эволюционного программирования, ассоциативной памяти, нечеткой логики [16]. К методам data mining нередко относят статистические методы (дескриптивный, корреляционный и регрессионный, факторный, дисперсионный, компонентный, дискриминантный анализы, анализы временных рядов, выживаемости, связей). Такие методы предполагают некоторые априорные представления об анализируемых данных, что несколько расходится с целями data mining (обнаружение ранее неизвестных нетривиальных и практически полезных знаний) [17].

После выполнения всех вышеизложенных действий была получена следующая таблица (рис. 3, дата и время удалены для соблюдения правил безопасности предприятия).

На выходе получили таблицу (рис. 4) с размерами 66228 записи и 38 признаков. Для принятия каких-либо решений стоит также обратиться к статистике и рассчитать медианы, средние, максимальные и минимальные значе-

amper	position	full_time_in_minutes	temp_left	temp_right	концентрат	к кхп	кс кхп	ос кхп	флото-конц-т	...	A, %	Апл, %	V, %	S, %	X, мм	Y, мм	сит 6	сит 3-6
131.0	5.0	1113.0	1300.0	811.3	0	4	19.1	0	17	...	9	9.0	24.7	0.40	36.0	16.0	8.9	11.9
121.0	31.0	1113.0	1300.0	811.3	0	4	19.1	0	17	...	9	9.0	24.7	0.40	36.0	16.0	8.9	11.9
98.0	74.0	1113.0	1300.0	811.3	0	4	19.1	0	17	...	9	9.0	24.7	0.40	36.0	16.0	8.9	11.9
96.0	119.0	1113.0	1300.0	811.3	0	4	19.1	0	17	...	9	9.0	24.7	0.40	36.0	16.0	8.9	11.9
97.0	211.0	1113.0	1300.0	811.3	0	4	19.1	0	17	...	9	9.0	24.7	0.40	36.0	16.0	8.9	11.9

Рис. 3. Производственные характеристики
Fig. 3. Production characteristics

ния. Удобным отображением является график box-plot («ящик с усами») [18].

Необходимо обратить внимание, что большая часть записей лежит в диапазоне от 100 до 120 А. Следовательно для решения поставленной задачи необходимо отфильтровать значения в нормальном диапазоне от завышенных. После этого следует проанализировать характеристики угля и показатели коксовой батареи [19].

После проведения всех манипуляций с данными было обращено внимание на следующий важный аспект: примерно 40 % всех аномалий приходились на один месяц в году. Были подняты все журналы с записями технологов и выяснилось, что это происходило после добавления угля одной определенной шахты. После полученных результатов все выводы были переданы компетентным сотрудникам углеподготовительного цеха [20].

Выводы

Результатом объединения усилий технологов коксохимического производства и современных

методов обработки данных можно исследовать весь процесс изготовления продукции и находить нетривиальные проблемы в работе предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н. и др. *Металлургия чугуна* / под ред. Ю.С. Юсфина. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: ИКЦ «Академкнига», 2004. 774 с.
2. *Начала металлургии* / под ред. В. И. Коротича. Екатеринбург: УГТУ, 2000. 392 с.
3. Vasant Dhar. *Data Science and Prediction // Communications of the ACM*. 2013. Vol. 56. No. 12. P. 64–73.
4. Cox David R. Some procedures connected with the logistic qualitative response curve. *Research Papers in Probability and Statistics (Festschrift for J. Neyman)*. London: Wiley, 1966. P. 55–71.
5. Бабарькин Н.Н. *Теория и технология доменного процесса*. Магнитогорск: ИЦ МГТУ, 2009. 257 с.
6. Скляр М.Г. *Интенсификация коксования и качество кокса*. Москва: Металлургия, 1976. 256 с.
7. Журавлев Ю.И., Рязанов В.В., Сенько О.В. *Распознавание. Математические методы. Программная система. Практические применения*. Москва: Фазис, 2006.
8. Загоруйко Н.Г. *Прикладные методы анализа данных и знаний*. Новосибирск: ИМ СО РАН, 1999.
9. *Анализ данных и процессов* / А.А. Барсегян, С. Куприянов, И.И. Холод, М.Д. Тесс, С.И. Елизаров. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2009. 512 с.
10. Кацко И.А., Паклин Н.Б. *Практикум по анализу данных на компьютере*. Москва: КолосС, 2009. 278 с.
11. Бринк Х., Ричардс Д., Феверолф М. *Машинное обучение*. Санкт-Петербург: Питер, 2017. 336 с.

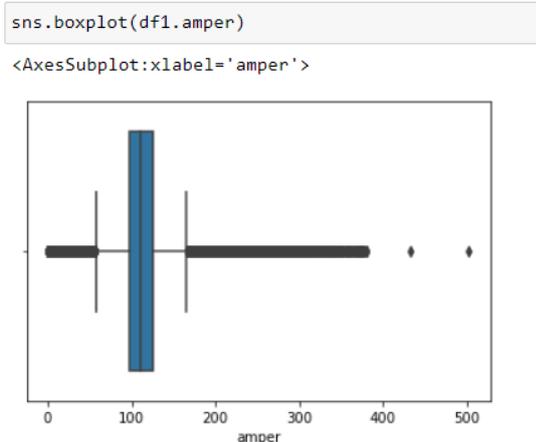


Рис. 4. Вох-plot (сила тока)
Fig. 4. Вох-plot (amperage)

12. Шарден Б., Массарон Л., Боскетти А. Крупномасштабное машинное обучение вместе с Python. Санкт-Петербург: Питер, 2018, 180 с.
13. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer-Verlag, 2009. 746 p.
14. Mitchell T. *Machine Learning*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1997.
15. Vapnik V.N. *Statistical learning theory*. N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1998.
16. Bernhard Schölkopf, Alexander J. Smola *Learning with Kernels. Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond*. MIT Press, Cambridge, MA, 2002.
17. Witten I.H., Frank E. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques (Second Edition)*. Morgan Kaufmann, 2005.
18. Liang Wang, Li Cheng, Guoying Zhao. *Machine Learning for Human Motion Analysis*. IGI Global, 2009. 318 p.
19. Witten I.H., Frank E., Hall M.A. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. Morgan Kaufmann, 2011.
20. Smith F.J. Data Science as An Academic Discipline // *Data Science Journal*. 2006. Vol. 5. No. 19. P. 163–164.
10. Katsko I.A., Paklin N.B. *A workshop on data analysis on a computer*. Moscow: KolosS, 2009. 278 s. (In Russ.).
11. Brink Kh., Richards D., Feverolf M. *Machine learning*. St. Petersburg: Piter, 2017, 336 p. (In Russ.).
12. Sharden B., Massaron L., Boschetti A. *Large-scale machine learning with Python*. St. Petersburg: Piter, 2018, 180 p. (In Russ.).
13. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer-Verlag, 2009. 746 p.
14. Mitchell T. *Machine Learning*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1997.
15. Vapnik V.N. *Statistical learning theory*. N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1998.
16. Bernhard Schölkopf, Alexander J. Smola *Learning with Kernels. Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond*. MIT Press, Cambridge, MA, 2002.
17. Witten I.H., Frank E. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques (Second Edition)*. Morgan Kaufmann, 2005.
18. Liang Wang, Li Cheng, Guoying Zhao. *Machine Learning for Human Motion Analysis*. IGI Global, 2009. 318 p.
19. Witten I.H., Frank E., Hall M.A. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. Morgan Kaufmann, 2011.
20. Smith F.J. Data Science as An Academic Discipline. *Data Science Journal*. 2006, vol. 5, no. 19, pp. 163–164.

REFERENCES

1. Vegman E.F., Zherebin B.N., Pokhvisnev A.N. et al.; Yusfin Yu.S. ed. *Metallurgy of pig iron. 3rd ed., reprint. and add.* Moscow: IKTs «Akademkniga», 2004, 774 p. (In Russ.).
2. Korotich V.I. ed. *The beginnings of metallurgy*. Ekaterinburg: UGTU, 2000, 392 p. (In Russ.).
3. Vasant Dhar. Data Science and Prediction. *Communications of the ACM*. 2013, vol. 56, no. 12, pp. 64–73.
4. Cox David R. *Some procedures connected with the logistic qualitative response curve. Research Papers in Probability and Statistics (Festschrift for J. Neyman)*. London: Wiley, 1966, pp. 55–71.
5. Babarykin N.N. *Theory and technology of the domain process*. Magnitogorsk: ITs MGTU, 2009, 257 p. (In Russ.).
6. Sklyar M.G. *Intensification of coking and coke quality*. Moscow: Metallurgiya, 1976, 256 p. (In Russ.).
7. Zhuravlev Yu.I., Ryazanov V.V., Sen'ko O.V. *Recognition. Mathematical methods. Software system. Practical applications*. Moscow: Fazis, 2006. (In Russ.).
8. Zagoruiko N.G. *Applied methods of data and knowledge analysis*. Novosibirsk: IM SO RAN, 1999. (In Russ.).
9. Barsegyan A.A., Kupriyanov S., Kholod I.I., Tess M.D., Elizarov S.I. *Analysis of data and processes*. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2009, 512 p. (In Russ.).

Сведения об авторах

Александр Дмитриевич Байдалин, ведущий инженер, АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
E-mail: alexander.baydalin@gmail.com

Information about the authors

A.D. Baidalin, traveling engineer, JSC "EVRAZ United West Siberian Metallurgical Combine"
E-mail: alexander.baydalin@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 17.10.2022
 После доработки 21.10.2022
 Принята к публикации 27.10.2022

Received 17.10.2022
 Revised 21.10.2022
 Accepted 27.10.2022

Оригинальная статья

УДК 338.22.021.1

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-33-39

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАФОВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ИНФОРМАЦИИ В СОЦИАЛЬНОЙ СЕТИ**

© 2022 г. Т. В. Кораблина, Н. Б. Бабичева, М. М. Гусев

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Рассмотрен процесс распространения информации среди агентов социальной сети с целью верификации, оценки и точности разработанной модели. Построенная модель социальной сети позволяет проводить исследование распространения информации с учетом психофизиологических особенностей агента. Используемые в модели коэффициенты приема и передачи информации зависят от типа личности и определяются на основе анализа различных объектов деятельности. Источником информации является один из участников эксперимента, которая передается «ближнему кругу» агентов. Реализован программный модуль модели социальной сети. Модуль позволяет проводить исследования распространения информации с учетом психофизиологических особенностей агента. Программный модуль имеет интуитивно понятный интерфейс, позволяет задавать начальные условия эксперимента и выводить полученные результаты в удобном для пользователя виде. Для проверки адекватности работы модели проведена серия натуральных экспериментов. Агенты сети, принявшие участие в эксперименте, до его начала прошли процедуру анкетирования с целью установления их типологического спектра личности с использованием методики многовариантного типирования личности. Показаны результаты заражения информацией участников сети на каждом шаге эксперимента.

Ключевые слова: социальная сеть, графовая модель, агенты сети, этапы эксперимента

Для цитирования: Кораблина Т.В., Бабичева Н.Б., Гусев М.М. Использование графовой модели для описания распространения информации в социальной сети // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 33 – 39. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-33-39](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-33-39)

Original article

**USING A GRAPH MODEL TO DESCRIBE THE DISTRIBUTION OF INFORMATION IN
A SOCIAL NETWORK**

© 2022 T. V. Korablina, N. B. Babicheva, M. M. Gusev

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The process of information dissemination among social network agents for the purpose of verification, evaluation and accuracy of the developed model is considered. The constructed model of the social network makes it possible to conduct a study of the dissemination of information taking into account the psychophysiological characteristics of the agent. The coefficients of receiving and transmitting information used in the model depend on the type of personality and are determined based on the analysis of various objects of activity of each type of personality. The source of information is one of the participants of the experiment, which is transmitted to the "inner circle" of agents. The software module of the social network model is implemented. The module allows you to conduct research on the dissemination of information, taking into account the psychophysiological characteristics of the agent. The software module has an intuitive interface, allows you to set the initial conditions of the experiment and display the results in a user-friendly form. To check the adequacy of the model, a series of field experiments were conducted. The participants who

took part in the experiment, before it began, underwent a questionnaire procedure in order to establish their typological spectrum of personality using the technique of multivariate personality typing. The results of infecting network participants with information at each step of the experiment are shown.

Keywords: social network, graph model, network agents, experiment stages

For citation: Korablina T.V., Babicheva N.B., Gusev M.M. The use of Graph Model to describe the dissemination of information in a social network. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4 (42), pp. 33 – 39. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-33-39](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-33-39)

Введение

В современном мире информация является мощным инструментом влияния на объективную реальность. Поэтому особое внимание наука уделяет изучению механизмов распространения и конкурентирования информации. Существует множество каналов распространения информации, один из которых является социальные сети.

В настоящей работе представлены результаты использования графовой модели для описания распространения информации в социальной сети.

Для описания механизмов передачи и распространения информации в социальной сети в работе [1] предложена графовая модель, описывающая информационное взаимодействие агентов с учетом их психофизиологических особенностей на основе методики многовариантного типирования, а также учитывающая коммуникативные навыки агентов социальной сети, их интересы к получаемой информации, степень их «близости», отражающая личные взаимоотношения агентов, степень их знакомства, частоту коммуникации. Чтобы учесть перечисленные факторы, в графовую модель введены специальные весовые коэффициенты как для вершин графов, так и для ребер. Для проверки адекватности работы модели было решено провести серию натурных экспериментов, а для проведения моделирования с помощью рассматриваемой модели сравнивали результаты моделирования с данными натурных экспериментов, разработан программный модуль в среде Visual Studio.

В эксперименте участвовало 16 человек различного возраста, зарегистрированных в мессенджере WhatsApp и имеющих общих знакомых. Участники, принявшие участие в эксперименте, до его начала прошли процедуру анкетирования с целью установления их типологического спектра личности с использованием методики многовариантного типирования личности [2]. Многовариантное типирование интеллекта направлено на построение многовариантной типологической модели характерных свойств интеллекта конкретной личности. По информации о типологическом спектре интеллекта конкретной личности и о предпочтительных для базисных типов

интеллекта объектах деятельности и функционально-обеспечивающих компонентах деятельности строится тройка профориентирующих индивидуальных спектров [3]:

1 – индивидуальный спектр приемлемости для конкретной личности различных обобщенных объектов деятельности (ЛОД-спектр);

2 – индивидуальный спектр приемлемости для конкретной личности различных функциональных компонентов деятельности (ЛФК-спектр);

3 – индивидуальный спектр приемлемости для конкретной личности различных обеспечивающих компонентов деятельности (ЛОК-спектр).

На основе этих спектров привлеченными экспертами выставляются коэффициенты. Коэффициенты обрабатывали методом индивидуального экспертного опроса. Исходные данные представлены в табл. 1 (где Ив, Эв, С, И, М, Ч, Р и В – интровертный, экстравертный, сенсорный, интуитивный, мыслительный, чувствующий, решающий и воспринимающий коэффициенты).

Общей целью серии экспериментов является апробация модели и оценка ее точности [1], а также определение количества «зараженных» информацией пользователей. Эксперимент считается состоявшимся, в том случае, когда все пользователи социальной сети «заражены» информацией или дальнейшее заражение невозможно. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- провести моделирование процесса распространения информации, когда каждый агент является «источником информации»;
- найти наиболее активного агента;
- провести натурный эксперимент;
- сравнить результаты моделирования с данными натурального эксперимента.

На рис. 1 представлен граф связей между агентами. В соответствии с условиями эксперимента каждый агент являлся «источником информации». Рассмотрим результаты эксперимента для агентов трех типов:

1 – агент с высоким коэффициентом передачи информации (агент 4);

Исходные данные для проведения первого эксперимента
Table 1. Initial data for the first experiment

Агент	Тип	$k_{МТЛпр}$	$k_{МТЛпер}$	Заинтересованность	Количество связей
1	ИвСМВ	0,19	0,94	0,7	3
2	ИвСМР	1,00	0,38	0,6	4
3	ЭвСМВ	0,90	0,44	0,9	4
4	ЭвСМР	0,12	1,00	1,0	3
5	ИвИМР	0,06	0,19	0,1	3
6	ЭвИМР	0,56	0,90	0,4	5
7	ИвИЧВ	0,75	0,50	0,2	5
8	ЭвИМВ	0,31	0,25	0,5	4
9	ИвИМВ	0,25	0,12	0,8	3
10	ЭвИЧВ	0,94	0,62	0,1	7
11	ЭвСЧВ	0,62	0,81	0,6	4
12	ИвСЧР	0,44	0,31	0,8	4
13	ИвСЧВ	0,50	0,75	0,7	3
14	ЭвСЧР	0,81	0,69	0,5	2
15	ЭвИЧР	0,37	0,06	0,4	1
16	ИвИЧР	0,69	0,56	1,0	5

2 – среднестатистический пользователь социальных сетей (агент 13);

3 – агент с большим количеством связей в социальной сети (агент 10).

Пусть источником информации будет выбран агент 4, который имеет высокий коэффициент передачи информации $k_{МТЛпер}$. Выбранному

агенту с высоким коэффициентом передачи информации и небольшим количеством связи понадобилось четыре шага для «заражения» выбранной социальной сети. Шаг – это момент передачи информации пользователю из «ближнего круга». Заражение считается завершенным, так как дальнейшее распространение информации

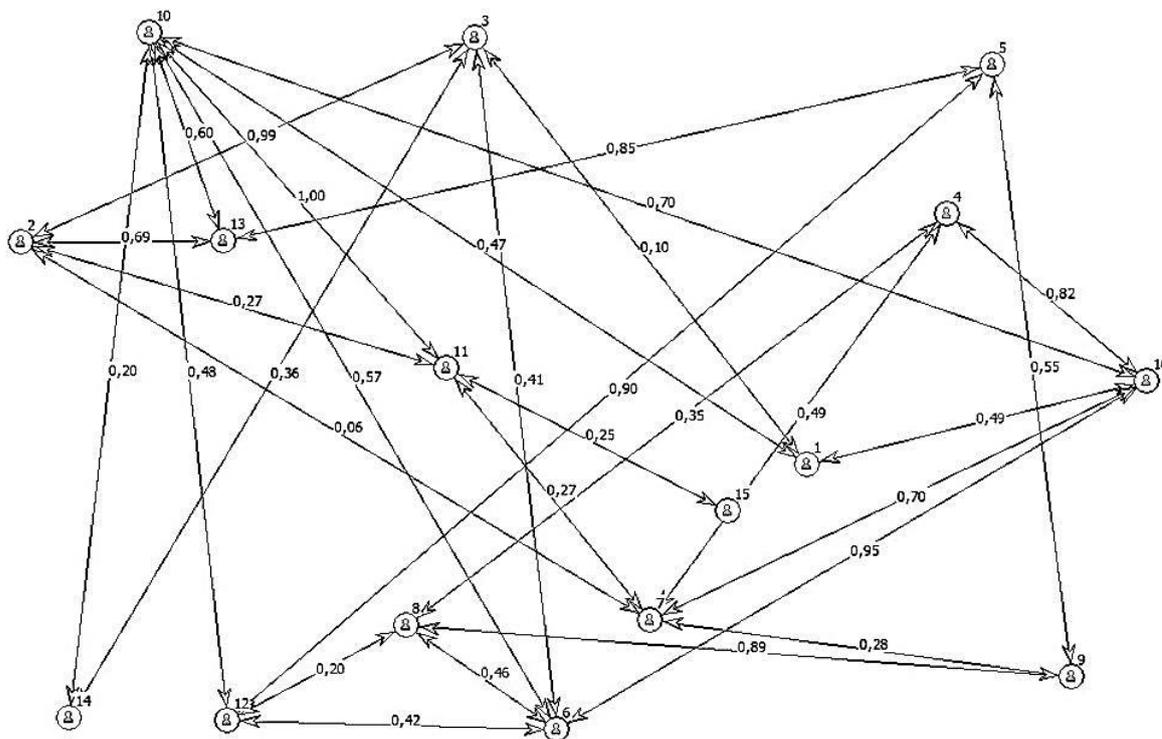


Рис. 1. Граф связей агентов
 Fig. 1. Graph of agent connections

невозможно. Информацией было заражено восемь человек вместе с источником информации. Рассмотрим ситуацию, когда источником информации будет среднестатистический пользователь социальных сетей (агент 13). В результате моделирования заражению подверглось тринадцать агентов за три шага. Далее источником информации был выбран участник с большим количеством связей. Для первичного заражения был выбран агент 10, который имеет семь связей. В результате моделирования заражению подверглось восемь агентов за три шага. Можно сделать вывод, что агенту 10 со средним коэффициентом передачи информации, но с большим количеством связей понадобилось три шага для заражения других агентов.

Для проверки работоспособности и точности модели был проведен натурный эксперимент. На начальном этапе эксперимента был выбран агент с большим количеством связей «друзей» в социальной сети, в котором выбранному агенту 10 была передана ссылка на пост внутри социальной сети. В результате эксперимента в течение короткого промежутка времени на ссылку отреагировало девять агентов. При исследовании модели в качестве критерия оценки ее точности использовали ошибку модели, которая определяется как отношение неправильно распознанных объектов к общему количеству объектов:

$$\varepsilon = \frac{K_{\text{непр}}}{K_{\text{пр}}} 100 \%,$$

где $K_{\text{непр}}$ – количество неправильно распознанных объектов; $K_{\text{пр}}$ – общее количество объектов.

Отклонение от модельных данных на этом этапе составило примерно 12 % (рис. 2).

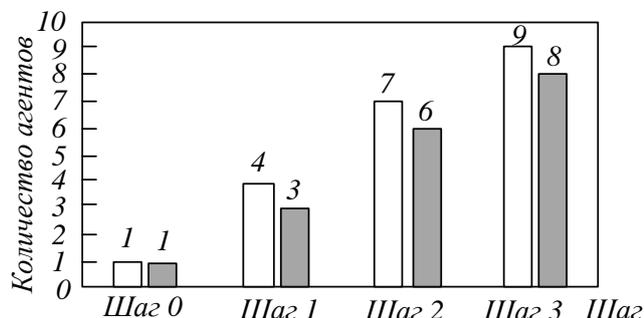


Рис. 2. Сравнение результатов первого эксперимента (белый цвет) и моделирования (серый цвет)
 Fig. 2. Comparison of the results of the first experiment (white) and simulation (gray)

По аналогии были проведены эксперименты, в которых каждого представителя социотипа выбрали источником информации. В табл. 2 представлено количество зараженных им выбранным агентов, коэффициент передачи информации, зависящий от социотипического типа, а также количество шагов, за которые произошло заражение.

Выводы

Как показали натурные эксперименты и результаты моделирования на передачу информации в социальных сетях влияют следующие факторы:

- количество связей агента;
- коэффициент передачи информации, зависящий от социотипа агента;
- коэффициент заинтересованности той или иной информацией.

Также на распространение информации в социальных сетях влияет передача информации «ключевым» пользователям социальных сетей. Под ключевыми пользователями подразумеваются агенты способные передавать информацию большому количеству агентов «ближнего круга».

Поскольку во время проведения моделирования ошибка модели не превысила 9 %, то можно сделать вывод о том, что модель социальной

Т а б л и ц а 2
Результаты моделирования
 Table 2. Simulation results

Агент	$k_{\text{МТЛнепр}}$	Количество зараженных им агентов	Количество шагов
1	0,9375	10	3
2	0,3750	2	3
3	0,4375	3	2
4	1,0000	8	4
5	0,1875	1	1
6	0,8750	10	3
7	0,5000	7	4
8	0,2500	1	1
9	0,1250	1	1
10	0,6250	8	2
11	0,8125	6	3
12	0,3125	1	1
13	0,7500	8	3
14	0,6875	3	2
15	0,0625	1	1
16	0,5625	10	3

сети адекватна и необходимые коэффициенты были подобраны правильно.

Серию экспериментов проводили с целью апробация модели и оценки ее точности. Итоги проведение натурного эксперимента и сравнения результатов с модельным свидетельствуют о том, что модель адекватная. Рассматриваемую модель возможно использовать для исследования процесса распространения информации внутри малых социальных групп.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев М.М., Киселева Т.В., Кораблина Т.В., Пермякова Е.П. Моделирование процесса распространения информации в социальной сети // Системы управления и информационные технологии. 2021. № 1 (83). С. 54–59.
2. Пермякова Е.П., Кораблина Т.В., Киселева Т.В., Гусев М.М. Формирование эффективных проектных команд на МВПРОП-технологии // Системы управления и информационные технологии. 2019. № 3 (77). С. 67–71.
3. Пермякова Е.П., Киселева Т.В. Многовариантное типирование интеллекта с гибкой профориентацией и адаптацией обучения. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2020. 95 с.
4. Rakhmetullina Z., Mukasheva R., Mukhamedova R., Bатырханов В. Mathematical modeling of the interests of social network users. In.: Proceedings – 2021 International Young Engineers Forum in Electrical and Computer Engineering, YEF-ECE 2021. 2021. No. 5. P. 98–103.
5. Батура Т.В. Модели и методы анализа компьютерных социальных сетей // Программные продукты и системы. 2013. № 3.
6. О’Нил К., Шатт Р. Data Science. Инсайдерская информация для новичков. Включая язык R. Санкт-Петербург: Питер, 2019. 368 с.
7. Фетинина Е.П. Человеческая многовариантность в познании и созидании. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2001. 136 с.
8. Пермякова Е.П., Киселева Т.В. Многовариантное типирование интеллекта с гибкой профориентацией и адаптацией обучения. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2020. 95 с.
9. Liu X., He D. Nonlinear dynamic information propagation mathematic modeling and analysis based on microblog social network // Social Network Analysis and Mining. 2020. Vol. 10. No. 1. P. 87.
10. Фетинина Е.П., Кораблина Т.В. Применение теории нечетких множеств в многовариантной технологии профориентации и адаптации обучения // Системы управления и информационные технологии. 2007. № 1 (27). С. 95–101.
11. Wei J., Wu J., Johansson K.H., Cvetkovic V., Molinari M. On the modeling of neural cognition for social network applications. In: 1st Annual IEEE Conference on Control Technology and Applications, CCTA 2017. 2017. P. 1569–1574
12. Пермякова Е.П., Кораблина Т.В., Киселева Т.В., Гусев М.М. Формирование эффективных проектных команд на МВПРОП-технологии // Системы управления и информационные технологии. 2019. № 3 (77). С. 67–71.
13. Zhou Y., Sun X., Zheng Q., Liu T., Zhang B. Analyzing and modeling dynamics of information diffusion in microblogging social network // Journal of Network and Computer Applications. 2017. Vol. 86. P. 92–102.
14. Киселева Т.В., Кораблина Т.В., Гусев М.М., Гусева А.Н. Классификация агентов при распространении информации внутри социальной сети. В кн.: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. AS’2019. Труды XII всеросс. научн.-практ. конф. (с межд. уч.). Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2019. С. 301–302.
15. Мелехин И.В. Управленческо-деятельностный процесс поведения человека при размещении информации в социальных сетях // Актуальные направления научных исследований: от теории к практике. 2016. № 4-1 (10). С. 181–191.
16. Liu X., He D., Liu C. Modeling information dissemination and evolution in time-varying online social network based on thermal diffusion motion // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2018. Vol. 510. P. 456–476
17. Yang D., Chen G., Liao X., Shen H., Cheng X. Modeling the reemergence of information diffusion in social network // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2018. Vol. 490. P. 1493–1500.
18. Целых А.А., Дедюлина М.А. Теоретико-графовые подходы к моделированию актор-сетей в исследованиях науки и технологий // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. № 4 (23). С. 244–259.
19. Gorshkov S., Ilyushin E., Chernysheva A., Goiko V., Namiot D. Using topic modeling for communities clusterization in the vkontakte social network // International Journal of Open Information Technologies. 2021. Vol. 9. No. 5. P. 12–17.
20. Wang C., Jiang C., Tang S., Yang L., Guo Y., Li F. Modeling data dissemination in online social networks: a geographical perspective on bounding network traffic load. In: Proceedings of the

International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc). "MobiHoc 2014 – Proceedings of the 15th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing" 2014. P. 53–62.

REFERENCES

- Gusev M.M., Kiseleva T.V., Korablina T.V., Permyakova E.P. Modeling of the process of information dissemination in a social network. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2021, no. 1 (83), pp. 54–59. (In Russ.).
- Permyakova E.P., Korablina T.V., Kiseleva T.V., Gusev M.M. Formation of effective project teams on MVPRR-technologies. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2019, no. 3 (77), pp. 67–71. (In Russ.).
- Permyakova E.P., Kiseleva T.V. *Multivariate typing of intelligence with flexible career guidance and adaptation of learning*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2020, 95 p. (In Russ.).
- Rakhmetullina Z., Mukasheva R., Mukhamedova R., Bатырханов B. Mathematical modeling of the interests of social network users. In: *Proceedings – 2021 International Young Engineers Forum in Electrical and Computer Engineering, YEF-ECE 2021*. 2021, no. 5. pp. 98–103.
- Batura T.V. Models and methods of analysis of computer social networks. *Programmnye produkty i sistemy*. 2013, no. 3. (In Russ.).
- O’Nil K., Shatt R. *Data Science. Insider information for beginners. Including the language of R*. Sankt-Peterburg: Piter, 2019, 368 p. (In Russ.).
- Fetinina E.P. *Human multivariance in cognition and creation*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2001, 136 p. (In Russ.).
- Permyakova E.P., Kiseleva T.V. *Mathematical modeling and analysis of nonlinear dynamic dissemination of information based on the social network of microblogs*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2020, 95 p. (In Russ.).
- Liu X., He D. Nonlinear dynamic information propagation mathematic modeling and analysis based on microblog social network. *Social Network Analysis and Mining*. 2020, vol. 10, no. 1, pp. 87.
- Fetinina E.P., Korablina T.V. Application of the theory of fuzzy sets in the multivariate technology of career guidance and adaptation of training. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2007, no. 1 (27), pp. 95–101. (In Russ.).
- Wei J., Wu J., Johansson K.H., Cvetkovic V., Molinari M. On the modeling of neural cognition for social network applications. In: *1st Annual IEEE Conference on Control Technology and Applications, CCTA 2017*. 2017, pp. 1569–1574.
- Permyakova E.P., Korablina T.V., Kiseleva T.V., Gusev M.M. Formation of effective project teams on MvPROP-technologies. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2019, no. 3 (77), pp. 67–71. (In Russ.).
- Zhou Y., Sun X., Zheng Q., Liu T., Zhang B. Analyzing and modeling dynamics of information diffusion in microblogging social network. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017, vol. 86, pp. 92–102.
- Kiseleva T.V., Korablina T.V., Gusev M.M., Guseva A.N. Classification of agents in the dissemination of information within a social network. In: *Automation systems in education, science and production. LIKE '2019. Proceedings of the XII All-Russian Scientific.- practical conf. (with intern. uch.)*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2019, pp. 301–302. (In Russ.).
- Melekhin I.V. Managerial-activity process of human behavior when posting information in social networks. *Aktual’nye napravleniya nauchnykh issledovaniy: ot teorii k praktike*. 2016, no. 4-1 (10), pp. 181–191. (In Russ.).
- Liu X., He D., Liu C. Modeling information dissemination and evolution in time-varying online social network based on thermal diffusion motion. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2018, vol. 510, pp. 456–476
- Yang D., Chen G., Liao X., Shen H., Cheng X. Modeling the reemergence of information diffusion in social network. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2018, vol. 490, pp. 1493–1500.
- Tselykh A.A., Dedyulina M.A. Graph-theoretic approaches to modeling actor networks in research of science and technology. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii*. 2018, no. 4 (23), pp. 244–259. (In Russ.).
- Gorshkov S., Ilyushin E., Chernysheva A., Goiko V., Namiot D. Using topic modeling for communities clusterization in the vkontakte social network. *International Journal of Open Information Technologies*. 2021, vol. 9, no. 5, pp. 12–17.
- Wang C., Jiang C., Tang S., Yang L., Guo Y., Li F. Modeling data dissemination in online social networks: a geographical perspective on bounding network traffic load. In: *Proceedings of the International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc). "MobiHoc 2014 – Proceedings of the 15th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing" 2014*. 2014, pp. 53–62.

Сведения об авторах

Татьяна Валентиновна Кораблина, к.т.н., доцент,
Сибирский государственный индустриальный университет
Email: ktv@siu.sibsiu.ru

Надежда Борисовна Бабичева, к.т.н., доцент, Си-
бирский государственный индустриальный универ-
ситет
Email: babicheva_nb@mail.ru

Гусев Максим Михайлович, старший преподава-
тель, Сибирский государственный индустриальный
университет
Email: mx-border@bk.ru

Information about the authors

Tat'jana V. Korablina, Cand. Sci., Asist. Prof., Head of
the Department of Applied Information Technologies and
Programming, Siberian State Industrial University
Email: ktv@siu.sibsiu.ru

Nadezhda B. Babicheva, Cand. Sci., Asist. Prof., Head
of the Department of Applied Information Technologies
and Programming, Siberian State Industrial University
Email: babicheva_nb@mail.ru

Maksim M. Gusev, senior lecturer, Siberian State Indus-
trial University
Email: mx-border@bk.ru

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта инте-
ресов.*

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 02.08.2022

После доработки 22.08.2022

Принята к публикации 24.08.2022

Received 02.08.2022

Revised 22.08.2022

Accepted 24.08.2022

Оригинальная статья

УДК 620.170: 621.791

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-40-46

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ПОВЕРХНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ ШВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

© 2022 г. Р. Е. Крюков, Е. В. Громов, А. Р. Михно, А. В. Жуков

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии исследованы структурно-фазовое состояние и поверхность разрушения металла сварных швов стали 09Г2С, выполненных с применением новых сварочных материалов на основе техногенного сырья металлургического производства (шлака производства силикомарганца и пыли электрофильтров алюминиевого производства). Изготовление сварных соединений выполнялось в лабораторных условиях с использованием сварочной проволоки марки Св-08ГА на оборудовании научно-производственного центра «Сварочные процессы и технологии» ФГБОУ ВО «СибГИУ». С использованием оборудования ФГБУН «Институт сильноточной электроники СО РАН» (г. Томск) выполнен количественный анализ параметров структуры и дислокационной субструктуры металла сварных швов. Оценены вклады скалярной и избыточной плотности дислокаций в прочность металла сварных швов. Установлено, что основной фазой металла исследуемых сварных швов (независимо от введения добавки) является твердый раствор на основе α -железа (феррит, ОЦК кристаллическая решетка, α -фаза). Кроме α -железа в металле сварного шва присутствуют частицы карбида железа (цементит) и (преимущественно в образце без добавки) силицида железа состава Fe₃S. Анализируя электронно-микроскопические изображения структуры металла сварного шва, было замечено, что наиболее узкие контуры формируются у межфазных границ включение – матрица. Такими включениями, выявленными методами просвечивающей электронной микроскопии, могут являться частицы цементита, расположенные в объеме и на границах зерен феррита, и частицы силицида железа округлой (сферической) формы, расположенные в объеме зерен феррита. Выявлено, что включения второй фазы, присутствующие в металле сварного шва, являются концентраторами напряжений и могут быть центрами зарождения микротрещин при механическом воздействии на материал.

Ключевые слова: сварной шов, флюс, шлак силикомарганца, структура, фазовый состав, поверхность разрушения

Для цитирования: Крюков Р.Е., Громов В.Е., Михно А.Р., Жуков А.В. Структурно-фазовое состояние и поверхность разрушения металла сварных швов, выполненных с применением новых материалов на основе техногенного сырья // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 40 – 46. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-40-46](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-40-46)

Original article

STRUCTURAL-PHASE STATE AND METAL FRACTURE SURFACE OF WELDS MADE WITH THE USE OF NEW MATERIALS BASED ON TECHNOGENIC RAW MATERIALS

© 2022 R. E. Kryukov, E. V. Gromov, A. R. Mikhno, A. V. Zhukov

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The structural-phase state and the metal fracture surface of 09G2S steel welds made using new welding materials based on technogenic raw materials of metallurgical production (silica manganese slag and aluminum electrofilter dust) were studied by scanning and transmission electron microscopy methods. The production of welded joints was carried out in laboratory conditions using welding wire of the Sv-08GA brand on the equipment of the scientific and production center "Welding Processes and Technologies" of SibSIU. Quantitative analysis of the parameters of the structure and dislocation substructure of the weld metal was performed, using the equipment of the Institute of High-current Electronics SB RAS (Tomsk). The contributions of scalar and excessive dislocation density to the strength of the weld metal are estimated. It is established that the main metal phase of the studied welds (regardless of the introduction of the additive) is a solid solution based on α -iron (ferrite, BCC crystal lattice, α -phase). In addition to α -iron, particles of iron carbide (cementite) and (mainly in the sample without additives) iron silicide of the composition Fe₃S are present in the weld metal. Analyzing electron microscopic images of the structure of the weld metal, it was noticed that the narrowest contours are formed at the interfacial boundaries of the inclusion – matrix. Such inclusions detected by transmission electron microscopy methods may be cementite particles located in the volume and at the boundaries of ferrite grains, and iron silicide particles of rounded (spherical) shape located in the volume of ferrite grains. It is revealed that the inclusions of the second phase present in the weld metal are stress concentrators and can be centers of microcrack nucleation under mechanical action on the material.

Keywords: weld, flux, silica manganese slag, structure, phase composition, fracture surface

For citation: Kryukov R.E., Gromov V.E., Mikhno A.R., Zhukov A.V. Structural-phase state and metal fracture surface of welds made with the use of new materials based on technogenic raw materials. *Bulletin of Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4 (42), pp. 40 – 46. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-40-46](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-40-46)

Введение

В последнее десятилетие наблюдаются опережающее развитие технологий электродуговой сварки [1, 2], создание широкого многообразия новых сварочных материалов и расширение областей их использования [3, 4]. Применение углеродфторсодержащих материалов во флюсах [5, 6] открыло новые технологические возможности в повышении качества макроструктуры стальных сварных соединений по содержанию неметаллических включений и газовых пор [7]. Однако недостаток данных о структурно-фазовых состояниях, дислокационной субструктуре и морфологии поверхностей разрушения сварных швов, полученных с использованием новых флюсов из шлака силикомарганца и углеродфторсодержащей добавки (ФД-УФС), сдерживает развитие этого перспективного направления.

Целью настоящей работы является обоснование совместного применения флюса из шлака силикомарганца и ФД-УФС для электродуговой сварки путем проведения подробных исследований структурно-фазовых состояний металла сварного шва.

Материалы и методы исследования

Сварку под флюсом на основе шлака производства силикомарганца с применением ФД-УФС в

количестве 6 % (образец 1) и без нее (образец 2) проводили встык без скоса кромок с двух сторон на образцах размерами 500×75×16 мм из листовой стали марки 09Г2С. Процесс проводили проволокой Sv-08ГА с использованием сварочной установки ASAW-1250 при режиме: $I_{св} = 700$ А – ток; $U_{д} = 30$ В – напряжение; $V_{св} = 35$ м/ч – скорость сварки.

Структуры поверхности разрушения и поверхности травления металла сварного шва анализировали методами сканирующей электронной микроскопии. Травление поверхности образцов осуществляли путем облучения импульсным электронным пучком на установке «СОЛЮ» [8 – 10]. Параметры облучения: энергия ускоренных электронов 18 кэВ; плотность энергии пучка электронов 10 Дж/см²; длительность импульса воздействия пучка электронов 50 мкс; количество импульсов 3; частота следования импульсов 0,3 с⁻¹; облучение проводили в среде остаточного инертного газа (аргон) при давлении 0,02 Па. Исследования морфологии - фаз, дефектной субструктуры и фазового состава металла сварного шва осуществляли методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии.

Химический состав металла сварного шва
Table 1. Chemical composition of the weld metal

Образец	Количество элементов, % (по массе)										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Nb	Al	S	P	Fe
1	0,12	0,66	1,43	0,02	0,06	0,10	0,011	0,012	0,027	0,008	остальное
2	0,09	0,71	0,51	0,03	0,10	0,11	0,014	0,023	0,018	0,012	остальное

Основные результаты

Исследования химического состава (табл. 1) показывают, что образцы металла сварного шва отличаются по степени легирования, а именно, суммарная концентрация легирующих элементов (C, Si, Mn, Cr, Ni, Cu, Nb, Al) в образце с добавкой ФД-УФС составляла 2,413 % (по массе), в образце без добавки – 1,487 % (по массе). Основное отличие в элементном составе металла шва исследуемых образцов наблюдается по концентрации марганца и углерода.

Следующей отличительной особенностью изломов исследуемых сварных швов является наличие неметаллических включений, характерных преимущественно для сварного шва 2 (без добавки) (рис. 1). Размеры неметаллических включений изменяются в пределах от 10 мкм до 15 мкм. Следует ожидать, что присутствие в металле сварного шва таких включений будет способствовать его охрупчиванию. Таким образом, анализ структуры поверхности разрушения позволяет говорить, что сварной шов металла образца 2 (без добавки), содержащий сравнительно большое количество неметаллических включений, может быть более хрупким по сравнению со сварным швом образца 1 (с добавкой ФД-УФС).

Фазовый состав и дефектную субструктуру металла сварного шва изучали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии [11 – 15]. Установлено, что основной фазой металла

исследуемых сварных швов (независимо от введения добавки) является твердый раствор на основе α -железа (феррит, ОЦК кристаллическая решетка, α -фаза). Кроме α -железа в металле сварного шва присутствуют частицы карбида железа (цементит) и (преимущественно в образце 2 (без добавки)) силицида железа состава Fe_3Si (ОЦК кристаллическая решетка, $a = 0.28277$ нм).

На рис. 2 показаны области с фрагментированной дислокационной субструктурой. Средний размер фрагментов в образце 1 (рис. 2, а) составляет 450 нм, в образце 2 (рис. 2, б) – 550 нм. В объеме фрагментов присутствует дислокационная субструктура в виде хаотически распределенных дислокаций. Скалярная плотность дислокаций в такой структуре одинакова и составляет в образцах 1 и 2 соответственно $2,7 \cdot 10^{10}$ и $2,65 \cdot 10^{10}$ см⁻².

Амплитуда внутренних полей напряжений [16 – 19] напрямую связана с поперечным размером изгибных контуров. При этом, чем меньше поперечный размер контура, тем выше амплитуда полей напряжений в данной области материала. Анализируя электронно-микроскопические изображения структуры металла сварного шва, было замечено, что наиболее узкие контуры формируются у межфазных границ включения – матрица (рис. 3). Такими включениями, выявленными методами просвечивающей электронной микроскопии, могут являться частицы цементита, расположенные в объеме и на грани-

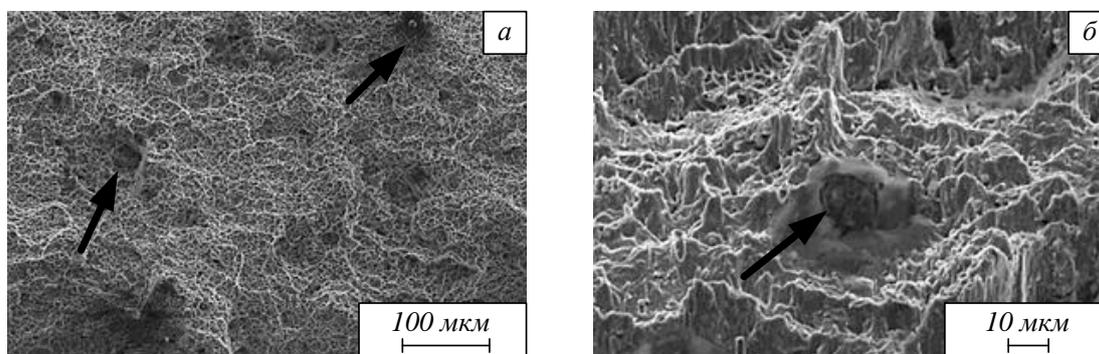


Рис. 1. Поверхность вязкого излома металла сварного шва образца 2 (стрелками указаны неметаллические включения)
Fig. 1. The surface of the viscous fracture of the weld metal of sample 2 (non-metallic inclusions are indicated by arrows)

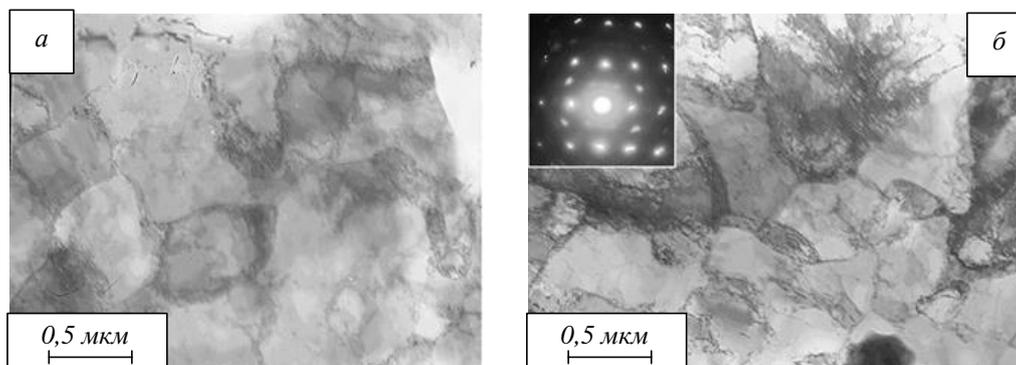


Рис. 2. Фрагментированная дислокационная субструктура металла сварного шва образцов 1 и 2 (а и б)
Fig. 2. Fragmented dislocation substructure of a weld metal of the samples 1 and 2:
а – sample 1; б – sample 2

цах зерен феррита, и частицы силицида железа округлой (сферической) формы, расположенные в объеме зерен феррита. Следовательно, включения второй фазы, присутствующие в металле сварного шва, являются концентраторами напряжений и могут быть центрами зарождения микротрещин при механическом воздействии на материал.

Электронно-микроскопические исследования металла сварного шва позволили выполнить количественный анализ характеристик структуры стали, результаты которого представлены в табл. 2 (где ρ – скалярная плотность дислокаций; ρ_{\pm} – избыточная плотность дислокаций; σ_d – вклад в упрочнение металла, обусловленный торможением подвижных дислокаций дислокациями «леса»; $\sigma_{d'}^*$ – вклад в упрочнение металла, обусловленный внутренними полями напряжений). Определяли скалярную и избыточную плотность дислокаций [19, 20], проводили оценку упрочнения металла вследствие присутствия дислокационной субструктуры и внутренних полей напряжений.

Скалярная и избыточная плотность дислокаций в структуре металла сварного шва 2 выше, чем в металле сварного шва 1. Более высокие

скалярная и избыточная плотности дислокаций металла сварного шва 2 относительно металла сварного шва 1 приводят к более высокому значению вклада в упрочнение металла, обусловленному торможением подвижных дислокаций дислокациями «леса», и вклада в упрочнение металла, обусловленного внутренними полями напряжений. Последнее указывает на более высокий уровень внутренних напряжений в сварном шве 2 и, возможно, на более значительное количество концентраторов напряжений, которые могут приводить к охрупчиванию материала данного образца.

Выводы

Методами сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии проведены исследования структуры и фазового состава поверхности разрушения металла сварного шва. Показано, что в металле сварного шва при использовании флюса из шлака силикомарганца с добавкой ФД-УФС частицы второй фазы расположены хаотически, а в металле сварного шва без добавки частицы второй фазы декорируют границы зерен феррита. Анализ структуры поверхности разрушения

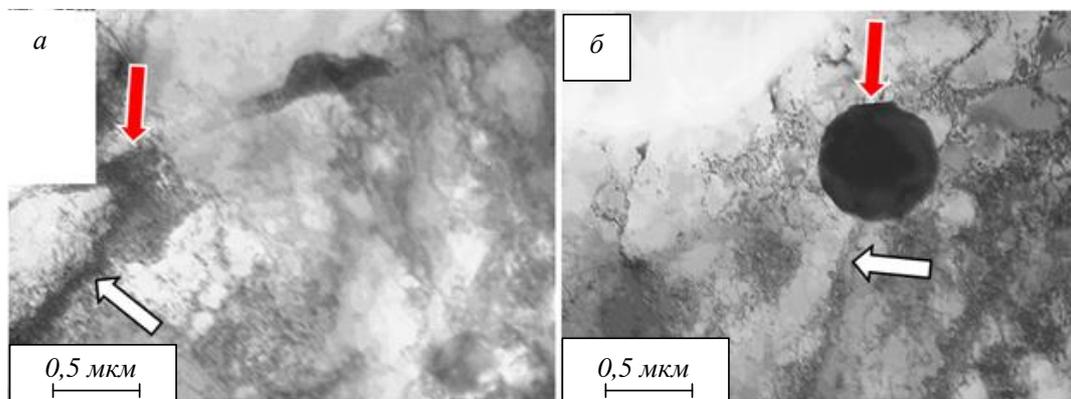


Рис. 3. Изгибные контуры экстинкции, присутствующие на электронно-микроскопических изображениях структуры металла сварного шва образцов 1 и 2 (а и б) (контуры указаны светлыми стрелками, включения второй фазы – темными стрелками)
Fig. 3. Flexural extinction contours present on electron microscopic images of the weld metal structure of samples 1 and 2 (contours are indicated by light arrows, inclusions of the second phase – by dark arrows):
а – sample 1; б – sample 2

Результаты анализа дефектной субструктуры и фазового состава металла сварного шва
Table 2. The results of the analysis of the defective substructure and phase composition of the weld

Параметр	Образец	
	1 (с добавкой ФД-УФС)	2 (без добавки)
$\rho \cdot 10^{-10}, \text{ см}^{-2}$	2,92	3,22
$\rho_{\pm} \cdot 10^{-10}, \text{ см}^{-2}$	2,04	2,87
$\sigma_{\text{д}}, \text{ МПа}$	340	360
$\sigma_{\text{д}}, \text{ МПа}$	285	465

исследуемых сварных швов выявил наличие немагнитических включений, характерных преимущественно для металла сварного шва без добавки, что может указывать на его повышенную хрупкость по сравнению с металлом сварного шва с использованием добавки ФД-УФС. Показано, что структура металла сварного шва без добавки характеризуется более высоким уровнем внутренних полей напряжений и, возможно, большим количеством концентраторов напряжений, которые могут приводить к охрупчиванию материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kozyrev N.A., Mikhno A.R., Usoltsev A.A., Kryukov R.E., Umanskiy A.A. Use of silicomanganese slag and ladle electric steelmaking slag in manufacturing the welding fluxes for surfacing the mining equipment // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Article 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/206/1/012032>
- Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Nepomnyashchikh A.S., Usoltsev A.A., Popova M. V. Development of a new flux-cored wire based on the gas cleaning dust of the silicomanganese // Welding International. 2020. Vol. 34. No. 10-12. P. 455–459. <https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1964862>
- Liu L., Zhang Z., Song G., Shen Y. Effect of cadmium chloride flux in active flux TIG welding of magnesium alloys // Materials Transactions. 2006. Vol. 47. No. 2. P. 446–449. <https://doi.org/10.2320/matertrans.47.446>
- Eremin E.N., Losev A.S. Wear resistance increase of pipeline valves by overlaying welding flux-cored wire // Procedia Engineering. 2015. Vol. 113. P. 435–440. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.324>
- Kryukov R.E., Kozyrev N.A., Usoltsev A.A., Kozyreva O.E. New welding fluxes based on silicomanganese slag for deposition and welding of canopies and crib bed of mine support // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources. 2017. Article 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/84/1/012019>
- Kryukov N.E., Koval'skii I.N., Kozyrev N.A., Igushev V.F., Kryukov R.E. Arc welding of vertical oil tanks working at low temperatures // Welding International. 2013. Vol. 27. No. 7. P. 534–536. <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.715944>
- Gromov V.E., Yuriev A.B., Kryukov R.E., Kozyrev N.A., Ivanov Yu.F., Shliarova Yu.A., Semin A.P. Effect of carbon-fluorine additive to flux on the structure, defective substructure and fracture surface of electric arc surfacing of low-carbon wire // Journal of Materials Research and Technology. 2022. Vol. 18. P. 2104–2111. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.100>
- Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / Ю.А. Денисова, Ю.Ф. Иванов, О.В. Иванова, И.А. Иконникова, Н.Н. Коваль, О.В. Крыгина, Е.А. Петрикова, А.Д. Тересов, В.В. Шугоров. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 303 с.
- Osintsev K.A., Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A., Chen X. Effect of pulsed-electron-beam irradiation on the surface structure of a non-equiatom high-entropy alloy of the Al–Co–Cr–Fe–Ni system // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2021. Vol. 15. No. 4. P. 846–850. <https://doi.org/10.1134/S1027451021040340>
- Иванов Ю.Ф., Тересов А.Д., Петрикова Е.А., Иванова О.В., Романов Д.А. Разработка комплексной методики борирования нержавеющей стали концентрированными потоками энергии. В кн. Взаимодействие излучений с твердым телом. Материалы 13-й Международной конференции, Минск, 30 сентября – 03 октября 2019 г. Минск: Белорусский государственный университет, 2019. С. 251–254.
- Шалаева Е.В. Просвечивающая электронная микроскопия в исследовании фазовых превращений, упорядочения и разупорядочения в неорганических соединениях, сплавах, минералах // Минералы: строение, свойства, методы исследования. 2012. № 4. С. 65.
- Rakhadilov B.K., Tabiyeva Y.Y., Uazyrkhanova G.K., Zhurerova L.G., Popova N.A. Effect of electrolyte - plasma surface hardening on structure wheel steel 2 // Bulletin of the Karaganda

- University. Physics Series. 2020. No. 2 (98). P. 68–74. <https://doi.org/10.31489/2020Ph2/68-74>
13. Tabieva E., Zhurerova L.G., Baizhan D. Influence of electrolyte-plasma hardening technological parameters on the structure and properties of banding steel 2 // *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 839. P. 57–62.
 14. Ищенко А.А., Тарасов Ю.И., Рябов Е.А., Асеев С.А., Шефер Л. Сверхбыстрая просвечивающая электронная микроскопия // *Тонкие химические технологии*. 2017. № 12 (1). С. 5–25. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2017-12-1-5-25>
 15. Смирнов А.Н., Кречетов А.А., Глинка А.С. Структурно-фазовое состояние стали 35ХГС после механотермической обработки // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2010. № 6 (82). С. 47–51.
 16. Пимонов М.В., Романов Д.А., Чен Х.-Z. Структура поверхностного слоя стали 40Х после финишных этапов механической обработки резанием // *Физика и химия обработки материалов*. 2020. № 4. С. 17–30. <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2020-4-17-30>
 17. Belonogov E.K., Kushev S.B., Soldatenko S.A., Turaeva T.L. Morphology and structure characteristics of nanoscale carbon materials containing graphene // *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2021. Vol. 6. No. 4. P. 247–255. <https://doi.org/10.17277/jamt.2021.04.pp.247-255>
 18. Структурно-фазовые состояния и механизмы упрочнения деформированной стали / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, Н.А. Попова и др. Новокузнецк: ООО Полиграфист, 2016. 510 с.
 19. Конева Н.А., Киселева С.Ф., Попова Н.А. Эволюция структуры и внутренние поля напряжений. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing RU, 2017. 148 с.
 20. Абабков Н.В., Смирнов А.Н., Попова Н.А., Конева Н.А., Никоненко Е.Л. Исследование структуры и свойств металла разрушенного и не разрушенного паропроводов из стали 20 после одинакового срока эксплуатации // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2018. Т. 15. № 2. С. 176–181. <https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2018.02.002>
- REFERENCES**
1. Kozyrev N.A., Mikhno A.R., Usoltsev A.A., Kryukov R.E., Umanskiy A.A. Use of silicomanganese slag and ladle electric steelmaking slag in manufacturing the welding fluxes for surfacing the mining equipment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018, article 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/206/1/012032>
 2. Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Nepomnyashchikh A.S., Usoltsev A.A., Popova M. V. Development of a new flux-cored wire based on the gas cleaning dust of the silicomanganese. *Welding International*. 2020, vol. 34, no. 10-12, pp. 455–459. <https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1964862>
 3. Liu L., Zhang Z., Song G., Shen Y. Effect of cadmium chloride flux in active flux TIG welding of magnesium alloys. *Materials Transactions*. 2006, vol. 47, no. 2, pp. 446–449. <https://doi.org/10.2320/matertrans.47.446>
 4. Eremin E.N., Losev A.S. Wear resistance increase of pipeline valves by overlaying welding flux-cored wire. *Procedia Engineering*. 2015, vol. 113, pp. 435–440. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.324>
 5. Kryukov R.E., Kozyrev N.A., Usoltsev A.A., Kozyreva O.E. New welding fluxes based on silicomanganese slag for deposition and welding of canopies and crib bed of mine support. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources*. 2017, article 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/84/1/012019>
 6. Kryukov N.E., Koval'skii I.N., Kozyrev N.A., Igushev V.F., Kryukov R.E. Arc welding of vertical oil tanks working at low temperatures. *Welding International*. 2013, vol. 27, no. 7, pp. 534–536. <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.715944>
 7. Gromov V.E., Yuriev A.B., Kryukov R.E., Kozyrev N.A., Ivanov Yu.F., Shliarova Yu.A., Semin A.P. Effect of carbon-fluorine additive to flux on the structure, defective substructure and fracture surface of electric arc surfacing of low-carbon wire. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022, vol. 18, pp. 2104–2111. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.100>
 8. Denisova Yu.A., Ivanov Yu.F., Ivanova O.V., Ikonnikova I.A., Koval' N.N., Krysina O.V., Petrikova E.A., Teresov A.D., Shugorov V.V., Koval' N.N., Ivanov Yu.F. *Evolution of the structure of the surface layer of steel subjected to electron-ion-plasma processing methods*. Tomsk: Publishing house of NTL, 2016. 303 p. (In Russ.).
 9. Osintsev K.A., Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A., Chen X. Effect of pulsed-electron-beam irradiation on the surface structure of a non-equiatom high-entropy alloy of the Al–Co–Cr–Fe–Ni system. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2021, vol. 15, no. 4, pp. 846–850. <https://doi.org/10.1134/S1027451021040340>
 10. Ivanov Yu.F., Teresov A.D., Petrikova E.A., Ivanova O.V., Romanov D.A. Development of a comprehensive technique for borating stain-

- less steel with concentrated energy flows. In: «*The interaction of radiation with a solid*». *Proceedings of the 13th International Conference*, Minsk, September 30 – October 03, 2019. Minsk: Belarusian State University, 2019, pp. 251–254. (In Russ.).
11. Shalaeva E.V. Transmission electron microscopy in the study of phase transformations, ordering and disordering in inorganic compounds, alloys, minerals. *Minerals: structure, properties, research methods*. 2012, no. 4, pp. 65. (In Russ.).
 12. Rakhadilov B.K., Tabiyeva Y.Y., Uazyrkhanova G.K., Zhurerova L.G., Popova N.A. Effect of electrolyte - plasma surface hardening on structure wheel steel 2. *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*. 2020, no. 2 (98), pp. 68–74. <https://doi.org/10.31489/2020Ph2/68-74>
 13. Tabieva E., Zhurerova L.G., Baizhan D. Influence of electrolyte-plasma hardening technological parameters on the structure and properties of banding steel 2. *Key Engineering Materials*. 2020, vol. 839, pp. 57–62.
 14. Ishchenko A.A., Tarasov Yu.I., Ryabov E.A., Aseev S.A., Shefer L. Ultrafast transmission electron microscopy. *Fine chemical technologies*. 2017, no. 12 (1), pp. 5–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2017-12-1-5-25>
 15. Smirnov A.N., Krechetov A.A., Glinka A.S. Structural-phase state of 35KHGS steel after mechanothermal treatment. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2010, no. 6 (82), pp. 47–51. (In Russ.).
 16. Pimonov M.V., Romanov D.A., Chen X.-Z. The structure of the surface layer of 40X steel after the finishing stages of mechanical processing by cutting. *Physics and chemistry of materials processing*. 2020, no. 4, pp. 17–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2020-4-17-30>
 17. Belonogov E.K., Kushev S.B., Soldatenko S.A., Turaeva T.L. Morphology and structure characteristics of nanoscale carbon materials containing graphene. *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2021, vol. 6, no. 4, pp. 247–255. <https://doi.org/10.17277/jamt.2021.04.pp.247-255>
 18. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Popova N.A. et al. *Structural-phase states and mechanisms of hardening of deformed steel*. Novokuznetsk: OOO Polygraphist, 2016, 510 p. (In Russ.).
 19. Koneva N.A., Kiseleva S.F., Popova N.A. *Evolution of the structure and internal stress fields*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing RU, 2017, 148 p. (In Russ.).
 20. Ababkov N.V., Smirnov A.N., Popova N.A., Koneva N.A., Nikonenko E.L. Investigation of the structure and properties of the metal of destroyed and undisturbed steam pipes made of steel 20 after the same service life. *Fundamental problems of modern materials science*. 2018, vol. 15, no. 2, pp. 176–181.

(In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2018.02.002>

Сведения об авторах

Роман Евгеньевич Крюков, к.т.н., доцент, доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: rek_nzrmk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3394-7941

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-5147-5343

Алексей Романович Михно, аспирант института машиностроения и транспорта, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: mikno-mm131@mail.ru

ORCID: 0000-0002-7305-6692

Андрей Владимирович Жуков, аспирант института машиностроения и транспорта, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: svarka42@mail.ru

Information about the authors

Roman E. Kryukov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-3394-7941

E-mail: rek_nzrmk@mail.ru

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Aleksei R. Mikhno, Postgraduate student of the Institute of Mechanical Engineering and Transport, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-7305-6692

E-mail: mikno-mm131@mail.ru

Andrey V. Zhukov Postgraduate student of the Institute of Mechanical Engineering and Transport, Siberian State Industrial University

E-mail: svarka42@mail.ru

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 17.10.2022

После доработки 17.11.2022

Принята к публикации 21.11.2022

Received 17.10.2022

Revised 17.11.2022

Accepted 21.11.2022

Оригинальная статья

УДК 669.018.25:621.793.184.762.8

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-47-53

**РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ
ТВЕРДОГО СПЛАВА VK10KS**

© 2022 г. Т. Н. Осколкова

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Представлены результаты исследований твердого сплава VK10KS после различных поверхностных обработок (используя концентрированные потоки энергии). Ионно-плазменное покрытие TiN + ZrN из отдельных катодов титана и циркония наносили с помощью установки Квант-6. Катод из сплава циркония располагался в камере между двумя катодами из сплава титана. Металлографически после нанесения ионно-плазменного покрытия состава TiN + ZrN выявлен плохо травящийся слой толщиной 15 мкм, состоящий из микрослоев. Обнаруженные на дифрактограммах две фазы (TiN и ZrN) в покрытии подтверждает микрослоистость его структуры, которая будет способствовать повышению адгезии самого покрытия с твердосплавной основой. Граница между микрослоями покрытия будет тормозить рост трещины. Установлено, что введение в состав покрытия соединения TiN циркония приводит к увеличению нанотвердости на 23 % (до 39 ГПа). Электроискровую обработку проводили на установке UR – 121. Она состоит из эрозии упрочняющего электрода при искровом разряде. При этом происходит перенос продуктов эрозии на деталь. В качестве электрода применялся твердый сплав VK6-OM. Рентгенофазовым анализом выявлено наличие на поверхности твердого сплава VK10KS вновь образующейся фазы с высокой твердостью (карбид дивольфрама W_2C), у которого твердость больше, чем у карбида вольфрама WC. Наноиндентирование сплава VK10KS после электроискровой обработки показало повышение поверхностной твердости до 22 ГПа. Методом электровзрывного легирования (ЭВЛ) титаном и бором на твердом сплаве VK10KS получен упрочненный поверхностный слой, состоящий из диборида титана TiB_2 , карбидов TiC, W_2C с нанотвердостью 28 ГПа. Суть ЭВЛ заключается в накоплении энергии батареей импульсных конденсаторов до 10 кДж и ее последующем разряде в течение 100 мкс через проводник, который испытывает взрывное разрушение. При этом происходит нагрев обрабатываемой поверхности и насыщение ее продуктами взрыва с последующей самозакалкой из-за отвода тепла в окружающую среду и вглубь материала.

Ключевые слова: твердый сплав, структура, искровая обработка, ионно-плазменное покрытие, электровзрывная обработка

Для цитирования: Осколкова Т.Н. Разработка способов поверхностного упрочнения твердого сплава VK10KS // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 47 – 53. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-47-53](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-47-53)

Original article

**DEVELOPMENT OF METHODS FOR SURFACE HARDENING
OF HARD ALLOY VK10KS**

© 2022 T. N. Oskolkova

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The results of studies of the VK10KS hard alloy after various surface treatments (using concentrated energy flows) are presented. The TiN + ZrN ion-plasma coating from separate titanium and zirconium cathodes was applied using the Kvant-6 installation. The zirconium alloy cathode was located in a chamber between two titanium alloy cathodes. Metallographically, after applying an ion-plasma coating of TiN + ZrN composition, a poorly etched layer

with a thickness of 15 microns consisting of microlayers was revealed. The two phases (TiN and ZrN) found in the diffractograms in the coating confirm the micro-thickness of its structure, which will help to increase the adhesion of the coating itself with a carbide base. The boundary between the micro-layers of the coating will inhibit the growth of the crack. It was found that the introduction of zirconium TiN compound into the coating leads to an increase in nanohardness by 23% (up to 39 GPa). Electric spark treatment was carried out on the UR – 121 installation. It consists of erosion of the hardening electrode during spark discharge. At the same time, the erosion products are transferred to the part. A hard alloy VK6-OHM was used as the electrode. X-ray phase analysis revealed the presence on the surface of the hard alloy VK10KS of a newly formed phase with high hardness (divolfgram carbide W_2C), which has a hardness greater than that of tungsten monocarbide WC. Nanoindentation of the VK10KS alloy after electric spark treatment showed an increase in surface hardness up to 22 GPa. A hardened surface layer consisting of titanium diboride TiB_2 , carbides TiC, W_2C with a nanohardness of 28 GPa was obtained by electroexplosive alloying (EVL) with titanium and boron on a hard alloy VK10KS. The essence of EVL is the accumulation of energy by a battery of pulse capacitors up to 10 kJ and its subsequent discharge within 100 microseconds through a conductor that experiences explosive destruction. At the same time, the treated surface is heated and saturated with explosion products, followed by self-quenching due to heat removal into the environment and deep into the material.

Keywords: hard alloy, structure, spark treatment, ion-plasma coating, electro-explosive treatment

For citation: Oskolkova T.N. Development of methods for surface hardening of hard alloy VK10KS. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 3 (41), pp. 47 – 53. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-47-53](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-47-53)

Введение

Развитие многих отраслей в Российской Федерации связано с применением спеченных твердых сплавов, которые широко используют в качестве инструментальных материалов.

Сплавы WC – Co достаточно прочные из всех спеченных твердых сплавов, но не всегда удовлетворяют требованиям по износостойкости при сохранении вязкости. Повышения износостойкости инструмента из твердых сплавов можно добиться путем применения различных высокотехнологических методов поверхностного упрочнения [1 – 5]. Большой объем результатов теоретических и экспериментальных исследований по рассматриваемому вопросу получен и описан в работах [6 – 14]. Однако недостаточно изученным остается вопрос, связанный с применением концентрированных потоков энергии при поверхностной обработке твердых сплавов группы ВК. Новые данные по существующей проблеме при получении комплекса свойств поверхностных слоев твердых сплавов позволяют прогнозировать эксплуатационный срок твердосплавных изделий, а также представляют большой практический интерес.

В настоящей работе исследовали структуры и свойства поверхностных слоев твердого сплава ВК10КС после нанесения ионно-плазменного покрытия состава TiN + ZrN электроискровой обработки и обработки способом электровзрывного легирования (ЭВЛ).

Материалы, способы обработки и методы исследования

В исследованиях использовали твердый сплав марки ВК10КС производства ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» (Свердловская область).

Ионно-плазменное покрытие TiN + ZrN из отдельных катодов титана и циркония наносили с помощью установки Квант-6. Режим обработки следующий: энергия ионных потоков 100 эВ при отрицательном напряжении 160 В и токе фокусирующей катушки $0,3 \div 0,4$ А; давление камеры $6,0 \cdot 10^{-3}$ Па; реакционный газ – азот. Катод из сплава циркония располагали в камере между двумя катодами из сплава титана.

Электроискровую обработку проводили на установке UR – 121, которая состоит из эрозии упрочняющего электрода при искровом разряде. При этом происходит перенос продуктов эрозии на деталь. В качестве электрода применялся твердый сплав ВК6-ОМ. Упрочнение поверхности твердого сплава ВК10КС проводили с применением двойного режима установки: 0,55 мин/1 см² по режиму Norma 3 + 1,0 мин/1 см² по режиму Turbo. Подробное описание режимов и механизма обработки представлено в работе [15].

Для поверхностного упрочнения сплава ВК10КС применяли метод ЭВЛ. Суть этого метода заключается в накоплении энергии батареей импульсных конденсаторов до 10 кДж и ее последующем разряде в течение 100 мкс через проводник, который испытывает взрывное разрушение. При этом происходит нагрев обрабатываемой поверхности и насыщение ее продуктами взрыва с последующей самозакалкой из-за отвода тепла в окружающую среду и вглубь материала. Режим обработки при интенсивности воздействия $6,0$ ГВт/м² и величиной зарядного напряжения $U = 2,3$ кэВ обеспечивает оплавление поверхности и интенсивное конвективное

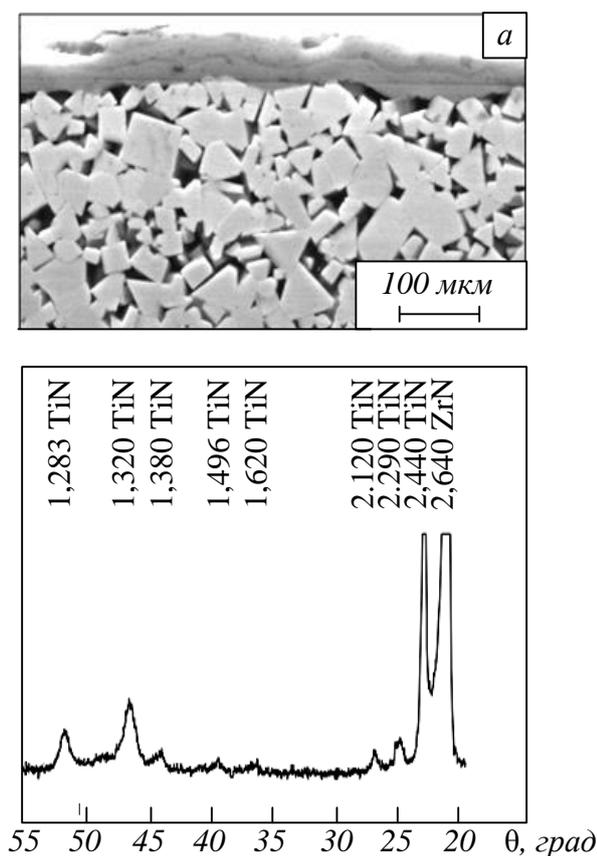


Рис. 1. Микроструктура (а) и фрагмент дифрактограммы (б) сплава ВК10КС с ионно-плазменным TiN + ZrN покрытием
 Fig. 1. Microstructure (a) and diffractogram fragment (b) of VK10KS alloy with ion-plasma TiN + ZrN coating

перемешивание расплава из-за неоднородного давления, оказываемого плазменной струей на поверхность.

Роль взрывающего проводника выполняла титановая фольга толщиной 20 мкм (из расчета на 15 см² обрабатываемой поверхности требуется 40 мг). Взрывая титан, можно получить на поверхности твердых сплавов группы ВК карбидов титана TiC основу твердых сплавов группы ТК.

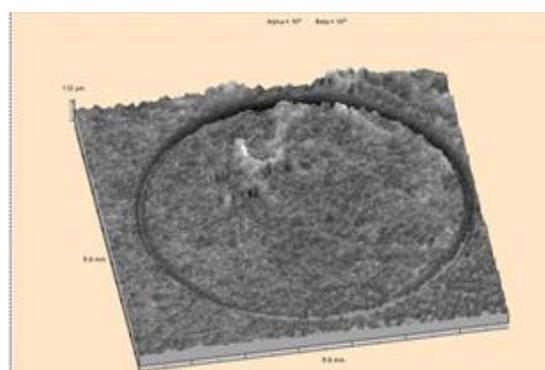
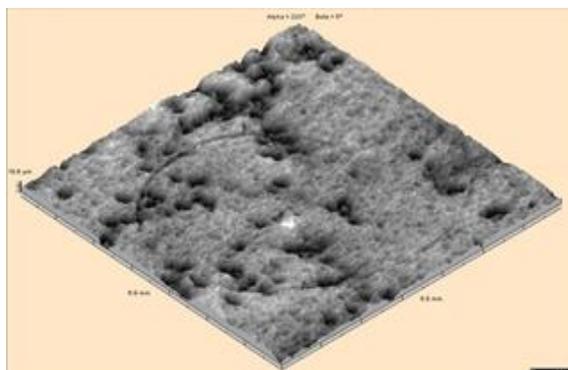


Рис. 2. Внешний вид треков при трибологических испытаниях:
 а – сплав ВК10КС с ионно-плазменными TiN + ZrN покрытием; б – исходный сплав
 Fig. 2. Appearance of tracks during tribological tests:
 а – VK10KS alloy with ion-plasma TiN + ZrN coating; б – initial alloy

Исследования микроструктуры после различных обработок проводили с использованием микроскопа Philips SEM 515, сканирующего электронного микроскопа EVO 50 XVP, просвечивающего электронного микроскопа Tescnaі 20 G2 TWIN с ускоряющим напряжением 200 кВ, рентгеновского дифрактометра ДРОН 2,0 с железным K_α-излучением. Свойства упрочненной зоны методом оценки нанотвердости осуществляли на приборе Nano Hardness Tester, методом оценки износостойкости – с помощью высокотемпературного трибометра PC-Operated High Temperature Tribometer.

Результаты исследования

Металлографически после нанесения ионно-плазменного покрытия состава TiN + ZrN выявлен плохо травящийся слой толщиной 10 ÷ 15 мкм, состоящий из микрослоев (рис. 1, а). Обнаруженные на дифрактограммах две фазы (TiN и ZrN) в покрытии подтверждает микрослоистость его структуры (рис. 1, б), которая будет способствовать повышению адгезии самого покрытия с твердосплавной основой. Граница между микрослоями покрытия будет тормозить рост трещины.

Установлено, что введение в состав покрытия TiN циркония приводит к увеличению нанотвердости на 23 % (до 39 ГПа).

Износ образцов определялся на десяти образцах, измеряя глубину и площадь трека до и после обработки. Трек образуется в результате вращающихся действий алмазного индентора на неподвижный образец. Режим испытаний следующий: нагрузка на образец 3 Н; число оборотов 12000; линейная скорость движения 2,5 см/с (рис. 2). Для сравнения аналогичные испытания проводили на исходных образцах при таких же параметрах, но количестве оборотов 4000.

Трибологические испытания образцов с ионно-плазменным покрытием показали, что пло-

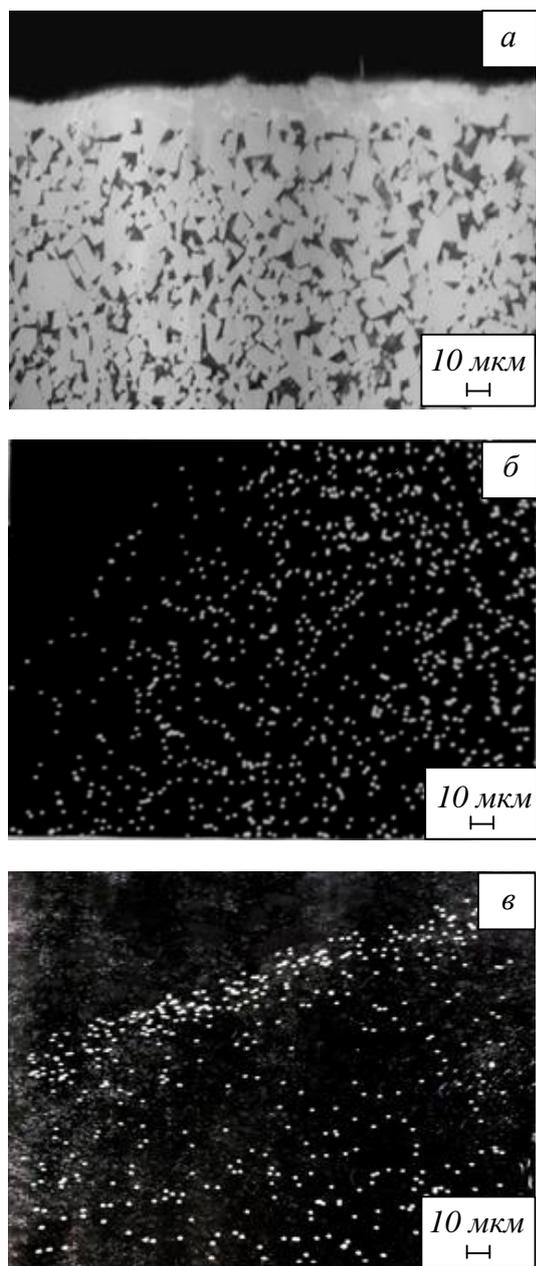


Рис. 3. Микроструктура сплава ВК10КС после электроискровой обработки (а) и в характеристических рентгеновских излучениях кобальта (б), вольфрама (в)

Fig. 3. The microstructure of the VK10KS alloy after electric spark treatment (a) and in the characteristic X-rays of cobalt (b), tungsten (c)

щадь трека износа с покрытием на сплавах составляет $4,2 \text{ мкм}^2$, на сплаве без покрытия – 12921 мкм^2 . Максимальная глубина трека у сплавов с покрытием составляет 97 нм, у исходного образца – 58 мкм. Высокая износостойкость ионно-плазменного покрытия TiN + ZrN на твердом сплаве ВК10КС достигается из-за формирующихся нитридов титана и циркония с высокими твердостями и согласуется с атомно-энергетической концепцией В.Ф. Моисеева.

Способом электроискровой обработки получена твердосплавная пластина, состоящая из более износостойкого слоя ВК6-ОМ и недостаточно износо-

стойкой основы ВК10КС (рис. 3, а). Результаты растровой электронной микроскопии показали градиентную структуру на сплаве ВК10КС: более высокое содержание вольфрама в поверхностном слое и пониженное кобальта (рис. 3, б, в).

Рентгенофазовым анализом выявлено наличие на поверхности твердого сплава ВК10КС вновь образующейся фазы с высокой твердостью (карбид дивольфрама W_2C), у которого твердость больше, чем у монокарбида вольфрама WC (рис. 4). Наноиндентирование сплава ВК10КС после электроискровой обработки показало повышение поверхностной твердости до 22 ГПа.

Трибологические испытания проводили по режимам, описанным выше, но при числе оборотов 4000. Глубина трека износа устанавливается на отметке 10,8 мкм (при исходной 58 мкм). Площадь сечения трека изношенных образцов после обработки и без нее составляет 941 и 12921 мкм^2 соответственно.

Электровзрывное легирование титаном совместно с порошком аморфного бора (размеры частиц бора 5 мкм) приводит к формированию на поверхности твердого сплава ВК10КС плохо травящейся зоны толщиной $1 \div 2 \text{ мкм}$ (рис. 5). Рентгенофазовым анализом установлено, что этот слой состоит из диборида титана TiB_2 , карбидов TiC , W_2C . Эти фазы обладают более высокой твердостью, чем исходные.

Ниже рассматриваемой зоны располагается зона толщиной $10 \div 15 \text{ мкм}$ с измельченными карбидами вольфрама, плавно переходящей в основной материал без формирования резкой границы между упрочненной зоной и сплавом ВК10КС (рис. 5).

После ЭВЛ просвечивающей электронной микроскопией (рис. 6) выявлены изменения, как в карбидной, так и кобальтовой фазах. В карбидной фазе обнаружена дислокационная структура. Кобальтовая фаза дополнительно легируется элементами взрывааемых проводников и основного материала. На фоне этого формируются мелкодисперсные частицы карбидов вольфрама, а также выявлены деформационные линии и дислокации. Дополнительное легирование кобальтовой фазы будет способствовать стабилизации ГЦК решетки и положительно влиять на эксплуатационную стойкость твердых сплавов на основе WC – Co.

Электровзрывное легирование титаном с бором приводит к формированию упрочненных поверхностных слоев с нанотвердостью 28 ГПа из-за формирования диборида титана TiB_2 . С увеличением поверхностной твердости возрастает износостойкость: глубина изношенного трека 2,42 мкм; площадь трека износа 155 мкм^2 по сравнению с исходными значениями (58 мкм

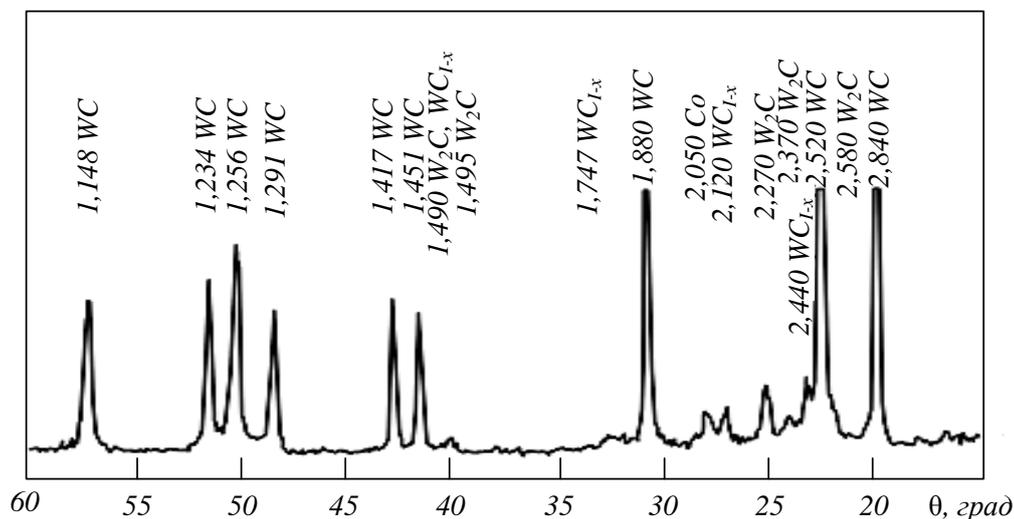


Рис. 4. Фрагмент дифрактограммы сплава ВК10КС после электронской обработки
 Fig. 4. Fragment of the diffractogram of the VK10KS alloy after electric spark treatment

глубина трека износа и 12921 мкм^2 площадь трека износа).

Выводы

На основе обобщения результатов экспериментальных исследований разработаны технологии поверхностного упрочнения твердых сплавов WC – Co с применением концентрированных потоков энергии, позволяющих повысить поверхностную твердость до 22 – 39 ГПа. Использование предлагаемых способов поверхностного упрочнения твердого сплава ВК10КС дает возможность выбора одного из методов упрочнения, исходя из условий эксплуатации твердосплавного инструмента, и продлить его эксплуатационный срок, а также сэкономить дефицитные материалы (вольфрам и кобальт).

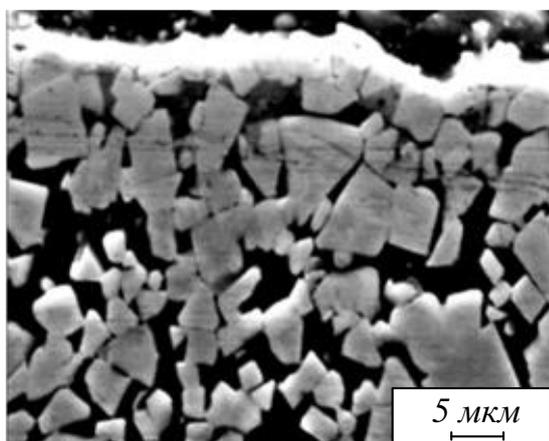


Рис. 5. Микроструктура сплава ВК10КС после ЭВЛ бором с титаном

Fig. 5. The microstructure of the VK10KS alloy after EVL boron with titanium

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. Москва: Машиностроение, 2008. 311 с.
2. Oskolkova T.N., Glezer A.M. Wear-Resistant Coatings on WC – Co Hard Alloys Synthesized by Concentrated Energy Flows // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. Vol. 10. No. 1. P. 146–154.
3. Liu Y., Vid Q., Li Y. Synthesis and tribological of electroless Ni – P – WC nanocomposite coatings // Surface and Coatings Technology. 2007. Vol. 201. No. 16-17. P. 7246–7251.
4. Veprek S., Veprek-Hejman M., Kavrankova P. etc. Different approaches to superhard coatings and nanocomposition // Thin Solid Films. 2005. Vol. 476. P. 1–29.
5. Shourong L., Jianmin H., Liang C. etc. Mechanism of hard-facing alloy's WC – Co boronizing with rare-earth metals // Xiyou jinshu cailiao ya gongcheng. Rare Metal. Mater. and Eng. 2003. Vol. 32. No. 4. P. 305–308.
6. Осколкова Т.Н., Симачев А.С., Ярьско С.И. Влияние импульсно-плазменного модифицирования титаном и карбидом кремния поверхности твердого сплава ВК10КС на его структуру и свойства // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 11-12. С. 922–929.
7. Сизов С.В., Табаков В.П. Моделирование воздействия импульсной лазерной обработки на композицию «твердосплавная основа – износостойкое покрытие» // Вестник машиностроения. 2019. № 6. С. 80–84.
8. Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В. Исследование влияния температурных полей

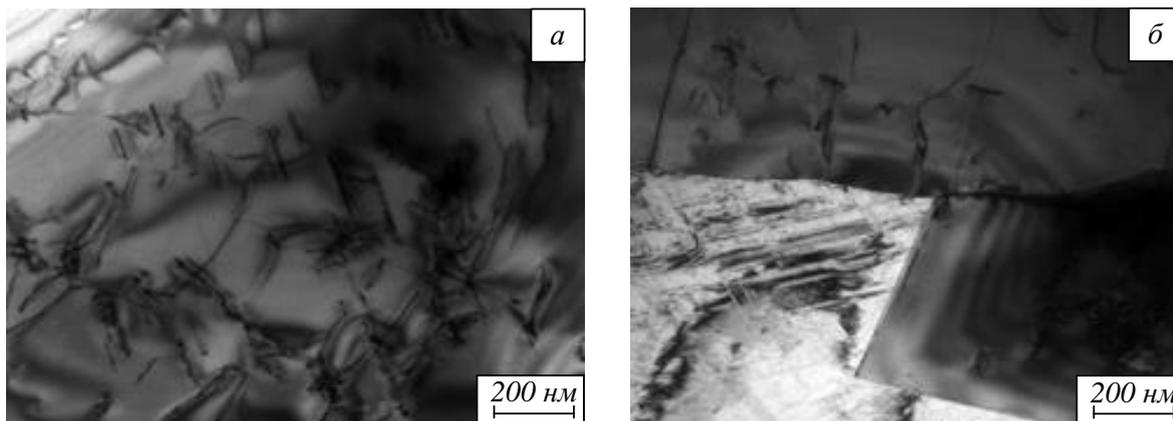


Рис. 6. Структура сплава VK10КС после электровзрывной обработки титаном с бором:

a – поверхность; *б* – на расстоянии 10 мкм от поверхности

Fig. 6. The structure of the VK10KS alloy after electroexplosion treatment with titanium with boron:

a – surface; *b* – at a distance of 10 microns from the surface

нагрева при непрерывной лазерной обработке на эксплуатационные свойства пластин твердого сплава Т15К6 // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2018. № 2. С. 76–84.

9. Пинахин И.А., Черниговский В.А., Брацихин А.А., Ягмуров М.А., Сугаров Х.Р. Исследование физико-механических свойств твердых сплавов ВК6, ВК8 и Т5К10, прошедших объемное импульсное лазерное упрочнение // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 3. С. 37–40.
10. Zhang F.G., Zhu X.P., Lei M.K. Surface characterization and tribological properties of WC – Ni cemented carbide irradiated by high intensity pulsed electron beam // Vacuum. 2017. Vol. 137. P. 119–124.
11. Верещака А.А., Табаков В.П. Исследование влияния архитектуры многослойного покрытия на работоспособность твердосплавного инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15. № 9 (177). С. 427–429.
12. Табаков В.П., Худобин Л.В. Повышение работоспособности твердосплавного инструмента путем направленного выбора механических свойств слоев многослойного покрытия с учетом функциональных параметров процесса резания // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 9 (165). С. 414–418.
13. Tabakov V.P., Chikhranov A.V. Selecting the composition of wear resistant coatings // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38. No. 2. P. 105–109.
14. Волхонский А.О., Блинков И.В., Аникин В.Н., Белов Д.С., Сергевнин В.С. Упрочне-

ние твердосплавного лезвийного инструмента, используемого для резания трудно-обрабатываемых титановых сплавов и хромоникелевых сталей, многослойными наноструктурными покрытиями // Известия вузов. Цветная металлургия. 2015. № 5. С. 64–73.

15. Осколкова Т.Н., Симачев А.С. Исследование структуры и свойств твердого сплава VK10КС после электроискровой обработки // МиТОМ. 2022. № 6 (804). С. 36–39.

REFERENCES

1. Tabakov V.P. *Formation of wear-resistant ion-plasma coatings of cutting tools*. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 311 p. (In Russ.).
2. Oskolkova T.N., Glezer A.M. Wear-Resistant Coatings on WC – Co Hard Alloys Synthesized by Concentrated Energy Flows. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019, vol. 10, no. 1, pp. 146–154.
3. Liu Y., Vid Q., Li Y. Synthesis and tribological of electroless Ni – P – WC nanocomposite coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2007, vol. 201, no. 16-17, pp. 7246–7251.
4. Veprek S., Veprek-Hejman M., Kavrankova P. etc. Different approaches to superhard coatings and nanocomposition. *Thin Solid Films*. 2005, vol. 476, pp. 1–29.
5. Shourong L., Jianmin H., Liang C. etc. Mechanism of hard-facing alloy's WC – Co boronizing with rare-earth metals. *Xiyou jinshu cailiao ya gongcheng. Rare Metal. Mater. and Eng.* 2003, vol. 32, no. 4, pp. 305–308.
6. Oskolkova T.N., Simachev A.S., Yares'ko S.I. The effect of pulsed plasma modification by titanium and silicon carbide of the surface of a hard alloy VK10KS on its structure and prop-

- erties. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 11-12, pp. 922–929. (In Russ.).
7. Sizov S.V., Tabakov V.P. Modeling of the impact of pulsed laser treatment on the composition "carbide base – wear-resistant coating". *Vestnik mashinostroeniya*. 2019, no. 6, pp. 80–84. (In Russ.).
 8. Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V. Investigation of the influence of temperature fields of heating during continuous laser processing on the performance properties of T15K6 hard alloy plates. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2018, no. 2, pp. 76–84. (In Russ.).
 9. Pinakhin I.A., Chernigovskii V.A., Bratsikhin A.A., Yagmurov M.A., Sugarov Kh.R. Investigation of the physico-mechanical properties of hard alloys VK6, VK8 and T5K10 that have undergone volumetric pulsed laser hardening. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2017, vol. 83, no. 3, pp. 37–40.
 10. Zhang F.G., Zhu X.P., Lei M.K. Surface characterization and tribological properties of WC – Ni cemented carbide irradiated by high intensity pulsed electron beam. *Vacuum*. 2017, vol. 137, pp. 119–124.
 11. Vereshchaka A.A., Tabakov V.P. Investigation of the influence of multilayer coating architecture on the performance of a carbide tool. *Up-rochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2019, vol. 15, no. 9 (177), pp. 427–429. (In Russ.).
 12. Tabakov V.P., Khudobin L.B. Improving the performance of a carbide tool by directional selection of mechanical properties of multilayer coating layers taking into account the functional parameters of the cutting process. *Up-rochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2018, vol. 14, no. 9 (165), pp. 414–418. (In Russ.).
 13. Tabakov V.P., Chikhranov A.V. Selecting the composition of wear resistant coatings. *Russian Engineering Research*. 2018, vol. 38, no. 2, pp. 105–109.
 14. Volkhonskii A.O., Blinkov I.V., Anikin V.N., Belov D.S., Sergevnin B.C. Hardening of a carbide blade tool used for cutting hard-to-process titanium alloys and chromium-nickel steels with multilayer nanostructured coatings. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 5, pp. 64–73. (In Russ.).
 15. Oskolkova T.N., Simachev A.S. Investigation of the structure and properties of hard alloy VK10KS after electric spark treatment. *Mi-TOM*. 2022, no. 6 (804), pp. 36–39

Сведения об авторах

Татьяна Николаевна Осколкова, д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: oskolkova@kuz.ru

Information about the authors

Tatiana N. Oskolkova, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Metalworking and Metal Science. EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University
Email: oskolkova@kuz.ru

Поступила в редакцию 20.07.2022
 После доработки 15.08.2022
 Принята к публикации 18.08.2022

Received 20.07.2022
 Revised 15.08.2022
 Accepted 18.08.2022

Оригинальная статья

УДК 621.771.65

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-54-60

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПРОИЗВОДСТВА МЕЛЮЩИХ ШАРОВ ИЗ ОТБРАКОВКИ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ
НА ИХ УДАРНУЮ СТОЙКОСТЬ**

© 2022 г. А. А. Уманский, А.С. Симачев, Л. В. Думова, С. О. Сафонов

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. На основании проведенных исследований определен перечень технологических параметров сталеплавильного и прокатного передела, оказывающих значимое влияние на ударную стойкость мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф в условиях ОАО «Гурьевский металлургический завод». С использованием стандартных методик статистического и металлографического анализов установлена степень и природа влияния указанных параметров на отбраковку мелющих шаров по результатам копровых испытаний. Определено, что повышение содержания углерода, водорода и серы в стали приводит к увеличению отбраковки мелющих шаров по результатам испытаний на ударную стойкость. При этом влияние углерода связано с формированием карбидов цементитного типа при повышении содержания углерода до заэвтектоидных значений, влияние водорода связано с образованием флокенов, а влияние серы – с образованием непластичных сульфидов. По прокатному переделу установлено значимое влияние повышения температуры прокатки шаров на увеличение их ударной стойкости, обусловленное ростом пластичности стали марки К76Ф в фактическом температурном интервале прокатки (повышение вероятности заваривания дефектов в процессе деформации). Определено, что суммарная относительная степень влияния параметров сталеплавильного и прокатного переделов на отбраковку шаров при испытаниях на ударную стойкость составляет 71 %, оставшиеся 29 % относятся к влиянию параметров термической обработки шаров, что подтверждено результатами металлографических исследований (в изломе шаров выявлены закалочные трещины).

Ключевые слова: мелющие шары, рельсовая сталь, ударная стойкость, химический состав, микроструктура, ликвация

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20170, <https://rscf.ru/project/22-29-20170/>, за счет гранта Кемеровской области – Кузбасса.

Для цитирования: Уманский А.А., Симачев А.С., Думова Л.В., Сафонов С.О. Исследования влияния технологических параметров производства мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали на их ударную стойкость // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 54 – 60. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-54-60](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-54-60)

**STUDIES OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE
PRODUCTION OF GRINDING BALLS FROM THE REJECTION OF RAIL STEEL ON
THEIR IMPACT RESISTANCE**

© 2022 A. A. Umanskii, A. S. Simachev, L. V. Dumova, S. O. Safonov

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. Based on the conducted research, a list of technological parameters of steelmaking and rolling processing that have a significant impact on the impact resistance of grinding balls from the rejection of K76F grade rail steel in the conditions of JSC "Guryev Metallurgical Plant" has been determined. Using standard

methods of statistical and metallographic analyses, the degree and nature of the influence of these parameters on the rejection of grinding balls based on the results of copra tests has been established. It is determined that an increase in the content of carbon, hydrogen and sulfur in steel leads to an increase in the rejection of grinding balls according to the results of impact resistance tests. At the same time, the influence of carbon is associated with the formation of cementite-type carbides when the carbon content increases to over-eutectoid values, the influence of hydrogen is associated with the formation of floccenes, and the influence of sulfur is associated with the formation of non-plastic sulfides. According to the rolling conversion, a significant effect of an increase in the temperature of rolling balls on an increase in their impact resistance was established, due to an increase in the plasticity of K76F steel in the actual rolling temperature range (an increase in the probability of defects brewing during deformation). It is determined that the total relative degree of influence of the parameters of steelmaking and rolling processing on the rejection of balls during impact resistance tests is 71%, the remaining 29% relate to the influence of the parameters of the heat treatment of balls, which is confirmed by the results of metallographic studies (quenching cracks were detected in the fracture of the balls).

Keywords: grinding balls, rail steel, impact resistance, chemical composition, microstructure, liquation

Financing. The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-29-20170, <https://rscf.ru/project/22-29>, at the expense of a grant from the Kemerovo region – Kuzbass.

For citation: Umanskii A.A., Simachev A.S., Dumova L.V., Safonov S.O. Studies of the influence of technological parameters of the production of grinding balls from the rejection of rail steel on their impact resistance. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4 (42), pp. 54 – 60. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-54-60](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-54-60)

Введение

В настоящее время одним из наиболее востребованных и высококоротабельных видов прокатной продукции являются мелющие шары повышенной твердости и ударной стойкости [1 – 6].

Поверхностная твердость мелющих шаров традиционно являлась показателем, регламентируемым в ГОСТах на производство рассматриваемого вида продукции, поскольку именно от поверхностной твердости зависит эффективность размола материалов. В действующей редакции стандарта на производство шаров (ГОСТ 7524 – 2015) в зависимости от этого показателя шары подразделяются на пять групп (табл. 1). При этом для шаров повышенных групп твердости помимо поверхностной твердости регламентируется объемная твердость. Это обусловлено отрицательным влиянием значительного перепада твердости по сечению шаров на их ударную стойкость [7 – 9].

Повышенная твердость шаров достигается за счет производства шаров из среднеуглеродистой

легированной стали и термической обработки шаров после прокатки. При этом термическая обработка включает в себя закалку с прокатного нагрева с последующим самоотпуском на воздухе или закалку (с прокатного или отдельного нагревов) с последующим низким отпуском [10, 11]. В работе [12] имеются сведения об опытно-промышленном опробовании режимов ступенчатой закалки при производстве мелющих шаров.

Необходимо отметить, что в ГОСТ 7524 – 2015 химический состав стали для производства шаров не регламентирован в узких пределах. Для различных групп твердости ограничено только минимально допустимое содержание углерода и минимальное значение углеродного эквивалента $(C_{\text{эв}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{Ni}}{40} + \frac{\text{Cu}}{14} + \frac{\text{V}}{14})$ (табл. 2). Это создает предпосылки для производства шаров из отбраковки заготовок различных марок сталей, в том числе из рельсовых сталей [13 – 16].

Т а б л и ц а 1

Распределение шаров по группам твердости по ГОСТ 7524 – 2015
Distribution of balls by hardness groups according to GOST 7524 – 2015

Диаметр шаров, мм	Значение твердости (HRC) не менее						
	на поверхности			на глубине 0,5 радиуса		на поверхности	объемная
	Группа твердости						
	1	2	3	4		5	
15 – 45	45	49	55	55	45	61	57
50 – 70	43	48	53	53	43	60	53
80 – 100	39	42	52	52	40	58	48
110 – 120	35	38	50	50	35	56	43

Требования ГОСТ 7524 – 2015 к химическому составу стали для производства мелющих шаров
Requirements of GOST 7524–2015 for the chemical composition of steel for the production of grinding balls

Диаметр шаров, мм	Группа твердости	Содержание углерода, не менее	Углеродный эквивалент, не менее
15 – 55	1, 2	0,4	0,50
	3	0,6	0,70
	4, 5		0,75
60 – 70	1, 2	0,5	0,70
	3, 4	0,6	0,75
	5		0,80
80 – 120	1, 2	0,5	0,70
	3, 4	0,6	0,75
	5		0,85

В отличие от твердости и химического состава ударная стойкость мелющих шаров в ГОСТ 7524 – 2015 не регламентирована. В стандарте имеется указание, что по согласованию между изготовителем и потребителем шары 4 и 5 групп твердости могут поставляться с контролем ударостойкости. При этом контроль ударостойкости проводят по методике изготовителя. Однако, поскольку этот показатель оказывает значительное влияние на показатели качества материалов после измельчения (расколотые мелющие шары смешиваются с основным материалом, что снижает его качество) и технико-экономические показатели размола (пониженная ударная стойкость шаров приводит к их повышенному удельному расходу), то ударную стойкость, как правило, регламентируют в заводской документации на изготовление мелющих шаров (технические условия (ТУ), стандарт организации (СТО)).

Опыт отечественных и зарубежных металлургических предприятий свидетельствует о том [17 – 19], что производство мелющих шаров, обладающих одновременно повышенной твердостью и ударной стойкостью, вызывает объективные трудности. Этот факт связан с тем, что на ударную стойкость шаров большое влияние (помимо химического состава и режимов термической обработки) оказывают такие параметры, как качество макро- и микроструктуры шаров (наличие поверхностных и внутренних дефектов, загрязненность неметаллическими включениями).

В настоящей работе представлены результаты исследований влияния комплекса технологических параметров сталеплавильного и прокатного переделов на ударную стойкость шаров производства ОАО «Гурьевский металлургический завод» из отбраковки рельсовых сталей.

Методика исследований

В качестве объектов исследований использовали не выдержавшие испытания на ударную стойкость (копровые испытания) мелющие шары диаметром 60 мм, произведенные на ОАО «Гурьевский металлургический завод» из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф.

На первом этапе провели статистические исследования технологических параметров на отбраковку шаров по результатам копровых испытаний. С использованием методики множественного регрессионного анализа исследовали влияние химического состава стали и температуры прокатки на отбраковку мелющих шаров при испытаниях на ударную стойкость. В качестве базы для анализа использовали 50 партий шаров из рельсовой стали марки К76Ф. Диапазон изменения рассматриваемых технологических факторов (функций) и параметра оптимизации, а также их статистические характеристики приведены в табл. 3.

На втором этапе провели исследования природы характерных дефектов мелющих шаров, расколотившихся при копровых испытаниях. В качестве объекта анализа использовали шары 20 партий, прокатанных из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф. Металлографические исследования проводили с использованием оптического микроскопа OLYMPUS GX-51, исследования ликвации химических элементов по сечению шаров проводили с использованием спектрометров Shimadzu XRF-1800 и ДФС-71.

Результаты исследований и их обсуждение

По полученным данным большое влияние на снижение ударной стойкости мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф оказывает повышение содержания углерода, водорода и серы в рассматриваемых пределах:

Статистические характеристики функций и параметра оптимизации для мелющих шаров из рельсовой стали марки К76Ф
Statistical characteristics of functions and optimization parameter for grinding balls made of K76F grade rail steel

Характеристика	Значение характеристики		
	область изменения	среднее значение	среднее квадратическое отклонение
Брак по результатам копровых испытаний, %	0 – 15,2	3,8	1,1
Содержание углерода в стали, %	0,75 – 0,87	0,78	0,09
Содержание водорода в стали, ppm	1,2 – 2,0	1,7	0,3
Содержание серы в стали, %	0,008 – 0,018	0,012	0,003
Содержание фосфора в стали, %	0,011 – 0,020	0,015	0,004
Содержание ванадия в стали, %	0,07 – 0,11	0,09	0,01
Содержание кремния в стали, %	0,28 – 0,41	0,35	0,04
Содержание никеля в стали, %	0,04 – 0,07	0,05	0,01
Содержание хрома в стали, %	0,04 – 0,09	0,07	0,01
Содержание меди в стали, %	0,01 – 0,05	0,03	0,01
Содержание титана в стали, %	0,001 – 0,006	0,003	0,001
Температура прокатки, °С	900 – 980	950	75

$$B_{\text{копр}} = -12,9 + 11,8[C] + 3,7[H] + 102,3[S], \quad (1)$$

где $B_{\text{копр}}$ – отбраковка шаров по результатам копровых испытаний, %; [C] и [S] – содержание углерода и серы в стали, %; [H] – содержание водорода в стали, ppm.

Влияние увеличения содержания углерода в стали на повышение отбраковки шаров по результатам копровых испытаний обусловлено образованием карбидов цементитного типа при достижении содержания углерода, соответствующего заэвтектоидной стали. При проведении металлографических исследований установлено, что в сердцевине ряда шаров присутствуют карбиды цементитного типа (рис. 1).

Из результатов химического анализа видно, что при содержании углерода в поверхностном

слое на уровне 0,78 % в сердцевине концентрация этого элемента может достигать до 0,85 %.

Влияние роста содержания водорода в стали марки К76Ф на уменьшение ударной стойкости мелющих шаров связано с образованием флокенов, что подтверждается наличием дефектов в изломе ряда расколовшихся шаров (рис. 2).

Влияние увеличения содержания серы в рассматриваемой рельсовой стали на повышение отбраковки шаров при испытаниях на ударную стойкость обусловлено образованием скоплений непластичных сульфидов.

Суммарная относительная степень влияния химического состава рельсовой стали марки К76Ф на отбраковку шаров при копровых испытаниях составила 48 %.

Согласно полученным результатам установлено значительное влияние повышения температуры прокатки шаров из стали марки К76Ф (в рассматриваемом интервале изменения параметра) на увеличение их ударной стойкости (снижение отбраковки при копровых испытаниях):

$$B_{\text{копр}} = 17,9 - 0,015[t], \quad (2)$$

где t – температура начала прокатки шаров, °С.

Влияние температуры прокатки шаров на их ударную стойкость связано с повышением пластичности стали марки К76Ф при увеличении температуры деформации в рассматриваемом интервале. По результатам ранее проведенных исследований [20] пластичность рассматриваемой рельсовой стали повышается при увеличении температуры деформации от 900 до 1150 °С. Рост пластичности приводит к увеличению веро-

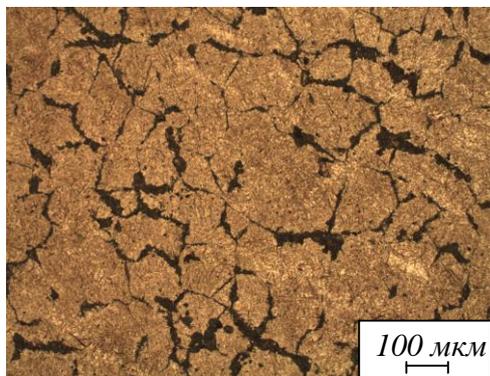


Рис. 1. Центральная зона шара из стали марки К76Ф, не выдержавшего испытания на ударную стойкость
 Fig. 1. The central zone of the ball made of K76F steel, which did not pass the impact resistance test



Рис. 2. Флокены в изломе мелющих шаров из стали марки К76Ф
Fig. 2. Flocks in the fracture of grinding balls made of steel grade K76F

ятности заваривания внутренних трещин без скоплений неметаллических включений (рис. 3), переходящих с исходных заготовок. Относительная степень влияния температуры прокатки шаров на их отбраковку при испытаниях на ударную стойкость составила 23 %.

Обобщая полученные результаты, можно констатировать, что суммарная относительная степень влияния параметров сталеплавильного и прокатного переделов на отбраковку шаров при копровых испытаниях составила 71 %. Оставшиеся 29 % необъясненной вариации относятся к влиянию параметров, не рассмотренных при проведении анализа, для которых отсутствует инструментальная фиксация в потоке производства. Исходя из результатов металлографических исследований, согласно которым в расколовшихся шарах обнаружены закалочные трещины по границам раздела фаз (рис. 4). К ним относятся режимы термической обработки (скорость охлаждения при закалке, температура охлаждающей среды).

Выводы

На основании комплекса статистических и металлографических исследований установлен характер и степень влияния технологических

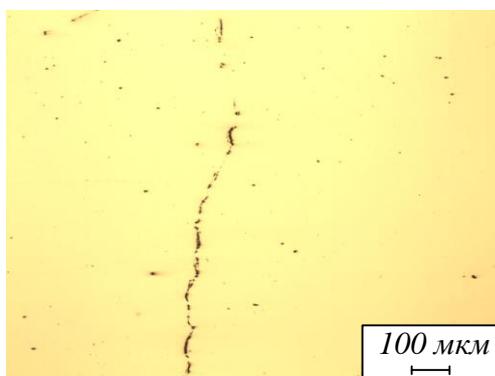


Рис. 3. Внутренние трещины в шаре из стали марки К76Ф, расколовшемся при копровых испытаниях
Fig. 3. Internal cracks in the ball made of steel grade K76F, split during the copra tests

параметров производства мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф на их ударную стойкость в условиях ОАО «Гурьевский металлургический завод». Показано, что содержание в стали углерода, водорода и серы определяют вероятность раскола шаров при копровых испытаниях на 48 %, относительная степень влияния температуры прокатки составляет 23 %, а степень влияния параметров термической обработки оценивается на уровне 29 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Абенова М.Б., Куликов В.Д., Кондратьев И.С. Качество мелющих шаров, изготовленных различными методами // Теория и технология металлургического производства. 2015. № 1 (16). С. 78–81.
2. Крутилин А.Н., Бестужев Н.И., Бестужев А.Н., Каленкович Д.Н. Мелющие тела. Проблемы. Перспективы // Литье и металлургия. 2009. № 4 (53). С. 26–33.
3. Lam M.M., Serov A.I., Smyrnov Y.N., Ternavskii A.N., Mykheiev V.V. Production of hard (class V) grinding balls at PJSC “DMPZ” // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. No. 5. P. 325–329.

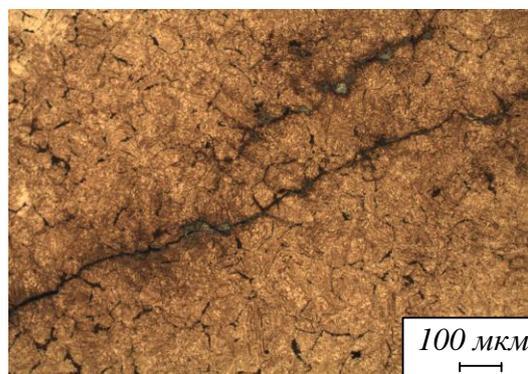


Рис. 4. Микротрещина по границам зерен в шаре из стали марки К76Ф, разрушившемся при испытании на ударную стойкость
Fig. 4. Microcrack along grain boundaries in a ball made of K76F steel, destroyed during impact resistance tests

4. Вавилкин Н.М., Челноков В.В. К выбору материала для производства мелющих шаров // Известия вузов. Черная металлургия. 2002. № 1. С. 41–46.
5. Чиж Е.В., Абенова М.Б. Выбор и анализ технологии изготовления мелющих тел // Теория и технология металлургического производства. 2016. № 2. С. 42–43.
6. Рахутин, М.Г., Бойко П.Ф. Пути совершенствования методов оценки основных характеристик мелющих шаров // Уголь. 2017. №12. С. 49–51.
7. Ефременко В.Г. Металлографический анализ причин разрушения стальных катаных тел для барабанных мельниц // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2000. № 9. С. 89–91.
8. Уманский А.А., Головатенко А.В., Шукин А.Г., Симачев А.С. Исследование влияния параметров закалочной микроструктуры мелющих шаров, произведенных методом поперечно-винтовой прокатки, на их эксплуатационные характеристики // Производство проката. 2019. № 3. С. 34–39.
9. Уманский А.А., Головатенко А.В., Темлянцев М.В., Осколкова Т.Н., Симачев А.С. Исследование качественных характеристик помольных шаров при их производстве на стане винтовой прокатки // Металлург. 2019. № 6. С. 43–46.
10. Сталинский Д.В., Рудюк А.С., Соленый В.К. Выбор материала и технологий термической обработки мелющих шаров, работающих преимущественно в условиях абразивного износа // Сталь. 2017. № 6. С. 64–69.
11. Bai X., Jin Y. Heat treatment of wear resistant steel ball for large ball mill. Jinshu Rechuli // Heat Treatment of Metals. 2017. Vol. 42. No. 5. P. 193–196.
12. Зурнаджи В.И., Ефременко В.Г., Дунаев Е.В., Лекату А., Куса Р.А. Повышение объемной твердости стальных мелющих шаров применением Q-n-P термической обработки // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2018. № 2 (74). С. 103–113.
13. Баранов Н.А., Тулупов О.Н. Производство мелющих шаров из рельсовой стали // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2017. Т. 1. С. 96–99.
14. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Andrietti S., Barbelet M. An innovative method for producing balls from scrap rail heads // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 97. No. 1-4. P. 893–901.
15. Tomczak J., Pater Z., Bulzak T. The flat wedge rolling mill for forming balls from heads of scrap railway rails // Archives of Metallurgy and Materials. 2018. Vol. 63. No. 1. P. 5–12.
16. Tomczak, J., Pater, Z., Bulzak, T. The flat wedge rolling mill for forming balls from heads of scrap railway rails // Archives of Metallurgy and Materials. 2018. Vol. 63. No. 1. P. 5–12.
17. Найзабеков, А.Б., Мухаметкалиев Б.С., Арбуз А.С., Лежнев С.Н. Снижение расхода стальных мелющих шаров путем улучшения технологии их производства // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2016. № 4 (46). С. 78–86.
18. Уманский А.А., Головатенко А.В., Осколкова Т.Н., Симачев А.С., Шукин А.Г. Исследование влияния макро- и микроструктуры стальных помольных шаров на их ударную стойкость // Известия вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 4. С. 283–289.
19. Быков П.О., Касимгазинов А.Д. Исследование и апробация технологии получения катаных помольных шаров 5 группы твердости в условиях ПФ ТОО «Кастинг» // Наука и техника Казахстана. 2018. № 1. С. 31–40.
20. Уманский А.А., Симачев А.С., Думова Л.В. Разработка технологии производства мелющих тел с повышенными эксплуатационными свойствами из отбраковки рельсовых сталей // Черные металлы. 2021. № 5. С. 57–62.

REFERENCES

1. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Abenova M.B., Kulikov V.D., Kondrat'ev I.S. The quality of grinding balls made by various methods. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2015, no.1 (16), pp. 78–81. (In Russ.).
2. Krutilin A.N., Bestuzhev N.I., Bestuzhev A.N., Kalenkovich D.N. Grinding bodies. Problems. Prospects. *Lit'e i metallurgiya*. 2009, no. 4 (53), pp. 26–33. (In Russ.).
3. Lam M.M., Serov A.I., Smyrnov Y.N., Ternavskii A.N., Mykheiev V.V. Production of hard (class V) grinding balls at PJSC “DMPZ”. *Steel in Translation*. 2017, vol. 47, no. 5, pp. 325–329.
4. Vavilkin N.M., Chelnokov V.V. To the choice of material for the production of grinding balls. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2002, no. 1, pp. 41–46. (In Russ.).
5. Chizh E.V., Abenova M.B. Selection and analysis of manufacturing technology of grinding media. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2016, no. 2, pp. 42–43. (In Russ.).
6. Rakhutin, M.G., Boiko P.F. Ways of improving methods for assessing the main characteristics of grinding balls. *Ugol'*. 2017, no. 12, pp. 49–51. (In Russ.).
7. Efremenko V.G. Metallographic analysis of the causes of destruction of rolled steel bodies for drum mills. *Vestnik Priazovskogo gosudar-*

- stvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2000, no. 9, pp. 89–91. (In Russ.).
8. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Shchukin A.G., Simachev A.S. Investigation of the influence of the parameters of the quenching microstructure of grinding balls produced by the method of cross-screw rolling on their operational characteristics. *Proizvodstvo prokata*. 2019, no. 3, pp. 34–39. (In Russ.).
 9. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Temlyantsev M.V., Oskolkova T.N., Simachev A.S. Investigation of the qualitative characteristics of grinding balls during their production at a screw rolling mill. *Metallurg*. 2019, no. 6, pp. 43–46. (In Russ.).
 10. Stalinskii D.V., Rudyuk A.S., Solenyi V.K. Choice of material and technologies for heat treatment of grinding balls operating mainly in conditions of abrasive wear. *Stal'*. 2017, no. 6, pp. 64–69. (In Russ.).
 11. Bai X., Jin Y. Heat treatment of wear resistant steel ball for large ball mill. Jinshu Rechuli. *Heat Treatment of Metals*. 2017, vol. 42, no. 5, pp. 193–196.
 12. Zurnadzhi V.I., Efremenko V.G., Dunaev E.V., Lekatu A., Kusa R.A. Increasing the volumetric hardness of steel grinding balls using Q-n-P heat treatment. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zhelezнодорожного транспорта*. 2018, no. 2 (74), pp. 103–113. (In Russ.).
 13. Baranov N.A., Tulupov O.N. Production of grinding balls from rail steel. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya*. 2017, vol. 1, pp. 96–99. (In Russ.).
 14. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Andrietti S., Barbelet M. An innovative method for producing balls from scrap rail heads. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, vol. 97, no. 1-4, pp. 893–901.
 15. Tomczak J., Pater Z., Bulzak T. The flat wedge rolling mill for forming balls from heads of scrap railway rails. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018, vol. 63, no. 1, pp. 5–12.
 16. Tomczak, J., Pater, Z., Bulzak, T. The flat wedge rolling mill for forming balls from heads of scrap railway rails. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018, vol. 63, no. 1, pp. 5–12.
 17. Naizabekov, A.B., Mukhametkaliev B.S., Arbuz A.S., Lezhnev S.N. Reducing the consumption of steel grinding balls by improving their production technology. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*. 2016, no. 4 (46), pp. 78–86. (In Russ.).
 18. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Oskolkova T.N., Simachev A.S., Shchukin A.G. Shchukin A.G. Investigation of the effect of macro- and microstructure of steel grinding balls on their impact resistance. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 4, pp. 283–289. (In Russ.).
 19. Bykov P.O., Kasimgazinov A.D. Research and approbation of technology for producing rolled grinding balls of hardness group 5 in the conditions of PF Casting LLP. *Nauka i tekhnika Kazakhstana*. 2018, no. 1, pp. 31–40. (In Russ.).
 20. Umanskii A.A., Simachev A.S., Dumova L.V. Development of technology for the production of grinding media with increased performance properties from the rejection of rail steels. *Chernye metally*. 2021, no. 5, pp. 57–62. (In Russ.).

Сведения об авторах

Александр Александрович Уманский, д.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: umanskii@bk.ru

Артём Сергеевич Симачев, к.т.н., доцент кафедры обработки металлов давлением и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: simachev_as@mail.ru

Любовь Валерьевна Думова, старший преподаватель кафедры менеджмента и отраслевой экономики, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: keup-iem@mail.ru

Сергей Олегович Сафонов, ассистент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: sergey.safonov.1950@mail.ru

Information about the authors

Aleksandr A. Umanskii, Ph.D., Associate Professor of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
Email: umanskii@bk.ru

Artem S. Simachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Department of Metalworking and Metal Science. EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University
Email: simachev_as@mail.ru

Lyubov' Valer'evna Dumova, Senior Lecturer of the Department of Management and Industrial Economics, Siberian State Industrial University
Email: keup-iem@mail.ru

Sergei Olegovich Safonov, Assistant of the Department of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
Email: sergey.safonov.1950@mail.ru

Поступила в редакцию 12.07.2022
 После доработки 15.08.2022
 Принята к публикации 18.08.2022

Received 12.07.2022
 Revised 15.08.2022
 Accepted 18.08.2022

Оригинальная статья

УДК 621:538.911:538.951

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-61-73

**ВЛИЯНИЕ ПРОТЯЖЕННОСТИ ГРАДИЕНТНОЙ ЗОНЫ
ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНОГО ИЗДЕЛИЯ СИСТЕМЫ Cu/Al НА
СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

© 2022 г. А. О. Панфилов, А. П. Зыкова, А. В. Чумаевский, А. В. Воронцов,
С. Ю. Никонов, Е. А. Колубаев

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/4)

Аннотация. Формирование функционально-градиентных материалов (ФГМ) Cu/Al со сплошным интерметаллидным поверхностным слоем методом электронно-лучевого аддитивного производства сопряжено с образованием неоднородностей и дефектов в структуре. Основные препятствия для получения стабильных и бездефектных структур ФГМ на поверхности медной основы заключаются в различии коэффициентов термического расширения меди и алюминия на границе при образовании интерметаллидов, растрескиваний и расслоений. Избежать образования трещин и расслоений позволяет формирование плавного градиента от меди к интерметаллидным слоям Cu/Al. В работе методом электронно-лучевой аддитивной технологии были получены бездефектные функционально-градиентные материалы Cu/Al с различной толщиной градиентной зоны. Исследованы структурно-фазовое состояние и механические свойства ФГМ Cu/Al по всей высоте напечатанного материала. Установлено, что градиентная зона ФГМ Cu/Al состоит из фаз α -Cu, Cu₄Al, Cu₃Al и Cu₉Al₄. Установлено, что толщина градиентной зоны влияет на объемную долю интерметаллидных фаз Cu_xAl_y, которые, в свою очередь, определяют величину относительного удлинения при постоянном значении предела прочности (305 ± 10 МПа). Значения микротвердости резко повышаются в градиентной зоне и имеют неравномерный характер распределения из-за формирования интерметаллидов Cu₄Al, Cu₃Al и Cu₉Al₄. Показано, что верхняя часть ФГМ Cu/Al, состоящая из 67 % Cu и 33 % Al (об.), демонстрирует резкое падение механических свойств, что, вероятно, связано с образованием фазы Cu₉Al₄, объемная доля которой преобладает по сравнению с другими интерметаллидными фазами системы Cu_xAl_y.

Ключевые слова: электронно-лучевая аддитивная технология, двойная подача проволоки, функционально-градиентный материал, Cu/Al, механические свойства

Финансирование. Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ НШ-1174.2022.4 и государственного задания ИФПМ СО РАН (тема FWRW-2021-0012).

Для цитирования: Панфилов А.О., Зыкова А.П., Чумаевский А.В., Воронцов А.В., Никонов С.Ю., Колубаев Е.А. Влияние протяженности градиентной зоны функционально-градиентного изделия системы Cu/Al на структурно-фазовое состояние и механические свойства // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 61 – 73. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-61-73](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-61-73)

Original article

**INFLUENCE OF THE GRADIENT ZONE EXTENT OF THE FUNCTIONAL
GRADIENT PRODUCT OF THE CU/AL SYSTEM ON THE STRUCTURAL-PHASE
STATE AND MECHANICAL PROPERTIES**

**A. O. Panfilov, A. P. Zykova, A. V. Chumaevskii, A. V. Vorontsov,
S. Y. Nikonov, E. A. Kolubaev**

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS (2/4 Academic Ave. Tomsk, 634055, Russian Federation)

Abstract. The formation of functional gradient Cu/Al materials with a continuous intermetallic surface layer by electron beam additive manufacturing is associated with the formation of a number of inhomogeneities and defects in the structure. The main obstacles to obtaining stable and defect-free FGM structures on the surface of the copper base are the difference in the coefficients of thermal expansion of copper and aluminum at the boundary with the formation of intermediates, cracks and delaminations. The formation of a smooth gradient from copper to intermetallic Cu/Al layers allows to avoid the formation of cracks and delaminations. In the work, defect-free functional gradient Cu/Al materials with different gradient zone widths were obtained using electron beam additive technology. The structural-phase state and mechanical properties of FGM Cu/Al over the entire height of the printed material are investigated. It is established that the Cu/Al gradient zone of FGM consists of the phases α -Cu, Cu₄Al, Cu₃Al and Cu₉Al₄. It is established that the width of the gradient zone affects the volume fraction of Cu_xAl_y intermetallic phases, which, in turn, determine the magnitude of the elongation at a constant value of the tensile strength (305 ± 10 MPa). The microhardness values increase sharply in the gradient zone and have an uneven distribution due to the formation of Cu₄Al, Cu₃Al and Cu₉Al₄ intermetallics. It is shown that the upper part of the Cu/Al FGM, consisting of 67 % Cu and 33 % Al (vol.), demonstrates a sharp drop in mechanical properties, which is probably due to the formation of the Cu₉Al₄ phase, the volume fraction of which prevails compared to other intermetallic phases of the Cu_xAl_y system.

Keywords: electron beam additive technology, double wire feed, functional gradient material, Cu/Al, mechanical properties

Financing. The work was carried out within the framework of the grant of the President of the Russian Federation for state support of leading scientific schools NSH-1174.2022.4 and the state task of the IFPM SB RAS (topic FWRW-2021-0012).

For citation: Panfilov A.O., Zykova A.P., Chumaevskii A.V., Vorontsov A.V., Nikonov S.Y., Kolubaev E.A. Influence of the gradient zone extent of the functional gradient product of the Cu/Al system on the structural-phase state and mechanical properties. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4 (42), pp. 61 – 73. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-61-73](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-61-73)

Введение

Функционально-градиентные материалы (ФГМ) отличаются от традиционных однородных материалов тем, что их состав и микроструктура постепенно изменяются в пространственном направлении, что обеспечивает непрерывное изменение механических, физических и химических свойств этих материалов в одном или нескольких направлениях [1 – 6]. В настоящее время ФГМ широко используются в аэрокосмической промышленности [7], медицине [8], оптоэлектронике [9], энергетике [5, 10].

Традиционными методами изготовления ФГМ являются литье, спекание в плазме разряда, осаждение из паровой фазы и самораспространяющийся синтез [11 – 13]. Однако вышеперечисленные методы имеют много недостатков, такие как невозможность изготовления нескольких частей изделия без использования дополнительных технологических операций. Основным процессом, используемым для получения ФГМ, была порошковая аддитивная металлургия, где функционально-градиентные микро-

структуры формировались путем смешивания и спекания порошковых компонентов [5, 14, 15]. Основным недостатком порошковых аддитивных методов является невозможность вмешаться в процесс изготовления изделия и изменить микроструктуру. Такая возможность появилась только с развитием проволочного аддитивного производства, когда каждый слой можно наносить при разных параметрах процесса и из разных материалов [1, 16 – 18].

Медь и алюминий – два наиболее распространенных конструкционных материала в области электроники и транспорта. На фоне энергосбережения и повышения эффективности замена меди на алюминиевый сплав способствует эффективному снижению затрат и получению экономической выгоды. Именно поэтому изучение разнородных соединений Al/Cu привлекает широкое внимание.

Обычно такие соединения получают дуговой сваркой [19, 20], сваркой трением с перемешиванием [21] и т.д. Однако из-за больших различий в физико-химических свойствах меди и алюминия при сварке часто образуются дефекты. Кроме того,

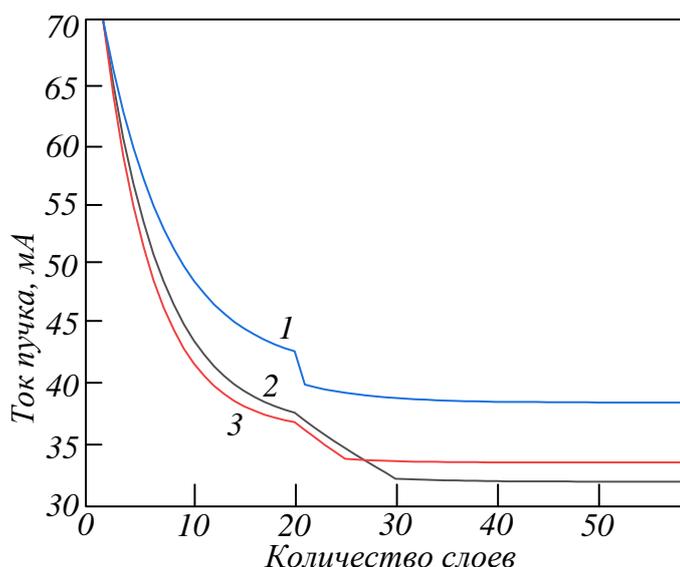


Рис. 1. Зависимость тока пучка от толщины слоя изделия из ФГМ Cu/Al с градиентом 10 мм (1), 5 мм (2) и с резким градиентом (3)

Fig. 1. Dependence of the beam current on the layer thickness of the Cu/Al FGM product with a gradient of 10 mm (1), 5 mm (2) and with a sharp gradient (3)

высокая погонная энергия вызывает появление в переходной градиентной зоне большого количества интерметаллидных соединений [21], которые могут серьезно влиять на механические свойства изделия. Для решения этих проблем дополнительно используют легирующие прослойки [22 – 24], ультразвук [25] и другие решения [26, 27].

В области аддитивного производства в литературе представлены данные только по получению различных алюминиевых сплавов, содержащих медь, либо медных сплавов, содержащих алюминий. Данных по получению ФГМ на основе Cu – Al не имеется. Ранее авторами была предпринята попытка получить функционально градиентный материал Al/Cu методом электронно-лучевого аддитивного производства с одновременной подачей двух проволок [17, 28]. Печать осуществляли медной (сплав М1) и алюминиевой (АМг5) проволоками с плавно изменяющейся скоростью подачи от 100 % меди до 100 % алюминиевого сплава. Исследования показали, что даже в условиях двухпроволочной градиентной подачи в ванну расплава возможно образование неоднородностей и расслоений в зоне структурного градиента [17, 28], что требует дополнительной работы по выбору режима изготовления образцов и марки алюминиевого сплава.

Задачи исследования: получение функционально-градиентных образцов системы Cu/Al с различной толщиной градиентной зоны методом электронно-лучевой аддитивной технологии (ЭЛАТ) с использованием медного сплава М1 и алюминиевого сплава АК12, а также изучение

влияния толщины градиентной зоны на структурно-фазовое состояние и механические свойства полученных изделий.

Материалы и методы исследования

Заготовки полиметаллических ФГМ Cu/Al были изготовлены на лабораторной установке ЭЛАТ, оснащенной двумя податчиками проволоки [28]. В качестве исходного материала использовались сварочные проволоки медного сплава М1 и алюминиевого сплава АК12 диаметром 1,2 мм. Печать образцов методом ЭЛАТ проводили в вакуумной камере. Для формирования образцов использовалась подложка из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Обе проволоки М1 и АК12 подавались в единую ванну расплава с различным соотношением объемных долей меди и алюминия. Напряжение электронного пучка в процессе печати было постоянным и составляло 30 кВ. Для формирования первых слоев полиметаллических ФГМ Cu/Al ток составлял 70 мА. Далее (по мере увеличения толщины слоя полиметаллических ФГМ Cu/Al) проводилось регулирование тока для формирования ФГМ Cu/Al без дефектов (рис. 1). Скорость перемещения стола составляла 400 мм/мин. Для формирования первых 20 слоев ФГМ Cu/Al использовали материалы в соотношении Cu:Al = 80:20. Далее для получения различной градиентной зоны (ГЗ) использовали материалы в соотношениях, указанных на рис. 2. После формирования градиентной зоны печать стенок продолжалась с соотношением Cu:Al = 67:33 (рис. 2). Необходимое процентное соотношение

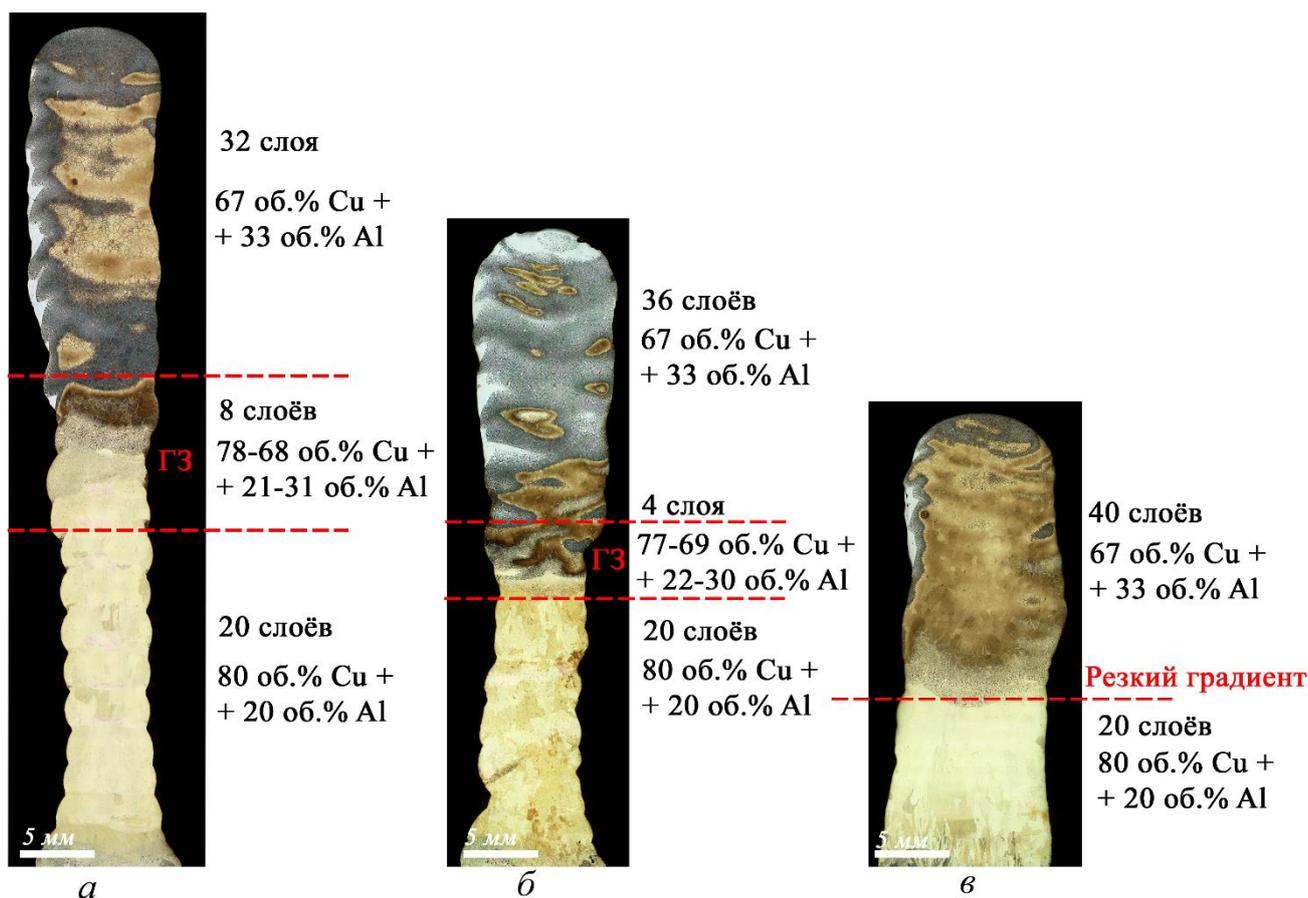


Рис. 2. Макроструктура стенок ФГМ Cu/Al в поперечном сечении со схемой нанесения слоев с градиентной зоной 10 мм (а), 5 мм (б) и с резким градиентом (в)
 Fig. 2. Microstructure of Cu/Al FGM walls in cross-section with a scheme for applying layers with a gradient zone of 10 mm (a), 5 mm (b) and with a sharp gradient (c)

меди и алюминиевого сплава поддерживалось во время наплавки автоматическим регулированием соответствующего соотношения скоростей подачи проволок. В итоге были получены три полиметаллических ФГМ Cu/Al с различной протяженностью градиентной зоны: 10, 5 мм и резким градиентом (рис. 2).

Образцы для изучения макро- и микроструктуры вырезали из выращенных вертикальных стенок с помощью электроэрозионной машины ДК7750. Для микроструктурного анализа плоские образцы были вырезаны из выращенных стенок в плоскости, перпендикулярной направлению печати. Образцы полиметаллических ФГМ Cu/Al последовательно шлифовали, полировали и травили раствором 30 мл HCl + 5 г FeCl₃·6H₂O + 60 мл H₂O.

Макроструктурные исследования проводились с использованием конфокального микроскопа OLYMPUS LEXT OLS4100. Измерения микротвердости проводили по методу Виккерса на приборе Duramin-5 при нагрузке 50 г и выдержке в течение 10 с, шаг индентирования 1 мм. Рентгенофазовый анализ (РФА) проводился для иден-

тификации фаз в трех зонах полиметаллических ФГМ Cu/Al с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 (Co K_α излучение). Для этого из каждой стенки вырезали образцы из нижней, градиентной и верхней зон. Испытания на одноосное растяжение проводили на универсальной испытательной машине УТС-110М в вертикальном направлении образцов (рис. 2).

Результаты и их обсуждение

В результате выращивания стенок ФГМ Cu/Al были получены три стенки, каждая из которых состояла из 60 слоев. Каждая стенка (рис. 2) отличается по высоте и толщине, что связано со значениями тепловложения (рис. 1), регулируемые во время печати методом ЭЛАТ. При формировании ФГМ Cu/Al с толщиной градиентной зоны 10 мм значение тока пучка изменяется от 70 до 32 мА, что позволяет формировать ФГМ с удовлетворительной формой и размерами без макродефектов (рис. 2, а). С увеличением тока пучка до 38 мА происходит расширение ванны расплава, что приводит к формированию более широких и низких по высоте ФГМ Cu/Al (рис. 1, 2, б, в).

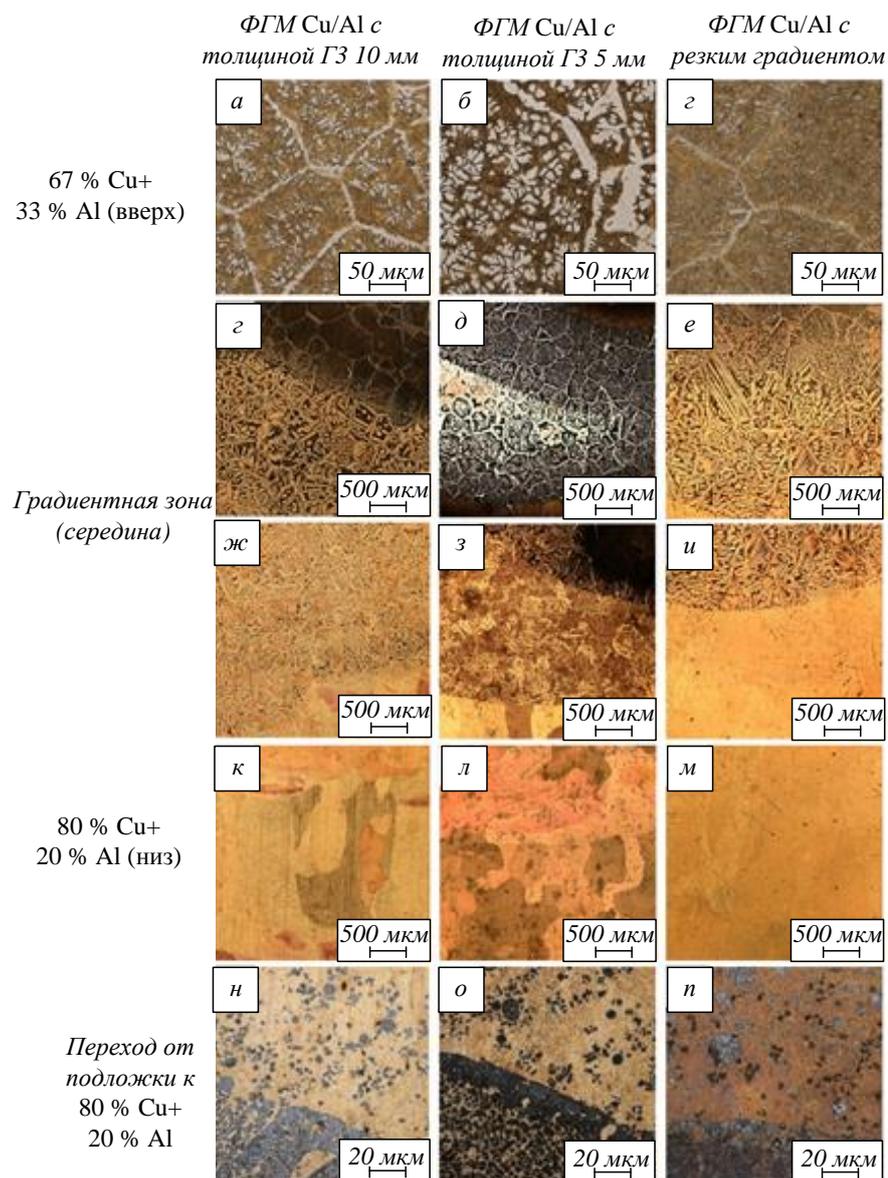


Рис. 3. Металлографические изображения структуры ФГМ Cu/Al (полученные со стенок в поперечном сечении на рис. 2) с градиентной зоной 10 мм (а, г, ж, к, н), с градиентной зоной 5 мм (б, д, з, л, о), с резким градиентом (в, е, и, м, п)
Fig. 3. Metallographic images of the Cu/Al FGM structure (obtained from the walls in cross section in Fig. 2) with a gradient zone of 10 mm ((a, г, ж, к, н), with a gradient zone of 5 mm (б, д, з, л, о), with a sharp gradient (в, е, и, м, п)

Макроструктура ФГМ Cu/Al с шириной градиентной зоны 5 мм и резким градиентом также демонстрируют отсутствие макродефектов и несплошностей: то есть подобранные соотношения Cu:Al и технологические параметры приемлемы для получения бездефектных ФГМ Cu/Al в отличие от ранее представленных в работах [17, 28].

На рис. 3 показаны изображения микроструктуры поперечного сечения ФГМ Cu/Al, полученные в разных частях наплавленных стенок. Вблизи стальной подложки можно наблюдать частицы стали и интерметаллидов (рис. 3, н – п).

Образование таких частиц обусловлено разбавлением и частичным растворением легирующих элементов стали и проволок М1 и АК12 во время формирования ванны расплава. Поэтому вероятно образование интерметаллидных

частиц Fe_xAl_y , Ni_xAl_y . Микроструктура нижней части всех ФГМ Cu/Al с объемной долей меди 80 % характеризуется разнотельностью: можно увидеть равноосные и столбчатые зерна, а также зерна различной формы (рис. 3, к – м). По данным рентгенофазового анализа нижние части всех ФГМ Cu/Al состоят из фазы α -Cu (рис. 4, а). Различия интенсивностей рефлексов для всех образцов ФГМ Cu/Al обусловлено преимущественной ориентацией зерен меди.

Увеличение объемной доли АК12 в начале формирования градиентной зоны всех ФГМ Cu/Al приводит к образованию структуры, напоминающей структуру алюминиевой бронзы [29], состоящей из дендритных зерен α -Cu, по границам которой располагается β' -фаза (Cu_3Al)

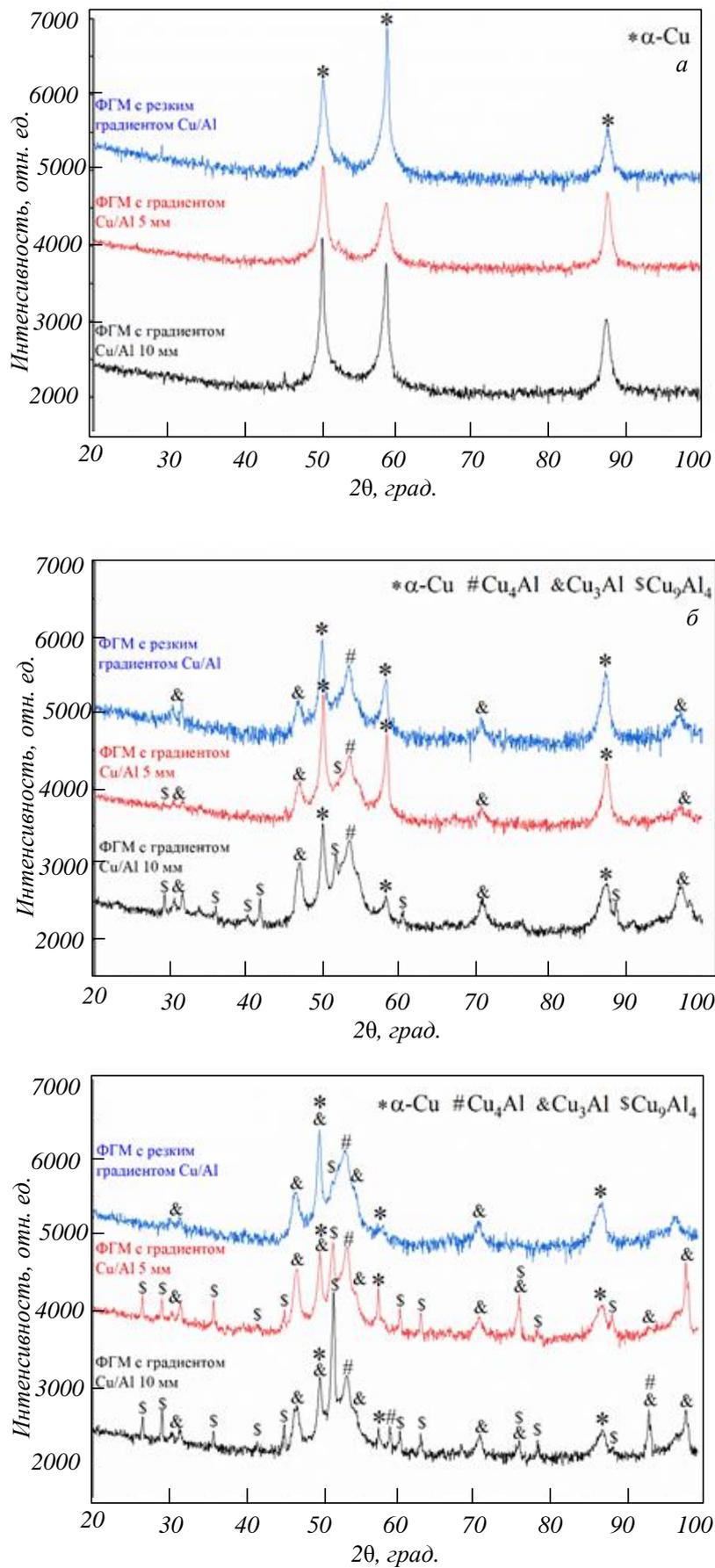


Рис. 4. Рентгенограммы ФГМ Cu/Al, полученные в нижней (а), средней (б) и в верхней (в) частях
 Fig. 4. Radiographs of FGM Cu/Al obtained in the lower (a), middle (б) and upper (в) parts

(рис. 3, ж – и). Это подтверждается данными РФА (рис. 4, б). Однако фазовый состав в градиентной зоне ФГМ Cu/Al различен (рис. 4, б). В ФГМ с резким градиентом Cu/Al и с градиентным слоем Cu/Al 5 мм наблюдаются фазы: α -Cu, Cu_4Al и Cu_3Al (рис. 4, б). Для ФГМ Cu/Al толщиной 10 мм наблюдаются фазы: α -Cu, Cu_4Al , Cu_3Al и Cu_9Al_4 (рис. 4, б). С увеличением концентрации АК12 и толщины градиентной зоны наблюдается увеличение объемных долей интерметаллидных фаз Cu_4Al , Cu_3Al и Cu_9Al_4 в градиентной зоне ФГМ Cu/Al (рис. 4, б). В целом структура градиентных зон ФГМ Cu/Al представляет собой дендритные зерна α -Cu, по границам которых расположены интерметаллиды Cu_xAl_y .

Переход от градиентной зоны к верхним слоям наплавленных материалов с еще большим содержанием АК12 (до 33 % (об.)) характеризуется изменением зеренной структуры (рис. 3, з – е). Происходит формирование равноосных зерен α -Cu (рис. 3, а – в), по границам и в теле которых формируются интерметаллидные частицы. По данным РФА в верхних слоях ФГМ Cu/Al обнаружены фазы α -Cu, Cu_4Al , Cu_3Al и Cu_9Al_4 (рис. 4, в). При этом преобладающей фазой является Cu_9Al_4 в образцах ФГМ Cu/Al с градиентной зоной 5 и 10 мм. В ФГМ Cu/Al с резким градиентом фаза Cu_9Al_4 явно не обнаруживается. Однако рентгенограмма верхней части образца ФГМ Cu/Al с резким градиентом имеет явное уширение рефлекса в угловых положениях 2θ фазы Cu_9Al_4 , что свидетельствует о фазообразовании Cu_9Al_4 в небольшом количестве (рис. 4, в). Это также подтверждается микроструктурными исследованиями (рис. 3, в): в теле равноосных зерен α -Cu можно увидеть дисперсные частицы фазы Cu_9Al_4 , размер и объемная доля которых существенно меньше по сравнению с аналогичными частицами Cu_9Al_4 в зернах α -Cu ФГМ Cu/Al с градиентом 5 и 10 мм. Таким образом, можно сделать вывод о том, что фазовый состав всех ФГМ Cu/Al идентичен и отличается только объемной долей присутствующих фаз.

Профили микротвердости ФГМ Cu/Al с различной шириной градиентной зоны представлены на рис. 5. Измерение микротвердости проводили по всей высоте образцов, включая переход от подложки к ФГМ Cu/Al. Повышенные значения микротвердости соответствуют индентированию переходного слоя подложка – ФГМ, в котором наблюдались частицы стали и интерметаллидов (рис. 5, рис. 3, н – п). В нижней части всех ФГМ Cu/Al, состоящей из фазы α -Cu, наблюдается равномерное распределение микротвердости, среднее значение которой составляет приблизительно 1 ГПа (рис. 5). При формировании градиентной зоны происходит повышение микротвердости, что связано с образованием интерметаллидов типа Cu_xAl_y . Большая неравномерность в значениях микро-

твердости в верхней части всех ФГМ Cu/Al также обусловлена формированием интерметаллидов Cu_xAl_y , твердость которых значительно выше твердости матрицы α -твердого раствора меди. В этом случае индентор микротвердомера может попадать в матрицу α -Cu, в частицы интерметаллидов Cu_xAl_y , или на границу этих фаз, что обуславливает промежуточные значения микротвердости на графике. Наибольшая микротвердость выявлена в верхней части образцов для ФГМ Cu/Al с протяженностью градиентной зоны 5 и 10 мм, в указанных случаях микротвердость достигает 5 ГПа. В верхней части образца ФГМ Cu/Al с резким градиентом перехода микротвердость составила 3,2 ГПа (рис. 5).

На основе анализа экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний на статическое одноосное растяжение, установлено, что для образца ФГМ Cu/Al с резким градиентом (рис. 6, а) достигается наибольший предел кратковременной прочности в нижней части ФГМ ($\sim 480 \pm 14$ МПа). Для образцов ФГМ Cu/Al с протяженностью градиентной зоны 5 и 10 мм значения предела кратковременной прочности составляют 420 ± 13 и 340 ± 10 МПа соответственно. При этом относительное удлинение до

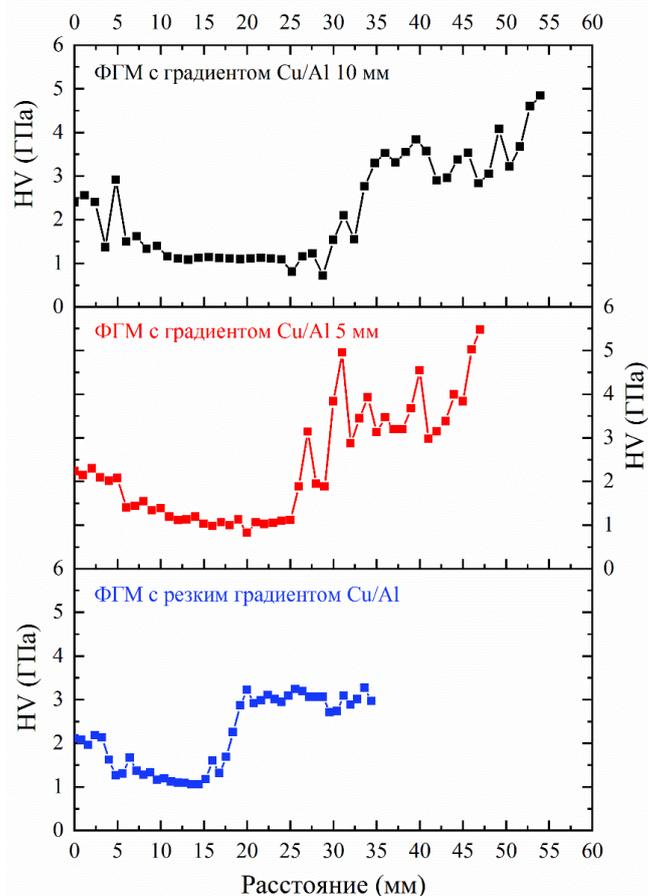


Рис. 5. Профили микротвердости ФГМ Cu/Al
Fig. 5. Microhardness profiles of FGM Cu/Al

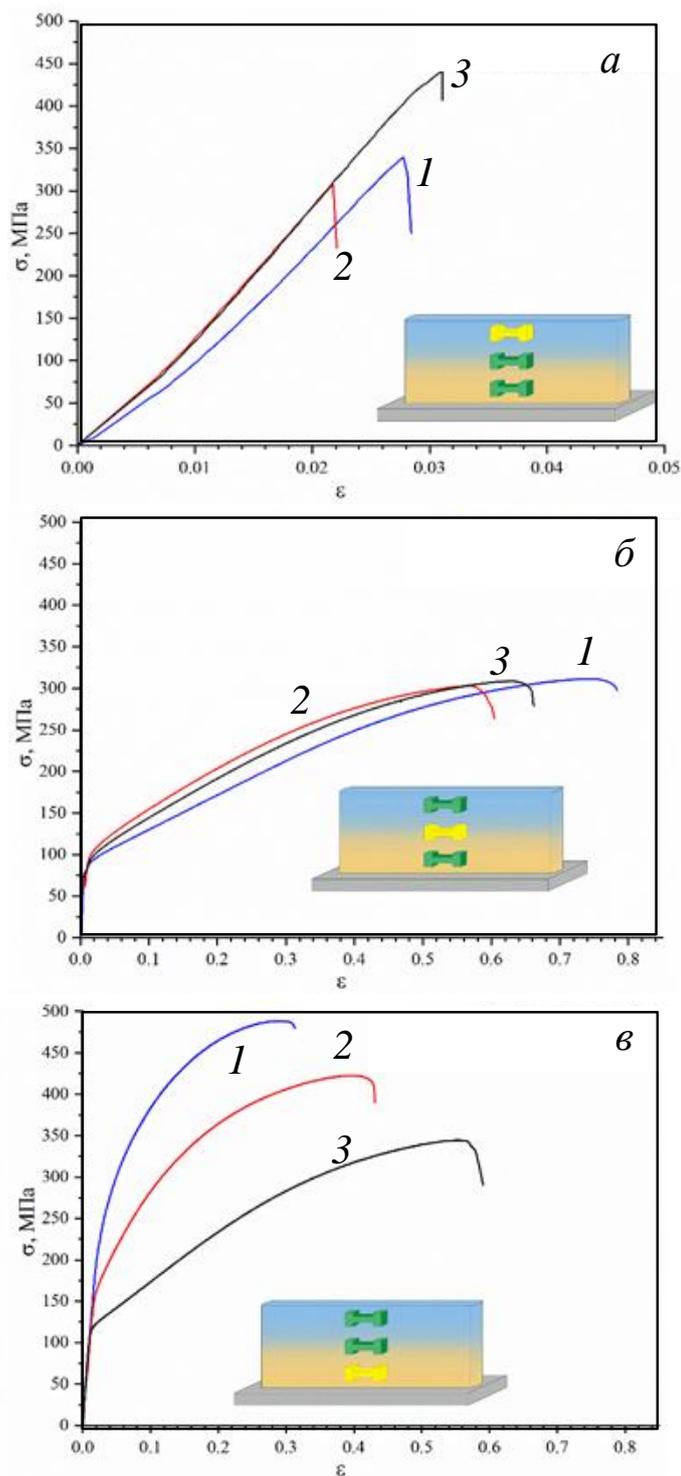


Рис. 6. Зависимости напряжение – деформация, полученные в условиях статического растяжения образцов, исследуемых в нижней (а), средней (б) и в верхней (в) частях ФГМ Cu/Al с резким градиентом (1), с градиентом 5 мм (2) и 10 мм (3)

Fig. 6. Stress–strain dependences obtained under conditions of static stretching of samples studied in the lower (a), middle (б) and upper (в) parts of the Cu/Al FGM with a sharp gradient (1), with a gradient of 5 mm (2) and 10 mm (3)

разрушения всех образцов ФГМ Cu/Al уменьшается с уменьшением протяженности градиентной зоны (рис. 6, а). Такие неоднозначные результаты анализа механических свойств в нижней части ФГМ Cu/Al могут быть обусловлены наличием частиц стали и интерметаллидов в переходной зоне от подложки к ФГМ Cu/Al. Высота ФГМ Cu/Al напрямую зависит от тока пучка, что видно по толщине формируемой ширины

переходной зоны и зоны медного сплава, обогащенного сплавом АК12. Как обнаружено при анализе микротвердости, зона медного сплава, обогащенного АК12 и свободного от частиц стали и интерметаллидов, у ФГМ с резким градиентом очень узкая (рис. 5) и увеличивается с понижением тока пучка. В градиентной зоне всех образцов ФГМ Cu/Al значения предела прочности составляют примерно 305 ± 10 МПа

(рис. 6, б). При этом относительное удлинение до разрушения образца ФГМ Cu/Al с резким градиентом наибольшее по сравнению с образцами ФГМ Cu/Al с градиентом 5 и 10 мм, что может быть связано с меньшей объемной долей интерметаллидов Cu_xAl_y . Верхняя часть всех образцов ФГМ Cu/Al характеризуется низкими значениями относительного удлинения до разрушения, что, вероятно, связано с образованием большой объемной доли фазы Cu_9Al_4 , которая преобладает по сравнению с другими интерметаллидными фазами системы Cu_xAl_y (рис. 6, в). Полученные данные свидетельствуют о том, что при получении резкого градиента от меди к композиционному материалу системы Cu/Al возможно достижение более высокой прочности композиционного материала, хотя и с пониженной микротвердостью. Это обусловлено перемешиванием каждого из последующих нанесенных слоев с предыдущими, что приводит к обеднению алюминием поверхностной зоны при формировании резкого градиента. При этом именно получение резкого градиента от основного объема изделия к поверхностным слоям потенциально имеет применимость для получения покрытий при формировании изделий аддитивным методом. По этой причине можно считать более оптимальным из образцов полученный с резким градиентом между участками с высоким и низким содержанием алюминиевого сплава.

Выводы

Методом электронно-лучевой аддитивной технологии получены бездефектные функционально-градиентные материалы Cu/Al с различной протяженностью градиентной зоны. Установлено, что градиентная зона ФГМ Cu/Al состоит из фаз α -Cu, Cu_4Al , Cu_3Al и Cu_9Al_4 , объемная доля которых зависит от условий формирования различных протяженностей градиентной зоны ФГМ. Микротвердость резко повышается в градиентной зоне и имеет неравномерный характер распределения из-за формирования различных интерметаллидов Cu_xAl_y . По результатам механических испытаний значения предела кратковременной прочности находятся в диапазоне 340 – 480 МПа для нижней части образцов ФГМ Cu/Al, состоящей из 80 % Cu и 20 % Al (об.). Значения относительного удлинения ФГМ Cu/Al зависят от толщины градиентной зоны, которая определяется объемной долей интерметаллидных фаз, но при этом предел прочности для всех ФГМ Cu/Al в градиентной зоне составляет 305 ± 10 МПа. Верхняя часть ФГМ Cu/Al, состоящая из 67 % Cu и 33 % Al (об.), демонстрирует резкое падение механических свойств,

что, вероятно, связано с образованием фазы Cu_9Al_4 , объемная доля которой преобладает по сравнению с другими интерметаллидными фазами системы Cu_xAl_y . Полученные результаты свидетельствуют о достаточно высокой степени применимости проволоочной электронно-лучевой аддитивной технологии как для получения сплавов с регулируемым составом или композиционных функционально-градиентных материалов в различных участках изделия, так и для получения покрытий с резким градиентом от основного объема изделия к поверхностному слою.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Utyaganova V, Filippov A., Tarasov S., Shamarin N., Gurianov D., Vorontsov A., Chumaevskii A., Fortuna S., Savchenko N., Rubtsov V., Kolubaev E. Characterization of AA7075/AA5356 gradient transition zone in an electron beam wire-feed additive manufactured sample // *Materials Characterization*. 2021. Vol. 172. Article 110867.
2. Chmielewski M., Pietrzak K. Metal-ceramic functionally graded materials—manufacturing // *Technical sciences*. 2016. Vol. 64. No. 1. P. 151–160.
3. Niendorf T., Leuders S., Riemer A., Brenne F., Tröster T., Albert Richard H., Schwarze D. Functionally Graded Alloys Obtained by Additive Manufacturing // *Advanced engineering materials*. 2014. Vol. 16. P. 857–861.
4. Muller P., Hascoet J.-Y., Mognol P. Toolpaths for additive manufacturing of functionally graded materials (FGM) parts // *Rapid Prototyping Journal*. 2014. Vol. 20. No. 6. P. 511–522.
5. Yi Su, Bo Chen, Caiwang Tan, Xiaoguo Song, Jicai Feng. Influence of composition gradient variation on the microstructure and mechanical properties of 316L/Inconel718 functionally graded material fabricated by laser additive manufacturing // *Journal of Materials Processing Technology*. 2020. Vol. 283. Article 116702.
6. Ghanavati R., Naffakh-Moosavy H. Additive manufacturing of functionally graded metallic materials: A review of experimental and numerical studies // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 13. P. 1628–1664.
7. Domack M.S., Baughman J.M. Development of Nickel-Titanium Graded Composition Components // *Rapid Proto. J.* 2004. Vol. 11. No. 1. P. 41–51.
8. Matsuo S., Watari F., Ohata N. Fabrication of a functionally graded dental composite resin post and core by laser lithography and finite element analysis of its stress relaxation effect on tooth root // *Dent. Mater. J.* 2021. Vol. 20. No. 4. P. 257–274.

9. Kawasaki A., Watanabe R. Thermal fracture behavior of metal/ceramic functionally graded materials // *Eng. Fract. Mech.* 2002. Vol. 69. P. 1713–1728.
10. Niino M., Kisara K., Mori V. Feasibility study of FGM technology in space solar power systems (SSPS) // *Mater. Sci. Forum.* 2005. Vol. 492. P. 163–170.
11. Loh G.H., Pei E., Harrison D., et al. An overview of functionally graded additive manufacturing // *Addit. Manuf.* 2018. Vol. 23. P. 34–44.
12. Mahamood R.M., Akinlabi E.T., Shukla M., et al. Functionally graded material: an overview // *Proc. World Cong. Eng.* 2012. Vol. 3.
13. Naebe M., Shirvanimoghaddam K. Functionally graded materials: A review of fabrication and properties // *Appl. Materials Today.* 2016. Vol. 5. P. 223–245.
14. Zhe Sun, Yuan-Hui Chueh, Lin Li. Multiphase mesoscopic simulation of multiple and functionally gradient materials laser powder bed fusion additive manufacturing processes // *Additive Manufacturing.* 2020. Vol. 35. Article 101448.
15. Xiaoji Zhang, Yuan-hui Chueh, Chao Wei, Zhe Sun, Jiawang Yan, Lin Li. Additive manufacturing of three-dimensional metal-glass functionally gradient material components by laser powder bed fusion with insitu powder mixing // *Additive Manufacturing.* 2020. Vol. 33. Article 101113.
16. Huang J., Liu G., Yu X., Wu H., Huang Y., Yu S., Fan D. Micro-structure regulation of titanium alloy functionally gradient materials fabricated by alternating current assisted wire arc additive manufacturing // *Materials & Design.* 2022. Vol. 218. Article 110731.
17. Chumaevskii A., Kalashnikova T., Gusarova A., Knjazhev E., Kalashnikov K., Panfilov A. The Structure Organization and Defect Formation of Cu-Al System Polymetallic Materials Produced by the Electron-Beam Additive Technology. In: *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE).* 2020. P. 1294–1298.
18. Osipovich K.S., Astafurova E.G., Chumaevskii A.V., et al. Gradient transition zone structure in “steel-copper” sample produced by double wire-feed electron beam additive manufacturing // *J. Mater Sci.* 2020. Vol. 55. P. 9258–9272.
19. Oliveira J.P., Crispim B., Zeng Z., Omori T., Braz Fernandes F.M., Miranda R.M. Micro-structure and mechanical properties of gas tungsten arc welded Cu-Al-Mn shape memory alloy rods // *Journal of Materials Processing Technology.* 2019. Vol. 271. P. 93–100.
20. Koteswara Rao S.R., Madhusudhana Reddy G., Kamaraj M., Prasad Rao K. Grain refinement through arc manipulation techniques in Al-Cu alloy GTA welds // *Materials Science and Engineering: A.* 2005. Vol. 404. P. 227–234.
21. Galvão I., Loureiro A., Rodrigues D.M. Critical review on friction stir welding of aluminum to copper // *Sci. Technol. Weld. Join.* 2016. Vol. 21. No. 7. P. 523–546.
22. Zhang H., Liu Xu., Zhang B., Guo Y. Enhancing the mechanical performances of friction stir lap welded Al-Zn-Mg-Cu alloy joint by promoting diffusion of alloying element Zn toward the pre-positioned Cu interlayer // *Materials Science and Engineering: A.* 2022. Vol. 832. Article 142467.
23. Paidar M., Elveny M., Mehrez S., Ravi S., Babaei B., Ravichandran M. Influence of material positioning during modified friction stir clinching brazing of Al/Zn/Cu welds // *Materials Letters.* 2021. Vol. 301. Article 130250.
24. Liu H., Zuo Y., Ji S., Dong J., Zhao H. Friction stir solid-liquid spot welding of Cu to Al assisted by Zn interlayer // *Journal of Materials Research and Technology.* 2022. Vol. 18. P. 85–95.
25. Su H., Zhao Q., Chen Ji., Wu C. Homogenizing the intermetallic compounds distribution in Al/Cu dissimilar friction stir welding joint with the assistance of ultrasonic vibration // *Materials Today Communications.* 2022. Vol. 31. Article 103643.
26. Zhao Y., You J., Qin J., Dong C., Liu L., Liu Z., Miao S. Stationary shoulder friction stir welding of Al-Cu dissimilar materials and its mechanism for improving the microstructures and mechanical properties of joint // *Materials Science and Engineering: A.* 2022. Vol. 837. Article 142754.
27. Shankar S., Chattopadhyaya S., Mehta K.P., Vilaca P. Influence of copper plate positioning, zero tool offset, and bed conditions in friction stir welding of dissimilar Al-Cu alloys with different thicknesses // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology.* 2022. Vol. 38. P. 73–83.
28. Chumaevskii A.V., Panfilov A.O., Knyazhev E.O., Zykova A.P., Gusarova A.V., Kalashnikov K.N., Vorontsov A.V., Savchenko N.L., Nikonov S.Y., Cheremnov A.M., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Production of Gradient Intermetallic Layers Based on Aluminum Alloy and Copper by Electron-beam Additive Technology. In: *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures,* 2021. P. 19–31.

29. Зыкова А.П., Панфилов А.О., Чумаевский А.В., Воронцов А.В., Никонов С.Ю., Москвичев Е.Н., Гурьянов Д.А., Савченко Н.Л., Тарасов С.Ю., Колубаев Е.А. Особенности формирования микроструктуры и механических свойств алюминиевой бронзы при различном тепловложении во время электронно-лучевой аддитивной печати // Известия вузов. Физика. 2022. № 5. С. 45–51.

REFERENCES

1. Utyaganova V., Filippov A., Tarasov S., Shamarin N., Gurianov D., Vorontsov A., Chumaevskii A., Fortuna S., Savchenko N., Rubtsov V., Kolubaev E. Characterization of AA7075/AA5356 gradient transition zone in an electron beam wire-feed additive manufactured sample. *Materials Characterization*. 2021, vol. 172, article 110867.
2. Chmielewski M., Pietrzak K. Metal-ceramic functionally graded materials—manufacturing. *Technical sciences*. 2016, vol. 64, no. 1, pp. 151–160.
3. Niendorf T., Leuders S., Riemer A., Brenne F., Tröster T., Albert Richard H., Schwarze D. Functionally Graded Alloys Obtained by Additive Manufacturing. *Advanced engineering materials*. 2014, vol. 16, pp. 857–861.
4. Muller P., Hascoet J.-Y., Mognol P. Toolpaths for additive manufacturing of functionally graded materials (FGM) parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2014, vol. 20, no. 6, pp. 511–522.
5. Yi Su, Bo Chen, Caiwang Tan, Xiaoguo Song, Jicai Feng. Influence of composition gradient variation on the microstructure and mechanical properties of 316L/Inconel718 functionally graded material fabricated by laser additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020, vol. 283, article 116702.
6. Ghanavati R., Naffakh-Moosavy H. Additive manufacturing of functionally graded metallic materials: A review of experimental and numerical studies. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021, vol. 13, pp. 1628–1664.
7. Domack M.S., Baughman J.M. Development of Nickel-Titanium Graded Composition Components. *Rapid Proto. J.* 2004, vol. 11, no. 1, pp. 41–51.
8. Matsuo S., Watari F., Ohata N. Fabrication of a functionally graded dental composite resin post and core by laser lithography and finite element analysis of its stress relaxation effect on tooth root. *Dent. Mater. J.* 2021, vol. 20, no. 4, pp. 257–274.
9. Kawasaki A., Watanabe R. Thermal fracture behavior of metal/ceramic functionally graded materials. *Eng. Fract. Mech.* 2002, vol. 69, pp. 1713–1728.
10. Niino M., Kisara K., Mori V. Feasibility study of FGM technology in space solar power systems (SSPS). *Mater. Sci. Forum*. 2005, vol. 492, pp. 163–170.
11. Loh G.H., Pei E., Harrison D., et al. An overview of functionally graded additive manufacturing. *Addit. Manuf.* 2018, vol. 23, pp. 34–44.
12. Mahamood R.M., Akinlabi E.T., Shukla M., et al. Functionally graded material: an overview. *Proc. World Cong. Eng.* 2012, vol. 3.
13. Naebe M., Shirvanimoghaddam K. Functionally graded materials: A review of fabrication and properties. *Appl. Materials Today*. 2016, vol. 5, pp. 223–245.
14. Zhe Sun, Yuan-Hui Chueh, Lin Li. Multiphase mesoscopic simulation of multiple and functionally gradient materials laser powder bed fusion additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing*. 2020, vol. 35, article 101448.
15. Xiaoji Zhang, Yuan-hui Chueh, Chao Wei, Zhe Sun, Jiwang Yan, Lin Li. Additive manufacturing of three-dimensional metal-glass functionally gradient material components by laser powder bed fusion with insitu powder mixing. *Additive Manufacturing*. 2020, vol. 33, article 101113.
16. Huang J., Liu G., Yu X., Wu H., Huang Y., Yu S., Fan D. Micro-structure regulation of titanium alloy functionally gradient materials fabricated by alternating current assisted wire arc additive manufacturing. *Materials & Design*. 2022, vol. 218, article 110731.
17. Chumaevskii A., Kalashnikova T., Gusarova A., Knjazhev E., Kalashnikov K., Panfilov A. *The Structure Organization and Defect Formation of Cu-Al System Polymetallic Materials Produced by the Electron-Beam Additive Technology*. In: *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*. 2020, pp. 1294–1298.
18. Osipovich K.S., Astafurova E.G., Chumaevskii A.V., et al. Gradient transition zone structure in “steel-copper” sample produced by double wire-feed electron beam additive manufacturing. *J. Mater. Sci.* 2020, vol. 55, pp. 9258–9272.
19. Oliveira J.P., Crispim B., Zeng Z., Omori T., Braz Fernandes F.M., Miranda R.M. Microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded Cu-Al-Mn shape memory alloy rods. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019, vol. 271, pp. 93–100.
20. Koteswara Rao S.R., Madhusudhana Reddy G., Kamaraj M., Prasad Rao K. Grain refinement through arc manipulation techniques in Al-Cu

- alloy GTA welds. *Materials Science and Engineering: A*. 2005, vol. 404, pp. 227–234.
21. Galvão I., Loureiro A., Rodrigues D.M. Critical review on friction stir welding of aluminum to copper. *Sci. Technol. Weld. Join.* 2016, vol. 21, no. 7, pp. 523–546.
 22. Zhang H., Liu Xu., Zhang B., Guo Y. Enhancing the mechanical performances of friction stir lap welded Al-Zn-Mg-Cu alloy joint by promoting diffusion of alloying element Zn toward the pre-positioned Cu interlayer. *Materials Science and Engineering: A*. 2022, vol. 832, pp. 142467.
 23. Paidar M., Elveny M., Mehrez S., Ravi S., Babaei B., Ravichandran M. Influence of material positioning during modified friction stir clinching brazing of Al/Zn/Cu welds. *Materials Letters*. 2021, vol. 301, article 130250.
 24. Liu H., Zuo Y., Ji S., Dong J., Zhao H. Friction stir solid-liquid spot welding of Cu to Al assisted by Zn interlayer. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022, vol. 18, pp. 85–95.
 25. Su H., Zhao Q., Chen Ji., Wu C. Homogenizing the intermetallic compounds distribution in Al/Cu dissimilar friction stir welding joint with the assistance of ultrasonic vibration. *Materials Today Communications*. 2022, vol. 31, article 103643.
 26. Zhao Y., You J., Qin J., Dong C., Liu L., Liu Z., Miao S. Stationary shoulder friction stir welding of Al-Cu dissimilar materials and its mechanism for improving the microstructures and mechanical properties of joint. *Materials Science and Engineering: A*. 2022, vol. 837, article 142754.
 27. Shankar S., Chattopadhyaya S., Mehta K.P., Vilaca P. Influence of copper plate positioning, zero tool offset, and bed conditions in friction stir welding of dissimilar Al-Cu alloys with different thicknesses. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2022, vol. 38, pp. 73–83.
 28. Chumaevskii A.V., Panfilov A.O., Knyazhev E.O., Zykova A.P., Gusarova A.V., Kalashnikov K.N., Vorontsov A.V., Savchenko N.L., Nikonov S.Y., Cheremnov A.M., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. *Production of Gradient Intermetallic Layers Based on Aluminum Alloy and Copper by Electron-beam Additive Technology*. In: *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2021, pp. 19–31.
 29. Zykova A.P., Panfilov A.O., Chumaevskii A.V., Vorontsov A.V., Nikonov S.Yu., Moskvichev E.N., Gur'yanov D.A., Savchenko N.L., Tarasov S.Yu., Kolubaev E.A. Features of the formation of the microstructure and mechanical properties of aluminum bronze with different heat input during electron beam additive printing. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2022, no. 5, pp. 45–51. (In Russ.).

Сведения об авторах

Александр Олегович Панфилов, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории структурного дизайна перспективных материалов, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
Email: alexpl@ispms.ru
ORCID: 0000-0001-8648-0743

Анна Петровна Зыкова, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, заведующий лабораторией структурного дизайна перспективных материалов, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
Email: zyковаар@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8779-3784

Андрей Валерьевич Чумаевский, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории локальной металлургии в аддитивных технологиях, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
Email: tch7av@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1983-4385

Андрей Владимирович Воронцов, к.т.н., научный сотрудник лаборатории локальной металлургии в аддитивных технологиях, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
Email: vav@ispms.ru
ORCID: 0000-0002-4334-7616

Сергей Юрьевич Никонов, к.ф.-м.н., ведущий инженер лаборатории физики упрочнения поверхности, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
Email: sergrff@ngs.ru
ORCID: 0000-0001-9431-0226

Евгений Александрович Колубаев, д.т.н., заведующий лабораторией локальной металлургии в аддитивных технологиях, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
Email: eak@ispms.tsc.ru
ORCID: 0000-0001-7288-3656

Information about the authors

Aleksandr O. Panfilov, postgraduate student, Junior researcher at the Laboratory of Structural Design of Advanced Materials, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
Email: alexpl@ispms.ru
ORCID: 0000-0001-8648-0743

Anna P. Zykova, Cand. Sci. (Phys.-math.), Senior Researcher, Head of the Laboratory of Structural Design of Advanced Materials, Institute of Strength Physics and

Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

Email: zykovaap@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8779-3784

Andrey V. Chumaevskii, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Laboratory of Local Metallurgy in Additive Technologies, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

Email: tch7av@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1983-4385

Andrey V. Vorontsov, Cand. Sci. (Eng.), Researcher at the Laboratory of Local Metallurgy in Additive Technologies, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

Email: vav@ispms.ru

ORCID: 0000-0002-4334-7616

Sergey Yu. Nikonov, Cand. Sci. (Phys.-math.), leading engineer of the Surface hardening Physics Laboratory,

Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

Email: sergrff@ngs.ru

ORCID: 0000-0001-9431-0226

Evgenii A. Kolubaev, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Laboratory of Local Metallurgy in Additive Technologies, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Email: eak@ispms.tsc.ru

ORCID: 0000-0001-7288-3656

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 02.09.2022

После доработки 19.09.2022

Принята к публикации 22.09.2022

Received 02.09.2022

Revised 19.09.2022

Accepted 22.09.2022

Оригинальная статья

УДК 620.19

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-74-79

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЛИКВАЦИЮ УГЛЕРОДА
В ОТЛИВКАХ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛИТЬЕМ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ**

© 2022 г. А. И. Аугсткалн, М. А. Гурьев, С. Г. Иванов

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (Россия, 656038, Барнаул, пр. Ленина, 46)

Аннотация. Науглероживание поверхностей стальных отливок, полученных литьем по газифицируемым моделям, является одной из основных и наиболее значимых проблем применения данного способа литья. В работе проведены эксперименты по снижению ликвации углерода в отливках из стали 20ГЛ с толщиной стенки 15 мм путем проведения термической обработки (нормализации) по двум режимам, а также проведена оценка влияния модификатора FIL-1 (Россия) на структуру отливок. Рассмотрены структуры до термической обработки и после нее. Установлено, что до термообработки образцы из стали 20ГЛ без модификатора имеют наибольший науглероженный слой (до 2 мм), тогда как в образцах с модификатором этот показатель не превышает 0,8 мм. Установлен оптимальный режим термообработки для модифицированных образцов (нормализация при температуре 950 °С и выдержка в течение 1 ч), приводящий к распределению углерода из науглероженной поверхности образцов по всему их сечению, измельчению структуры и переход ее в равновесное состояние.

Ключевые слова: сталь, отливка, термообработка, ликвация, углерод, микроструктура, модифицирование, литье по газифицируемым моделям

Благодарности: исследования выполнены в Центре коллективного пользования АлтГТУ.

Для цитирования: Аугсткалн А.И., Гурьев М.А., Иванов С.Г. Влияние термообработки на ликвацию углерода в отливках, полученных литьем по газифицируемым моделям // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 74 – 79. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-74-79](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-74-79)

Original article

**THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON CARBON LIQUATION IN CASTINGS
OBTAINED BY CASTING GASIFIED MODELS**

© 2022 A. I. Augstkaln, M. A. Guryev, S. G. Ivanov

Polzunov Altai State Technical University (Lenin Avenue, 46Russia, 656038, Barnaul, Russian Federation)

Abstract. Carburization of the surfaces of steel castings obtained by casting according to gasified models is one of the main and most significant problems of using this casting method. In the work, experiments were carried out to reduce carbon liquation in castings made of 20GL steel with a wall thickness of 15 mm by carrying out heat treatment (normalization) in two modes, and the influence of the FIL-1 modifier (Russia) on the structure of castings was evaluated. The structures were examined before and after heat treatment. It was found that before the heat treatment, samples made of 20GL steel without a modifier have the largest carbonized layer (up to 2 mm), whereas in samples with a modifier this indicator does not exceed 0.8 mm. The optimal heat treatment mode for modified samples was established (normalization at a temperature of 950 °C and holding for 1 hour), leading to the distribution of carbon from the carbonized surface of the samples over their entire cross section, refining of the structure and its transition to an equilibrium state.

Keywords: steel, casting, heat treatment, liquation, carbon, microstructure, modification, casting according to gasified models

Acknowledgements: The research was carried out at the Center for Collective Use of AltSTU.

For citation: Augstkaln A.I., Guryev M.A., Ivanov S.G. The effect of heat treatment on carbon liquation in castings obtained by casting gasified models. *Bulletin of Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4 (42), pp. 74 – 79. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-74-79](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-74-79)

Введение

Технология литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) лишь на первый взгляд является простой и обладает широкими возможностями. Достаточно сказать, что с момента получения простого (в некоторых случаях и сложного) чертежа отливки до момента полного ее изготовления требуется 24 ч. Преимущества ЛГМ: изготовление отливок без уклонов (или с отрицательными уклонами); возможность проведения сложного модифицирования, микролегирования и поверхностного упрочнения литых изделий без значительных затрат с внесением модифицирующих или легирующих материалов в пенополистирол; нанесение упрочняющих составов непосредственно на поверхность модели [1 – 3]. Все эти процессы можно автоматизировать с высокой степенью и с минимальными затратами.

Однако образующиеся продукты деструкции газифицируемой модели (газы и твердые частицы) в процессе заполнения формы металлом оказывают влияние на химический состав стали и на формирование физико-механических свойств отливок. В результате сложных процессов взаимодействия в системе модель – металл – форма происходит науглероживание поверхности и тела отливки, что сильно ограничивает применение ЛГМ для получения отливок из низкоуглеродистых и углеродистых сталей. При этом толщина науглероженного слоя изменяется неравномерно и зависит от положения отливки в форме, от материала модели и ее насыпной плотности, давления в форме и его распределения по опоке-контейнеру, температуры заливаемого расплава, скорости заливки и так далее [4, 5].

Можно выделить основные способы снижения ликвации углерода в поверхностной зоне отливки и по ее сечению:

- изготовление сложной литниковой системы [6, 7];
- удаление модели из формы выжиганием непосредственно перед заливкой формы [8, 9];
- использование различных модификаторов для расплава стали или чугуна с целью понижения температуры расплава перед заливкой и снижению тем самым способности быстро растворять углерод в процессе деструкции модели;

– применение различных режимов термической обработки [10].

Целью настоящей работы является изучение влияния температуры нормализации на снижение ликвации углерода на литых образцах толщиной 15 мм из стали 20ГЛ (ГОСТ 977 – 88), а также оценка влияния модифицирования на структуру литых заготовок.

Получение образцов

Для получения моделей образцов использовали пенополистирол повышенной активности марки Н-4S (Нидерланды) с содержанием пентана 7,02 % и диаметром гранул в исходном состоянии 0,3 – 0,6 мм. Насыпная плотность после предварительного вспенивания 20 кг/м³. Модели образцов получали спеканием гранул в пресс-форме в автоклаве ГК-100-3М при давлении пара 0,2 МПа. Крепление моделей к литниковой системе из того же материала осуществляли пайкой. Перед формовкой модельные кусты обрабатывали огнеупорным покрытием FRD-S (Россия) окунанием, вязкость краски 16 с по вискозиметру ВЗФ-6. Сушку блоков до постоянной массы осуществляли при температуре 45 – 50 °С.

Формовку осуществляли в вакуумируемых опоках-контейнерах размерами 1000×1000×1000 мм. В качестве формовочного материала использовали кварцевый песок марки 2К2О203 (ГОСТ 2138 – 91). В работе применяли водокольцевой насос ВВН1-12 (Россия) производительностью 12 м³/мин, а для стабилизации процесса вакуумирования – ресивер объемом 1 м³.

Получение расплава стали осуществляли в индукционной плавильной печи с набивным тиглем (нейтральная футеровка) емкостью 500 кг. Форму заливали равномерной непрерывной струей из поворотного ковша емкостью 250 кг. Температура металла на начало заливки составляла 1570 – 1590 °С. Химический состав стали определяли с помощью эмиссионного спектрометра «АРГОН-5СФ».

После заливки в течение 3 мин форма находилась под вакуумом. Через 30 минут после заливки форму выбивали и очищали в дробебетном аппарате Q320 (Китай).

Все полученные образцы были распределены на следующие группы:

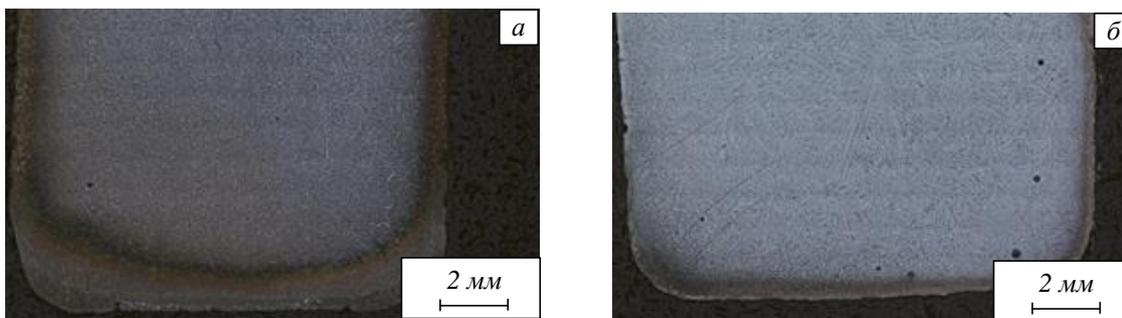


Рис. 1. Макроструктура образцов без модификатора (а) и с модификатором (б)
 Fig. 1. Macrostructure of samples without a modifier (a) and with modifier (b)

1 – без термической обработки; 2 – термообработка по режиму 1 (нагрев до 880 °С, выдержка в течение 2 ч, охлаждение на воздухе); 3 – термообработка по режиму 2 (нагрев до 950 °С, выдержка в течение 1 ч, охлаждение на воздухе). При этом половина полученных образцов в процессе подготовки расплава была обработана флюсо-модифицирующим комплексом FIL-1 (Россия).

Методы и принципы исследования

Металлографические исследования проводили с использованием методов оптической микроскопии. Применяли программно-аппаратный комплекс ThixometPro® (включает программное обеспечение Thixomet® и инвертированный оптический микроскоп CarlZeissAxioObserver Z1m) [11, 12].

Вырезку образцов для исследования микроstructures проводили с помощью прецизионного отрезного станка MICRACUT–201 без перегрева исследуемой плоскости. Место вырезки выбирали таким образом, чтобы можно было оценить величину науглероживания как на боковой поверхности, так и в верхней части образца.

Полученные образцы запрессовывали в бакелитовый компаунд с помощью автоматического программируемого пресса METAPRESS, после чего осуществляли шлифовку на автоматическом шлифовально-полировальном станке DIGIPREP по методикам, описанным в работах [13 – 15].

При подготовке проб использовали набор дисков шлифовальной бумаги с различной зернистостью. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости применяли воду. Полировку осуществляли на полировочных кругах с периодической подачей алмазной суспензии зернистостью 9, 6, 3, 1 мкм. Для травления поверхности шлифов использовался 4 %-ый раствор азотной кислоты в этиловом спирте, а также пересыщенный раствор щелочного пикрата натрия.

Обсуждение основных результатов

На рис. 1 представлены панорамные изображения микроstructures стальных образцов в литом состоянии с внесенным в расплав модификатором и без него.

На представленных изображениях хорошо видно, что модификатор оказывает влияние на структуру образца, а также влияет и на распределение углерода по сечению. В образце без модификатора толщина науглероженного слоя наибольшая и достигает 2 мм, тогда как в образце с модификатором она не превышает 0,8 мм, а в некоторых частях отливки и полностью отсутствует.

В образце без модификатора на глубине 700 – 800 мкм структура практически полностью состоит из перлита (рис. 2).

После проведения нормализации по режиму 1 (рекомендован ГОСТ) структура образцов представлена на рис. 3. Видно, что для образцов как без модификатора, так и с модификатором нормализация с температуры 880 °С не оказала значительного влияния на науглероженный слой. Однако становится хорошо заметно, что структура образца при применении модификатора значительно мельче, чем без него.

Структура образцов, прошедших нормализацию по режиму 2, представлена на рис. 4.

На представленных изображениях (рис. 4) хорошо видно, что у обоих образцов науглероженного у поверхности слоя практически нет. Структура образца с модификатором равновесная, перлит и феррит распределены равномерно (рис. 4, б). Нет и как такового обезуглероженного слоя, свойственного отливкам и другим изделиям после термической обработки в камерных печах без защитной атмосферы. В образцах без модификатора (рис. 4, а) также прошли значительные изменения: количество перлита в поверхностной зоне уменьшилось. Заметно также, что структура не стала полностью равновесной: феррит и перлит распределены неравномерно.

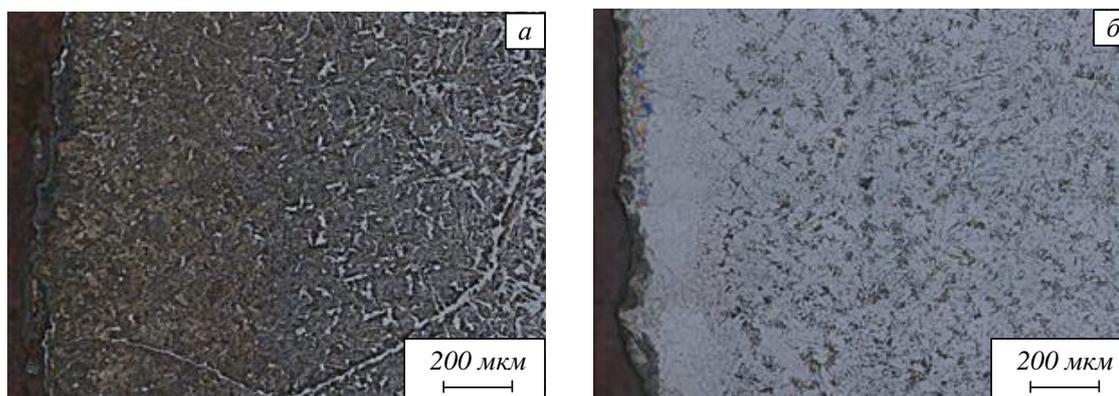


Рис. 2. Структура боковой поверхности без модификатора (а) и с модификатором (б) до термообработки
Fig. 2. The structure of the lateral surface without a modifier (a) and with modifier (b) before heat treatment

Выводы

Образцы стали 20ГЛ без модификатора обладают наибольшим науглероженным слоем, который достигает 2 мм, тогда как в образцах с модификатором FIL-1 толщина слоя не превышает 0,8 мм.

Нормализация при температуре 880 °С и выдержка в течение 2 ч являются не эффективными, так как не наблюдается перераспределения углерода в поверхностных слоях отливок, то есть нет снижения ликвации углерода.

Нормализация при температуре 950 °С и выдержка в течение 1 ч приводит к перераспределению углерода из науглероженной поверхности образцов по всему их сечению, измельчению структуры и переходу ее в равновесное состояние. Однако для образцов без модификатора время выдержки при такой температуре необходимо увеличивать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ворошнин Л.Г. Борирование промышленных сталей и чугунов. Минск: Беларусь, 1981. 205 с.
2. Гурьев М.А. Упрочнение литых деталей поверхностным легированием на основе бора // Ползуновский альманах. 2009. № 2. С. 46–47.
3. Гурьев М.А., Иванов С.Г., Черных Е.В. Поверхностное легирование деталей в процессе их производства методом литья по газифицируемым моделям // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2015. Т. 12. № 4. С. 429–431.
4. Гурьев М.А. Повышение износостойкости деталей машин и инструмента поверхностным легированием при производстве литых изделий: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2010. 191 с.
5. Кондратьев С.Ю., Хайдоров А.Д. Науглероживание стальных отливок, получаемых литьем по газифицируемым моделям // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2014. № 4 (207). С. 117–126.
6. Морозов В.А. Изготовление стальных отливок литьем по газифицируемым моделям //



Рис. 3. Структура образцов боковой поверхности без модификатора (а) и с модификатором (б) после нормализации по режиму I
Fig. 3. The structure of the samples of the lateral surface without a modifier (a) and with modifier (b) after normalization according to mode I

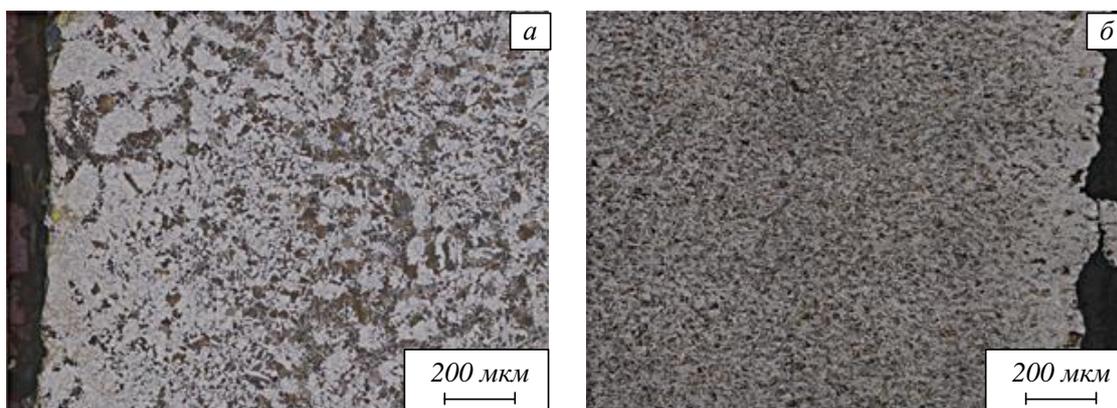


Рис. 4. Структура образцов боковой поверхности без модификатора (а) и с модификатором после нормализации по режиму 2

Fig. 4. The structure of the samples of the lateral surface without a modifier (a) and with modifier (b) after normalization according to mode 2

- Литейное производство. 2015. № 5. С. 29–31.
7. Морозов В.А. Некоторые вопросы технологии литья стали по газифицируемым моделям // Литейное производство. 2016. № 1. С. 32–35.
 8. Шуляк В.С. Литье по газифицируемым моделям. СПб.: НПО «Профессионал», 2007. 408 с.
 9. Озеров В.А., Шуляк В.С., Плотников Г.А. Литье по моделям из пенополистирола. М.: Машиностроение, 1970. 183 с.
 10. Ерболатов А.Е., Гурьев М.А., Иванов С.Г., Аугсткалин А.И. Особенности структуры тонких образцов из стали 20ГЛ, полученных литьем по газифицируемым моделям // Ползуновский вестник. 2022. № 2. С. 139–144. doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.02.019
 11. Kazakov A.A., Kiselev D. Industrial Application of Thixomet // *Metallography. Microstructure and Analysis*. 2016. No. 5. P. 294–301. doi.org/10.1007/s13632-016-0289-6
 12. Kazakov A.A., Kiselev D. Industrial application of thixomet image analyzer for quantitative description of steel and alloys microstructure // *Microscopy and Microanalysis*. 2015. Vol. 21. No. 3. P. 457–458. doi.org/10.1017/S1431927615003086
 13. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Земляков С.А., Гурьев М.А., Романенко В.В. Особенности методики подготовки образцов для автоматического анализа карбидной фазы стали Х12Ф1 после цементации в вакууме с применением программного комплекса "ThixometPro" // Ползуновский вестник. 2020. № 2. С. 165–168. doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.031
 14. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Земляков С.А., Гурьев М.А. Методика пробоподготовки образцов высоколегированных сталей для автоматического анализа карбидной фазы // Ползуновский вестник. 2020. № 3. С. 102–105. doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.03.018
 15. Kazakov A.A., Ryaboshuk S.V., Lyubochko D.A., Chigintsev L.S. Research on the origin of nonmetallic inclusions in high-strength low-alloy steel using automated feature analysis // *Microscopy and Microanalysis*. 2015. Vol. 21. No. 3. P. 1755–1756. doi.org/10.1007/s13632-015-0095-1

REFERENCES

1. Voroshnin L.G. *Borating of industrial steels and cast iron*. Minsk: Belarus', 1981, 205 p. (In Russ.).
2. Gur'ev M.A. Hardening of cast parts by surface alloying based on boron. *Polzunovskii al'manakh*. 2009, no. 2, pp. 46–47. (In Russ.).
3. Gur'ev M.A., Ivanov S.G., Chernykh E.V. Surface alloying of parts in the process of their production by casting according to gasified models. *Fundamental problems of modern materials science*. 2015, vol. 12, no. 4, pp. 429–431. (In Russ.).
4. Gur'ev M.A. *Increasing the wear resistance of machine parts and tools by surface alloying in the production of cast products*: dis. ... candidate of Technical Sciences. Barnaul: diss. ... kand. tekhn. nauk. Barnaul, 2010, 191 p. (In Russ.).
5. Kondrat'ev S.Yu., Khaidorov A.D. Carburization of steel castings obtained by casting according to gasified models. *Scientific and Technical Journal of St. Petersburg State Poly-*

- technical University*. 2014, no. 4 (207), pp. 117–126. (In Russ.).
6. Morozov V.A. Production of steel castings by casting according to gasified models. *Foundry production*. 2015, no. 5, pp. 29–31. (In Russ.).
 7. Morozov V.A. Some questions of the technology of casting steel according to gasified models. *Foundry production*. 2016, no. 1, pp. 32–35. (In Russ.).
 8. Shulyak B.C. *Casting on gasified models*. SPb.: NPO «Professional», 2007, 408 p. (In Russ.).
 9. Ozerov V.A., Shulyak V.S., Plotnikov G.A. *Casting on models made of expanded polystyrene*. Moscow: Mashinostroenie, 1970, 183 p. (In Russ.).
 10. Erbolatov A.E., Gur'ev M.A., Ivanov S.G., Augstkaln A.I. Structural features of thin 20GL steel samples obtained by casting using gasified models. *Polzunovskii vestnik*. 2022, no. 2, pp. 139–144. (In Russ.). doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.02.019
 11. Kazakov A.A., Kiselev D. Industrial Application of Thixomet. *Metallography. Microstructure and Analysis*. 2016, no. 5, pp. 294–301. doi.org/10.1007/s13632-016-0289-6
 12. Kazakov A.A., Kiselev D. Industrial application of thixomet image analyzer for quantitative description of steel and alloys microstructure. *Microscopy and Microanalysis*. 2015, vol. 21, no. 3, pp. 457–458. doi.org/10.1017/S1431927615003086
 13. Ivanov S.G., Gur'ev A.M., Zemlyakov S.A., Gur'ev M.A., Roma-nenko V.V. Features of the method of sample preparation for automatic analysis of the carbide phase of steel X12F1 after cementation in vacuum using the software package "ThixometPro". *Polzunovskii vestnik*. 2020, no. 2, pp. 165–168. (In Russ.). doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.031
 14. Ivanov S.G., Gur'ev A.M., Zemlyakov S.A., Gur'ev M.A. Methodology of sample preparation of high-alloy steel samples for automatic analysis of the carbide phase. *Polzunovskii vestnik*. 2020, no. 3, pp. 102–105. (In Russ.). doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.03.018
 15. Kazakov A.A., Ryaboshuk S.V., Lyubochko D.A., Chigintsev L.S. Research on the origin of nonmetallic inclusions in high-strength low-alloy steel using automated feature analysis. *Microscopy and Microanalysis*. 2015, vol. 21, no. 3, pp. 1755–1756. doi.org/10.1d0o1i:

71/OS.1041371/9S21746311590207965155100
9551

Сведения об авторах

Артур Игоревич Аугсткалн, аспирант кафедры «Физика», Алтайский государственный университет им. И.И. Ползунова
E-mail: augstkaln-a@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-7659-3987

Михаил Алексеевич Гурьев, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование», Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
E-mail: gurievma@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9191-1787

Сергей Геннадьевич Иванов, д.т.н., заведующий лабораторией микроскопии, заведующий кафедрой «Машиностроительные технологии и оборудование», Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
E-mail: serg225582@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5965-0249

Information about the authors

Artur I. Augstkaln, post-graduate student of the Department of Physics, Polzunov Altai State Technical University
E-mail: augstkaln-a@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-7659-3987

Mikhail A. Guryev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment», Polzunov Altai State Technical University
E-mail: gurievma@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9191-1787

Sergey G. Ivanov, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Microscopy Laboratory, Head of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Polzunov Altai State Technical University
E-mail: serg225582@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5965-0249

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 30.08.2022

После доработки 02.09.2022

Принята к публикации 05.09.2022

Received 30.08.2022

Revised 02.09.2022

Accepted 05.09.2022

Оригинальная статья

УДК 669.295:544.022

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-80-85

**ГОРЯЧАЯ ПРОКАТКА И МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ КОМПОЗИТА Ti/TiB,
ПОЛУЧЕННОГО ИСКРОВОМ ПЛАЗМЕННЫМ СПЕКАНИЕМ**

© 2022 г. М. С. Озеров, В. С. Соколовский, Е. А. Поволяева, Е. И. Ноздрачева, С. В. Жеребцов

Белгородский государственный национальный исследовательский университет (Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, 85)

Аннотация. Металломатричный композит Ti/TiB был получен методом искрового плазменного спекания при температуре 1000 °С. В исходном состоянии микроструктура композита Ti/TiB состояла из игольчатых волокон TiB, неравномерно распределенных в матрице титана. РЭМ показала, что видимый диаметр волокон TiB варьировался в широком диапазоне: от десятков до нескольких сотен нанометров. Средний диаметр волокон TiB в исходном состоянии составляет 163 ± 35 нм. Горячая прокатка привела к выравниванию фрагментированных частиц-волокон TiB в направлении прокатки. Видимая средняя длина волокон TiB уменьшилась с 8 ± 4 до $3,0 \pm 1,2$ мкм, вероятно, в результате обрыва волокон при деформации. Установлено, что после горячей прокатки композит обладает повышенным пределом текучести и значительно улучшенными показателями пластичности по сравнению с исходным состоянием: горячекатаный образец разрушился при степени деформации на сжатие 25 %, тогда как пластичность для исходного состояния составляла 12 %. Предел текучести составил 930 и 1200 МПа для исходного и горячекатаного состояний. Прогнозируемая теоретическая прочность, рассчитанная путем суммирования вклада всех механизмов упрочнения, составляет 1946 МПа, что выше экспериментального значения 1200 МПа. Дисперсионное упрочнение обломками волокон TiB вносит наиболее заметный вклад в общую прочность композита (934 МПа или 50 %).

Ключевые слова: металломатричный композит, искровое плазменное спекание, бориды, микроструктура, механические свойства, растровая электронная микроскопия, механизмы упрочнения

Благодарности: работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования Белгородского государственного национального исследовательского университета «Технологии и материалы» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках договора № 075-15 -2021-690 (уникальный идентификатор проекта РФ 2296.61321X0030).

Финансирование: работа выполнена за счет гранта НИУ БелГУ по поддержке коллективов молодых ученых «Молодые лидеры в науке».

Для цитирования: Озеров М.С., Соколовский В.С., Поволяева Е.А., Ноздрачева Е.И., Жеребцов С.В. Горячая прокатка композита Ti/TiB, полученного искровым плазменным спеканием // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 80 – 85. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-80-85](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-80-85)

Original article

**STRENGTHENING MECHANISMS OF A Ti/TiB COMPOSITE PRODUCED BY
SPARK PLASMA SINTERING AFTER HOT ROLLING**

© 2022 M. S. Ozerov, V. S. Sokolovsky, E. A. Povolyaeva, E. I. Nozdracheva, S. V. Zherebtsov

Belgorod National Research University (85 Pobedy Str., Belgorod 308015, Russian Federation)

Abstract. The Ti/TiB metal-matrix composite was obtained by spark plasma sintering at a temperature of 1000 °C. In the initial state, the Ti/TiB MMC microstructure consisted of TiB needle fibers unevenly distributed in

the titanium matrix. SEM showed that the apparent diameter of the TiB fibers varied over a wide range: from tens to several hundreds of nanometers. The average TiB fiber diameter in the initial state is 163 ± 35 nm. Hot rolling caused the fragmented TiB fiber particles to align in the rolling direction. The apparent average length of the TiB fibers decreased from 8 ± 4 to 3.0 ± 1.2 μm , probably as a result of fiber breakage during deformation. It has been established that after hot rolling the composite has an increased yield strength and significantly improved ductility compared to the initial state: the hot-rolled sample failed at a compressive strain of 25 %, while the ductility for the initial state was 12 %. The yield strength was 930 and 1200 MPa for the initial and hot-rolled states. The predicted theoretical strength, calculated by summing the contribution of all hardening mechanisms, is 1946 MPa, which is higher than the experimental value of 1200 MPa. Dispersion strengthening by fragments of TiB fibers makes the most significant contribution to the overall strength of the composite (934 MPa or 50 %).

Keywords: metalmatrix composite, spark plasma sintering, borides, microstructure, mechanical properties, scanning electron microscopy, hardening mechanisms

Acknowledgements: the work was carried out on the equipment of the Center for Collective Use of the Belgorod State National Research University "Technologies and Materials" with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under contract No. 075-15 -2021-690 (unique identifier of the RF project 2296.61321 x 0030).

Funding: the work was carried out at the expense of a grant from the National Research University of Belarus for the support of teams of young scientists "Young Leaders in Science".

For citation: Ozerov M.S., Sokolovsky V.S., Povolyaeva E.A., Nozdracheva E.I., Zhrebtsov S.V. Hot rolling of Ti/TiB composite produced by spark plasma sintering. Bulletin of the Siberian State Industrial University. 2022, no. 4 (42), pp. 80 – 85. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-80-85](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-80-85)

Введение

За счет привлекательных свойств (таких как высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, биосовместимость) титан и титановые сплавы пользуются большим спросом в промышленности и медицине [1]. Однако проблема недостаточной твердости, прочности и износостойкости титана и низколегированных титановых сплавов остается актуальной и, несомненно, требует новых решений. Повышение прочности и твердости титана может быть достигнуто путем синтеза металлматричных композитов (ММК) с использованием в качестве армирующего компонента таких высокотвердых соединений, как TiB, TiC, TiN [2 – 5]. На сегодняшний день процесс искрового плазменного спекания (ИПС) является одним из наиболее перспективных и востребованных методов создания ММК. Однако стоит признать, что композиты, полученные методом ИПС, часто имеют очень ограниченную пластичность при комнатной температуре [6 – 9]. Для расширения области применения и повышения необходимого баланса технологических свойств композита Ti/TiB необходимы комплексные исследования по поиску возможности увеличения пластических свойств этого материала. Одним из способов повышения пластичности композитов на основе титана является термомеханическая обработка [9 – 12]. Горячая прокатка является относительно простым методом пластической деформации, с помощью которого можно повысить механические свойства металла, в том числе и металлматричных компози-

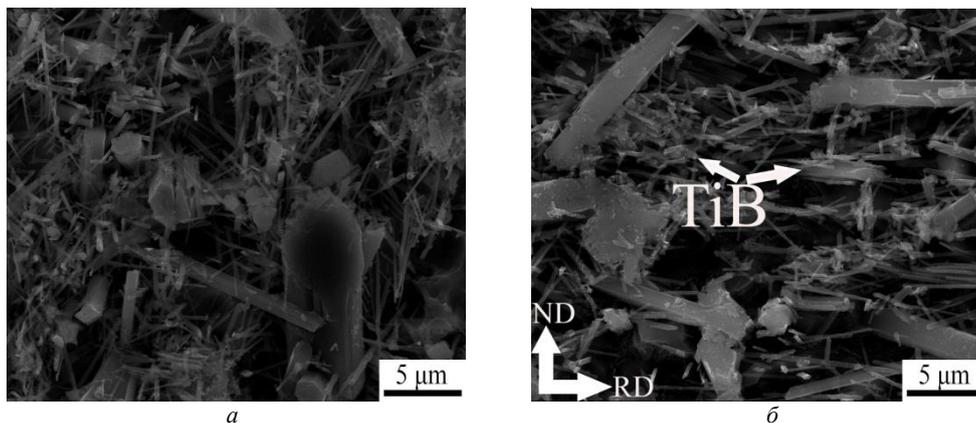
тов [9, 13]. Однако следует отметить, что работ по изучению влияния горячей прокатки на структуру и механические свойства титано-матричных композитов, полученных методом искрового плазменного спекания, очень мало.

Целью настоящей работы является изучение влияния горячей прокатки на структуру и механические свойства полученного искровым плазменным спеканием композита Ti/TiB, содержащего 5 % TiB₂.

Основные результаты и их обсуждение

В исходном состоянии микроструктура ММК Ti/TiB состояла из игольчатых волокон TiB, неравномерно распределенных в матрице титана (см. рисунок). РЭМ показала, что видимый диаметр волокон TiB варьировался в широком диапазоне: от десятков до нескольких сотен нанометров. Средний диаметр волокон TiB в исходном состоянии составляет 163 ± 35 нм. Горячая прокатка привела к выравниванию фрагментированных частиц-волокон TiB в направлении прокатки (рис. 1, б). Видимая средняя длина волокон TiB уменьшилась с 8 ± 4 до $3,0 \pm 1,2$ мкм, вероятно, в результате обрыва волокон при деформации.

После горячей прокатки ММК показал значительно более высокие значения предела текучести и пластичности по сравнению с исходным состоянием: горячекатаный образец показал пластичность 25 %, пластичность в исходном состоянии состави-



Изображения микроструктуры ММК Ti/TiB (травленая микроструктура (РЭМ):
a – исходное состояние; *b* – состояние после горячей прокатки

Images of the Ti/TiB MMC microstructure:
a – initial state; *b* – state after hot rolling; etched microstructure (SEM)

ла 12 %. Предел текучести образцов в исходном состоянии и после горячей прокатки составил 930 и 1200 МПа соответственно. Значительно увеличилась твердость прокатанного образца по сравнению с исходным состоянием: микротвердость возросла с 480 до 550 HV.

Из литературы [12, 14, 15] известно, что на прочность металломатричных композитов (помимо армирующих элементов) большое влияние оказывает соотношение размеров (длины и диаметра) армированных частиц [12, 14, 15]. Увеличение соотношения размеров (а не самой длины или толщины) боридных волокон обычно приводит к упрочнению и охрупчиванию композитов. Эта взаимосвязь подтверждается полученными в настоящем исследовании результатами: соотношение длины к диаметру волокон исходного и горячекатаного ММК составляет примерно 49 и 18 соответственно. В работе [14] показано, что уменьшение значения данного соотношения и приближение его к значению 15 (или ниже) делает механизм Орована основным механизмом упрочнения композитов.

Вклад наиболее значимых механизмов упрочнения в общую прочность композита можно выразить как [16]:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_0 + \sigma_{ss} + \sigma_p + \sigma_{H-P} + \sigma_{L-T} + \sigma_{TiB(OR)},$$

где σ_0 – напряжение трения решетки; σ_{ss} – вклад твердорастворного упрочнения; σ_p – субструктурное упрочнение за счет плотности дислокаций; σ_{H-P} – вклад упрочнения по закону Холла-Петча; σ_{L-T} – упрочнение из-за передачи нагрузки от матрицы титана к TiB под действием межфазного напряжения сдвига; $\sigma_{TiB(OR)}$ – дисперсионное упрочнение волокнами TiB по механизму Орована.

Суммарный эффект твердорастворного упрочнения за счет внедренных атомов углерода, кислорода и азота в титане согласно работе [17] составил 160 МПа. В сумме со значением напряжением трения для чистого титана (336 МПа [18]) значение σ_0 было принято равным 496 МПа. Растворимость бора в титановой матрице очень низкая и составляет <0,001 % (атом.) [19], поэтому влиянием атомов бора на упрочнение пренебрегали.

Вклад субструктурного упрочнения за счет роста плотности дислокации σ_p может быть вычислен по зависимости [20]

$$\sigma_p = M \alpha G b \sqrt{\rho},$$

где M – фактор Тейлора; α – постоянная; G – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса; $\rho = 0,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$ – плотность дислокаций.

Значения M и α составляли 3 и 0,2 соответственно [21]. Для титановой матрицы [18] $b = 2,9 \cdot 10^{-10} \text{ м}$. Для композита Ti/TiB $G = 98 \text{ ГПа}$ [6]. Вклад Холла-Петча в данном случае вряд ли можно оценить из-за отсутствия выраженной зеренной структуры. Однако более ранние расчеты оценивали вклад упрочнения Холла-Петча в 8 – 10 % от общей прочности ММК [14, 21]. В рассматриваемом случае σ_{H-P} было принято равным 110 МПа.

Упрочнение из-за передачи нагрузки от матрицы титана к TiB вычисляли по формуле [16]:

$$\sigma_{L-T} = V_{TiB} \frac{S+2}{2} + V_{Ti},$$

где V_{TiB} и V_{Ti} – объемные доли соответствующих фаз; S – отношение длины к ширине волокон TiB.

Объемные доли титана и TiB, определенные с помощью рентгеноструктурного анализа, составили 0,91 и 0,9 соответственно.

Дисперсионное упрочнение по механизму Орована $\sigma_{\text{TiB(OR)}}$ определяли по зависимости [22]:

$$\sigma_{\text{TiB(OR)}} = \left(\frac{0,538Gbf^{1/2}}{X} \right) \ln \left(\frac{X}{2b} \right),$$

где X и f – значения диаметра и объемной доли частиц TiB.

Таким образом, прогнозируемое теоретическое значение прочности, рассчитанное путем суммирования вклада всех перечисленных выше механизмов упрочнения, дало 1946 МПа, что выше значения экспериментальной прочности 1200 МПа. Следует отметить, что среди всех других механизмов упрочнения дисперсионное упрочнение обломками волокон TiB вносит наиболее заметный (934 МПа или примерно 50 %) вклад. Близкое значение вклада в упрочнение по Оровану было получено в ММК Ti/TiB после кручения под высоким давлением при 400 °С [23]. Таким образом, свойства композита Ti/TiB в большей степени связаны с морфологией и распределением волокон TiB, а не со свойствами матрицы. Можно сделать вывод, что деформационная обработка композита имеет хороший потенциал для улучшения механических свойств ММК.

Выводы

Исходная микроструктура металлматричных композитов Ti/TiB состояла из игольчатых волокон TiB со средним диаметром 163 ± 35 нм, распределенных в ГПУ-матрице титана. Горячая прокатка привела к некоторому выравниванию фрагментированных частиц TiB в направлении прокатки. Кажущаяся средняя длина волокон TiB уменьшилась с 8 ± 4 до $3,0 \pm 1,2$ мкм.

После горячей прокатки композита значительно улучшается пластичность по сравнению с исходным состоянием: горячекатаный образец разрушился при деформации сжатия 25 %, тогда как пластичность образца в исходном состоянии составила 12 %.

Анализ вклада механизмов упрочнения в общую прочность композита Ti/TiB показывает, что основной вклад (примерно 50 %) вносит дисперсионное упрочнение обломками волокон TiB.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Leyens C., Peters M. Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications. Wiley-VCH: Weinheim, 2003. 499 p.
- Godfrey T.M.T., Goodwin P.S., Ward-Close C.M. Titanium particulate metal matrix composites – Reinforcement, production methods, and mechanical properties // *Adv. Eng. Mater.* 2000. Vol. 2. P. 85–91.
- Lindroos V.K., Talvitie M.J.J. Recent advances in metal matrix composites // *Mater. Process. Technol.* 1995. Vol. 53. P. 273–284.
- Radhakrishna Bhat B.V., Subramanyam J., Bhanu Prasad V.V. Preparation of Ti-TiB-TiC & Ti-TiB composites by in-situ reaction hot pressing // *Mater. Sci. Eng. A.* 2002. Vol. 325. P. 126–130.
- Ozerov M., Klimova M., Vyazmin A., Stepanov N., Zherebtsov S. Orientation relationship in a Ti/TiB metal-matrix composite // *Mater. Lett.* 2017. Vol. 186. P. 168–170.
- Morsi K., Patel V.V. Processing and properties of titanium–titanium boride (TiBw) matrix composites – a review // *J. Mater. Sci.* 2007. Vol. 42. P. 2037–2047.
- Ragulya A.V. Fundamentals of spark plasma sintering, in encyclopedia of materials. Science and Technology. Eds. K.H. Jürgen Buschow et al.). 2010. 5 p.
- Feng H., Zhou Yu, Jia D., Meng Q., Rao J. Growth mechanism of in situ TiB whiskers in spark plasma sintered TiB/Ti metal matrix composites // *Cryst. Growth Des.* 2006. Vol. 7. P. 1626–1630.
- Huang L., Cui X., Geng L., Fu Y. Effects of rolling deformation on microstructure and mechanical properties of network structured TiBw/Ti composites // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 2012. Vol. 22. P. 79–83.
- Gaisin R.A., Imayev V.M., Imayev R.M. Effect of hot forging on microstructure and mechanical properties of near α titanium alloy/TiB composites produced by casting // *J. Alloys Compd.* 2017. Vol. 723. P. 385–394. <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.06.287>
- Zherebtsov S., Ozerov M., Stepanov N., Klimova M. Structure and properties of Ti/TiB metal–matrix composite after isothermal multi-axial forging // *Acta Phys. Pol. A.* 2018. Vol. 134. P. 695–698. <http://doi.org/10.12693/APhysPolA.134.695>
- Ozerov M., Klimova M., Sokolovsky V., Stepanov N., Popov A., Boldin M., Zherebtsov S. Evolution of microstructure and mechanical properties of Ti/TiB metal matrix composite during isothermal multi-axial forging // *J. Alloys Compd.* 2019. Vol. 770. P. 840–848. <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.215>
- Huang L., Cui X., Geng L., Fu Y. Effects of rolling deformation on microstructure and mechanical properties of network structured TiBw/Ti composites // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 2012. Vol. 22. P. 79–83. [http://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61687-2](http://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61687-2)

14. Chen B., Shen J., Ye X., Jia L., Li S., Umeda J., Takahashi M., Kondoh K. Length effect of carbon nanotubes on the strengthening mechanisms in metal matrix composites // *Acta Mater.* 2017. Vol. 140. P. 317–325.
15. Koo M.Y., Park J.S., Park M.K., Kim K.T., Hong S.H. Effect of aspect ratios of in situ formed TiB whiskers on the mechanical properties of TiBw/Ti-6Al-4V composites // *Scr. Mater.* 2012. Vol. 66. P. 487–490.
16. Munir K.S., Zheng Y., Zhang D., Lin J., Li Y., Wen C. Improving the strengthening efficiency of carbon nanotubes in titanium metal matrix composites // *Mater. Sci. Eng. A.* 2017. Vol. 696. P. 10–25.
17. Conrad H. Effect of interstitial solutes on the strength and ductility of titanium // *Prog. Mater. Sci.* 1981. Vol. 26. P. 123–403.
18. Frost H.J., Ashby M.F. *Deformation-Mechanism Maps.* Pergamon Press: Oxford, UK, 1982. P. 1–166.
19. Godfrey T.M.T., Goodwin P.S., Ward-Close C.M. Titanium particulate metal matrix composites – Reinforcement, production methods, and mechanical properties. *Adv. Eng. Mater.* 2000. Part 2. P. 85–91.
20. Estrin Y., Toth L.S., Molinari A., Brechet Y. A dislocation-based model for all hardening stages in large strain deformation // *Acta Mater.* 1998. Vol. 46. P. 5509–5522.
21. Ardell A.J. Precipitation hardening // *Metall. Mater. Trans. A.* 1985. Vol. 16 (12). P. 2131–2165.
22. Gladman T. Precipitation hardening in metals // *Mater. Sci. Technol.* 1999. Vol. 15. P. 30–36.
23. Zherebtsov S., Ozerov M., Stepanov N., Klimova M., Ivanisenko Y. Effect of high-pressure torsion on structure and microhardness of Ti/TiB metal matrix composite // *Metals.* 2017. Vol. 7. P. 507.
5. Ozerov M., Klimova M., Vyazmin A., Stepanov N., Zherebtsov S. Orientation relationship in a Ti/TiB metal-matrix composite. *Mater. Lett.* 2017, vol. 186, pp. 168–170.
6. Morsi K., Patel V.V. Processing and properties of titanium–titanium boride (TiBw) matrix composites – a review. *J. Mater. Sci.* 2007, vol. 42, pp. 2037–2047.
7. Ragulya A.V. *Fundamentals of spark plasma sintering, in encyclopedia of materials.* Science and Technology. K.H. Jürgen Buschow et al. eds. 2010, 5 p.
8. Feng H., Zhou Yu, Jia D., Meng Q., Rao J. Growth mechanism of in situ TiB whiskers in spark plasma sintered TiB/Ti metal matrix composites. *Cryst. Growth Des.* 2006, vol. 7, pp. 1626–1630.
9. Huang L., Cui X., Geng L., Fu Y. Effects of rolling deformation on microstructure and mechanical properties of network structured TiBw/Ti composites. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 2012, vol. 22, pp. 79–83.
10. Gaisin R.A., Imayev V.M., Imayev R.M. Effect of hot forging on microstructure and mechanical properties of near α titanium alloy/TiB composites produced by casting. *J. Alloys Compd.* 2017, vol. 723, p. 385–394. <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.06.287>
11. Zherebtsov S., Ozerov M., Stepanov N., Klimova M. Structure and properties of Ti/TiB metal–matrix composite after isothermal multiaxial forging. *Acta Phys. Pol. A.* 2018, vol. 134, pp. 695–698. <http://doi.org/10.12693/APhysPolA.134.695>
12. Ozerov M., Klimova M., Sokolovsky V., Stepanov N., Popov A., Boldin M., Zherebtsov S. Evolution of microstructure and mechanical properties of Ti/TiB metal matrix composite during isothermal multiaxial forging. *J. Alloys Compd.* 2019, vol. 770, pp. 840–848. <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.215>
13. Huang L., Cui X., Geng L., Fu Y. Effects of rolling deformation on microstructure and mechanical properties of network structured TiBw/Ti composites. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 2012, vol. 22, pp. 79–83. [http://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61687-2](http://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61687-2)

REFERENCES

1. Leyens C., Peters M. *Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications.* Wiley-VCH: Weinheim, 2003, 499 p.
2. Godfrey T.M.T., Goodwin P.S., Ward-Close C.M. Titanium particulate metal matrix composites – Reinforcement, production methods, and mechanical properties. *Adv. Eng. Mater.* 2000, vol. 2, pp. 85–91.
3. Lindroos V.K., Talvitie M.J.J. Recent advances in metal matrix composites. *Mater. Process. Technol.* 1995, vol. 53, pp. 273–284.
4. Radhakrishna Bhat B.V., Subramanyam J., Bhanu Prasad V.V. Preparation of Ti-TiB-TiC & Ti-TiB composites by in-situ reaction hot pressing. *Mater. Sci. Eng. A.* 2002, vol. 325, pp. 126–130.

- formed TiB whiskers on the mechanical properties of TiBw/Ti-6Al-4V composites. *Scr. Mater.* 2012, vol. 66, pp. 487–490.
16. Munir K.S., Zheng Y., Zhang D., Lin J., Li Y., Wen C. Improving the strengthening efficiency of carbon nanotubes in titanium metal matrix composites. *Mater. Sci. Eng. A.* 2017, vol. 696, pp. 10–25.
 17. Conrad H. Effect of interstitial solutes on the strength and ductility of titanium. *Prog. Mater. Sci.* 1981, vol. 26, pp. 123–403.
 18. Frost H.J., Ashby M.F. *Deformation-Mechanism Maps*. Pergamon Press: Oxford, UK, 1982, pp. 1–166.
 19. Godfrey T.M.T., Goodwin P.S., Ward-Close C.M. Titanium particulate metal matrix composites – Reinforcement, production methods, and mechanical properties. *Adv. Eng. Mater.* 2000, part 2, pp. 85–91.
 20. Estrin Y., Toth L.S., Molinari A., Brechet Y. A dislocation-based model for all hardening stages in large strain deformation. *Acta Mater.* 1998, vol. 46, pp. 5509–5522.
 21. Ardell A.J. Precipitation hardening. *Metall. Mater. Trans. A.* 1985, vol. 16 (12), pp. 2131–2165.
 22. Gladman T. Precipitation hardening in metals. *Mater. Sci. Technol.* 1999, vol. 15, pp. 30–36.
 23. Zharebtsov S., Ozerov M., Stepanov N., Klimova M., Ivanisenko Y. Effect of high-pressure torsion on structure and microhardness of Ti/TiB metal matrix composite. *Metals.* 2017, vol. 7, pp. 507.

Сведения об авторах

Максим Сергеевич Озеров, к.т.н., научный сотрудник, Белгородский государственный национальный исследовательский университет
E-mail: ozerov@bsu.edu.ru
ORCID: 0000-0002-2732-0579

Виталий Сергеевич Соколовский, к.т.н., научный сотрудник, Белгородский государственный национальный исследовательский университет
E-mail: sokolovskiy@bsu.edu.ru
ORCID: 0000-0001-5607-2765

Елизавета Андреевна Поволяева, младший научный сотрудник, Белгородский государственный национальный исследовательский университет

E-mail: povolyaeva@bsu.edu.ru
ORCID: 0000-0002-9103-5182

Елена Ивановна Ноздрачева, младший научный сотрудник, Белгородский государственный национальный исследовательский университет
E-mail: nozdracheva@bsu.edu.ru
ORCID: 0000-0001-9554-2651

Сергей Валерьевич Жеребцов, д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории объемных наноструктурных материалов, Белгородский государственный национальный исследовательский университет
E-mail: zherebtsov@bsu.edu.ru
ORCID: 0000-0002-1663-429X

Information about the authors:

Maxim S. Ozerov, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Belgorod National Research University
E-mail: ozerov@bsu.edu.ru
ORCID: 0000-0002-2732-0579

Vitaly S. Sokolovsky, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Belgorod National Research University
E-mail: sokolovskiy@bsu.edu.ru
ORCID: 0000-0001-5607-2765

Elizaveta A. Povolyaeva, Junior Researcher, Belgorod National Research University
E-mail: povolyaeva@bsu.edu.ru
ORCID: 0000-0002-9103-5182

Elena I. Nozdracheva, Junior Researcher, Belgorod National Research University
E-mail: nozdracheva@bsu.edu.ru
ORCID: 0000-0001-9554-2651

Sergey V. Zharebtsov, Dr. Sci. (Eng.), Assist Professor, Leading Researcher, Belgorod National Research University
E-mail: zherebtsov@bsu.edu.ru
ORCID: 0000-0002-1663-429X

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
 The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 22.11.2022
 После доработки 30.11.2022
 Принята к публикации 02.12.2022

Received 22.11.2022
 Revised 30.11.2022
 Accepted 02.12.2022

Оригинальная статья

УДК 669.35.6

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-86-91

ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ НА СВОЙСТВА ШИХТЫ СВИНЦОВО-ОЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ

© 2022 г. Е. В. Агеева, А. С. Переверзев, А. Д. Павлов

Юго-Западный государственный университет (Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94)

Аннотация. Представлены результаты исследования свойств электроэрозионной шихты, полученной из отходов свинцово-оловянной бронзы марки BrO5C25. Оценено влияние химического состава среды диспергирования на элементный и фазовый составы рассматриваемых электроэрозионных частиц. Установлено, что при проведении экспериментов по получению шихты в кислородсодержащей жидкости (дистиллированной воде) на поверхности получаемых частиц присутствует часть кислорода. По результатам эксперимента установлено, что основными элементами в шихте, полученной методом электроэрозионного диспергирования отходов свинцовой бронзы марки BrO5C25 в дистиллированной воде, являются кислород, медь, олово, цинк и свинец. Остальные элементы распределены в шихте относительно равномерно. На основании выполненного рентгеноструктурного микроанализа было установлено, что основными фазами в шихте, полученной в дистиллированной воде, являются Cu, Pb(Cu₂O₂), Pb₅O₈, Pb, Sn. При проведении экспериментов по получению шихты в углеродсодержащей жидкости (осветительном керосине) на поверхности получаемых частиц присутствует часть углерода. По результатам эксперимента установлено, что основными элементами в шихте, полученной методом электроэрозионного диспергирования отходов свинцовой бронзы марки BrO5C25 в осветительном керосине, являются углерод, медь, олово, цинк и свинец. Остальные элементы распределены в шихте относительно равномерно. На основании выполненного рентгеноструктурного микроанализа было установлено, что карбидообразующих элементов в сплаве нет. Основными фазами в шихте, полученной в осветительном керосине, являются Cu, Pb(Cu₂O₂), Pb₅O₈, Pb, Sn. Установлено влияние среды диспергирования на элементный и фазовый составы электроэрозионной шихты свинцово-оловянной бронзы марки BrO5C25.

Ключевые слова: электроэрозионное диспергирование, шихты, бронза, среда диспергирования, элементный состав, фазовый состав, дистиллированная вода, осветительный керосин

Для цитирования: Агеева Е.В., Переверзев А.С., Павлов А.Д. Влияние среды диспергирования на свойства шихты свинцово-оловянной бронзы // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 86 – 91. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-86-91](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-86-91)

Original article

INFLUENCE OF THE DISPERSION ENVIRONMENT ON THE PROPERTIES OF THE CHARGE OF LEAD-TIN BRONZE

© 2022 E. V. Ageeva, A. S. Pereverzev, A. D. Pavlov

Southwest State University (94 st. 50 let Oktyabrya, Kursk, 305040, Russian Federation)

Abstract. This article presents the results of a study of the properties of the electroerosive charge obtained from the waste of lead-tin bronze BrO5C25, in particular, the influence of the chemical composition of the dispersion medium on the elemental and phase composition of the resulting electroerosive particles is evaluated. It has been established that when carrying out experiments on obtaining a charge in an oxygen-containing liquid (distilled water), a part of oxygen is present on the surface of the obtained particles. According to the results of the experiment, it was found that the main elements in the charge obtained by

the method of electroerosive dispersion of BrO5C25 lead bronze waste in distilled water are oxygen, copper, tin, zinc and lead. The remaining elements are distributed relatively evenly in the mixture. Based on the performed X-ray diffraction microanalysis, it was found that the main phases in the charge obtained in distilled water are Cu, Pb(Cu₂O₂), Pb₅O₈, Pb, Sn. When carrying out experiments to obtain a charge in a carbon-containing liquid (illuminating kerosene), a part of carbon is present on the surface of the obtained particles. According to the results of the experiment, it was found that the main elements in the charge obtained by the method of electroerosive dispersion of lead bronze waste BrO5C25 in lighting kerosene are carbon, copper, tin, zinc and lead. The remaining elements are distributed relatively evenly in the charge. Based on the performed X-ray diffraction microanalysis, it was found that there are no carbide-forming elements in the alloy. The main phases in the charge obtained in lighting kerosene are also Cu, Pb(Cu₂O₂), Pb₅O₈, Pb, Sn. Thus, the influence of the dispersion medium on the elemental and phase composition of the electroerosive charge of lead-tin bronze BrO5C25 has been established.

Keywords: electroerosive dispersion, mixtures, bronze, dispersion medium, elemental composition, phase composition, distilled water, lighting kerosene

For citation: Ageeva, E.V., Pereverzev, A.S., Pavlov, A.D. Influence of the dispersion environment on the properties of the charge of lead-tin bronze. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4 (42), pp. 86 – 91. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-86-91](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-86-91)

Введение

Среди имеющихся разнообразных способов обработки металлов порошковая металлургия занимает свое особое место, так как позволяет не только производить изделия различных форм и назначений, но и создавать принципиально новые материалы, получить которые иным путем крайне трудно или вообще невозможно.

Наибольший исследовательский интерес вызывает технология получения порошковых материалов путем электроэрозионной обработки токопроводящих материалов – электроэрозионное диспергирование [1 – 20]. С помощью этого метода можно получать частицы сферической формы, пригодные для аддитивных технологий.

Сплавы на медной основе (бронзы) нашли широкое применение в машиностроении. Разработка технологий переработки отходов бронзы в пригодные для промышленного применения порошки является актуальным направлением исследований [11 – 15].

Целью настоящей работы является изучение влияния среды диспергирования на свойства шихты свинцово-оловянной бронзы.

Методы и принципы исследования

Для реализации исследований были выбраны отходы свинцово-оловянной бронзы марки BrO5C25, которые подвергали воздействию электрической эрозии на установке электроэрозионного диспергирования. В качестве рабочей среды диспергирования были выбраны осветительный керосин (ГОСТ 4753 – 68), являющийся углеродсодержащей жидкостью, и дистиллированная вода (ГОСТ 6709 – 72), являющаяся кислородсодержащей средой. В результате эксперимента были получены частицы шихты, которые были исследованы различными способами.

Рентгеноспектральный микроанализ проводили на энергодисперсионном анализаторе рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенного в растровый электронный микроскоп Quanta 200 3D (рис. 1).

Исследование фазового состава материалов проводили методом рентгеновской дифракции на дифрактометре Rigaku Ultima IV в Cu K_α-излучении (длина волны $\lambda = 0,154178$ нм) с использованием щелей Соллера (рис. 2).

Основные результаты

По результатам эксперимента установлено, что основными элементами в шихте, полученной методом электроэрозионного диспергирования отходов свинцовой бронзы марки BrO5C25 в дистиллированной воде, являются кислород, медь, олово, цинк и свинец. Основными элементами в шихте, полученной методом электроэро-



Рис. 1. Электронный микроскоп Quanta 200 3D
Fig. 1. Electron microscope Quanta 200 3D



Рис. 2. Дифрактометр Rigaku Ultima IV
Fig. 2. Diffractometer Rigaku Ultima IV

зионного диспергирования отходов свинцовой бронзы марки БрО5С25 в осветительном керосине, являются углерод, медь, олово, цинк и свинец. Элементы распределены в шихте относительно равномерно. Рентгенограммы проведенных исследований представлены на рис. 3.

На основании выполненного рентгеноструктурного микроанализа было установлено, что основными фазами в шихте, полученной в дистиллированной воде и осветительном керосине, являются Cu , $\text{Pb}(\text{Cu}_2\text{O}_2)$, Pb_5O_8 , Pb , Sn . На основании выполненного рентгеноструктурного микроанализа было установлено, что карбидообразующих элементов в сплаве нет. Дифрактограммы проведенных исследований представлены на рис. 4.

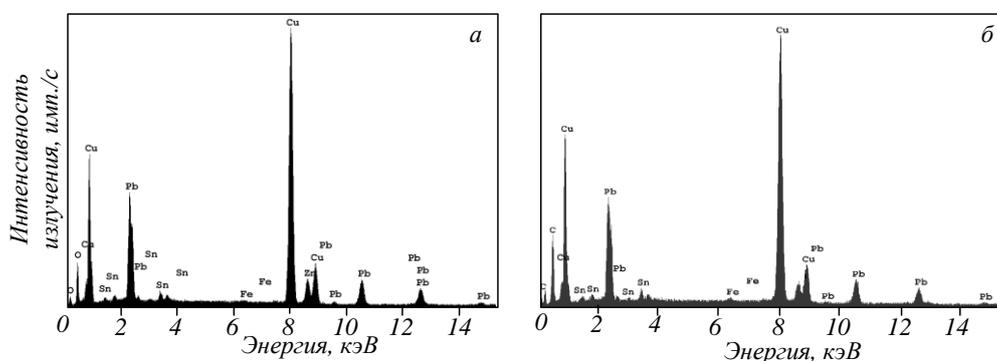


Рис. 3. Спектрограммы порошка электроэрозионной свинцово-оловянной бронзы, полученные в дистиллированной воде (а) и осветительном керосине (б)

Fig. 3. Spectrograms of electroerosive lead-tin bronze powder obtained in distilled water (a) and lighting kerosene (b)

Выводы

На основе анализа представленных результатов исследования элементного и фазового составов порошков, полученных в различных средах, можно сделать вывод, что химический состав рабочей среды диспергирования оказывает прямое влияние на химический состав получаемой шихты, образуя различные соединения с кислородом. Наличие свободного углерода на поверхности частиц шихты, полученной в керосине, в перспективе может способствовать снижению коэффициента трения и повышению износостойкости сплавов на ее основе, так как углерод будет выступать в роли твердого смазочного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев Е.В., Семенихин Б.А., Латыпов Р.А. Исследование микротвердости порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава // Вестник Московского государственного агроинженерного университета имени В.П. Горячкина. 2011. № 1 (46). С. 78–80.
2. Латыпов Р.А., Латыпова Г.Р., Агеев Е.В., Давыдов А.А. Разработка и исследование твердосплавных изделий из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием вольфрамсодержащих отходов // Международный научный журнал. 2013. № 2. С. 107–112.
3. Латыпов Р.А., Коростелев А.Б., Агеев Е.В., Семенихин Б.А. Свойства порошков из отходов твердых сплавов ВК8 И Т15К6, полученных методом электроэрозионного диспергирования // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2010. № 7. С. 2–6.

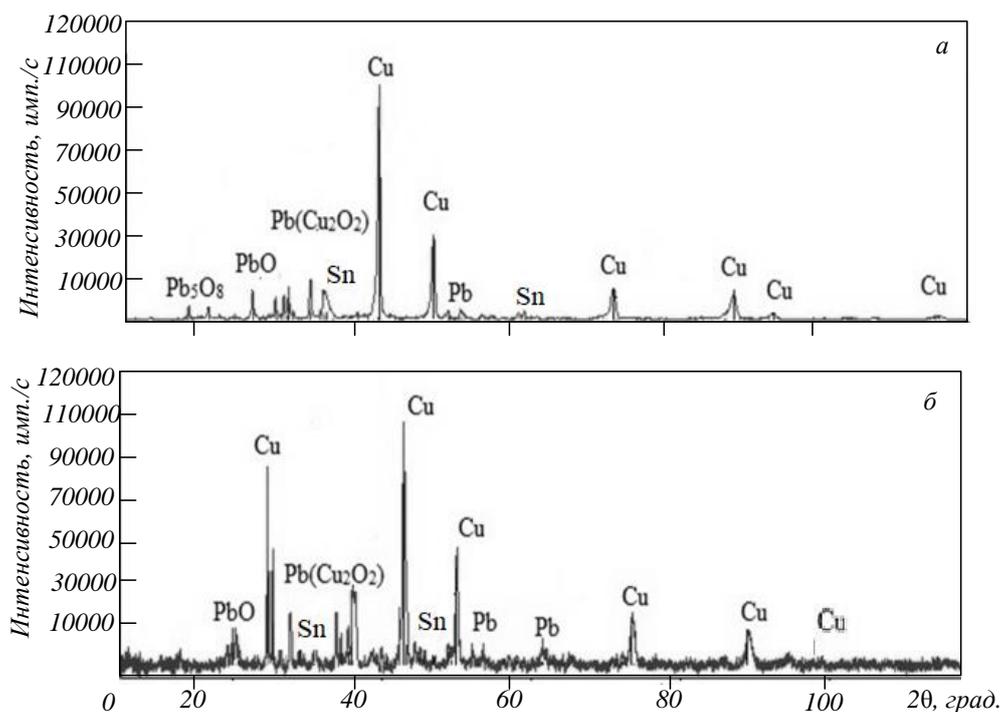


Рис. 4. Диффрактограммы порошка электроэрозионной свинцово-оловянной бронзы, полученные в дистиллированной воде (а) и осветительном керосине (б)

Fig. 4. Diffractograms of electroerosive lead-tin bronze powder obtained in distilled water (a) and in kerosene lighting (b)

4. Агеева Е.В., Переверзев А.С., Осьминина А.С. Исследование влияния электрических параметров установки на производительность процесса электроэрозионного диспергирования отходов свинцовой бронзы в дистиллированной воде // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. № 1 (26). С. 6–13.
5. Агеев Е.В., Переверзев А.С., Горохов А.А. Исследование микроструктуры спеченных электроэрозионных наноконпозиционных порошков свинцовой бронзы // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. № 3 (28). С. 29–35.
6. Агеев Е.В., Переверзев А.С., Осьминина А.С., Григоров И.Ю. Размерный анализ электроэрозионного порошка свинцовой бронзы, полученного в дистиллированной воде // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. № 4 (79). С. 42–49.
7. Агеев Е.В., Гадалов В.Н., Агеева Е.В., Бобрышев Р.В. Порошки, полученные электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов – перспективный материал для восстановления деталей автотракторной техники // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 1 (40). Ч. 1. С. 182–189.
8. Агеев Е.В., Переверзев А.С., Бахмудкадиев Н.Д. Исследование пористости спеченных изделий из одноосно спрессованных электроэрозионных порошков сплава БрС30 // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. № 4 (29). С. 23–29.
9. Петриченко В.К. Антифрикционные материалы и подшипники скольжения. Москва: Машгиз, 1954. 383 с.
10. Осинцев О.Е., Федоров В.Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки. Москва: Инновационное машиностроение, 2016. 359 с.
11. Ageev E.V., Pereverzev A.S. X-ray diffraction analysis of products sintered from isostatically pressed leaded bronze powders // MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 298. P. 00037. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929800037>
12. Ageev E.V., Pereverzev A.S., Khardikov S.V. A study of porosity of products sintered from BrS30 alloy electro-erosion powders // Materials Science Forum. 2020. Vol. 989. P. 187–191. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.187>
13. Ageev E.V., Pereverzev A.S. Microstructure and phase composition of electroerosion materials based on bronze used for the application of metallization and galvanic coatings // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2020. Vol. 14. No. 6. P. 1286–1288. <https://doi.org/10.1134/S1027451020060233>
14. Ageev E.V., Pereverzev A.S., Sabel'nikov B.N. X-ray spectral analysis of sintered articles made of

- electroerosive lead bronze obtained in lighting kerosene // MATEC Web of Conferences. 2020. No. 329. P. 02007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032902007>
15. Latypov R.A., Latypova G.R., Ageev E.V., Altukhov A.Y., Ageeva E.V. Properties of the coatings fabricated by plasma-jet hard-facing by dispersed mechanical engineering wastes // Russian metallurgy (Metally). 2018. No. 6. P. 573–575. <https://doi.org/10.1134/S0036029518060137>
 16. Bilous O., Mahura B. Application of wear-resistant coating by electrospark alloying method using an eutectic electrode material // Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science. 2018. Vol. 4. No. 1. P. 40–48. <https://doi.org/10.23939/ujmems2018.01.040>.
 17. Hasanabadi F.M., Ghaini M.F., Ebrahimnia M., Shahverdi H.R. Production of amorphous and nano-crystalline iron based coatings by electro-spark deposition process // Surface and Coatings Technology. 2015. Vol. 270. P. 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.03.016>.
 18. Kiryukhantsev-Korneev Ph., Sytchenko A., Sheveyko A., Moskovskikh D., Vorotylo S. Two-layer nanocomposite tic-based coatings produced by a combination of pulsed cathodic arc evaporation and vacuum electro-spark alloying // Materials. 2020. Vol. 13, No. 3. P. 547. <https://doi.org/10.3390/ma13030547>
 19. Breki A.D., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Kolmakov A.G., Sergeyev N.N., Gvozdev A.E., Starikov N.E., Provotorov D.A., Fadin Y.A. Synthesis and tribotechnical properties of composite coatings with PM-DADPE polyimide matrix and fillers of tungsten dichalcogenide nanoparticles upon dry sliding friction // Inorganic Materials: Applied Research. 2016. Vol. 7. No. 4. P. 542–546. <https://doi.org/10.1134/S2075113316040067>
 20. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Klement'ev D.S., Kostychev I.V. Effect of the purity of charge materials and heat treatment parameters on the structure and the mechanical properties of U10A forge tool steel // Russian Metallurgy (Metally). 2021. No. 10. P. 1352–1355. <https://doi.org/10.1134/S003602952110030X>
- REFERENCES**
1. Ageev E.V., Semenikhin B.A., Latypov R.A. Investigation of microhardness of powders obtained by electroerosive dispersion of a hard alloy. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo agroinzhenernogo universiteta imeni V.P. Goryachkina*. 2011, no. 1 (46), pp. 78–80. (In Russ.).
 2. Latypov R.A., Latypova G.R., Ageev E.V., Davydov A.A. Development and research of carbide products from powders obtained by electroerosive dispersion of tungsten-containing waste. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal*. 2013, no. 2, pp. 107–112. (In Russ.).
 3. Latypov R.A., Korostelev A.B., Ageev E.V., Semenikhin B.A. Properties of powders from waste of hard alloys VK8 and T15K6 obtained by the method of electroerosive dispersion. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik*. 2010, no. 7, pp. 2–6. (In Russ.).
 4. Ageeva E.V., Pereverzev A.S., Os'minina A.S. Investigation of the influence of electrical parameters of the installation on the performance of the process of electroerosive dispersion of lead bronze waste in distilled water. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*. 2018, no. 1 (26), pp. 6–13. (In Russ.).
 5. Ageev E.V., Pereverzev A.S., Gorokhov A.A. Investigation of the microstructure of sintered electroerosive nanocomposite powders of lead bronze. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*. 2018, no. 3 (28), pp. 29–35. (In Russ.).
 6. Ageev E.V., Pereverzev A.S., Os'minina A.S., Grigorov I.Yu. Dimensional analysis of electroerosive powder of lead bronze obtained in distilled water. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. 2018, no. 4 (79), pp. 42–49. (In Russ.).
 7. Ageev E.V., Gadalov V.N., Ageeva E.V., Bobryshev R.V. Powders obtained by electroerosive dispersion of solid alloy waste – a promising material for the restoration of parts of automotive equipment. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. 2012, no. 1 (40), part 1, pp. 182–189. (In Russ.).
 8. Ageev E.V., Pereverzev A.S., Bakhmudkadiyev N.D. Investigation of porosity of sintered products from uniaxially pressed electroerosive powders of BrS30 alloy. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*. 2018, no. 4 (29), pp. 23–29. (In Russ.).
 9. Petrichenko V.K. *Antifriction materials and sliding bearings*. Moscow: Mashgiz, 1954. 383 s. (In Russ.).
 10. Osintsev O.E., Fedorov V.N. *Copper and copper alloys. Domestic and foreign brands*. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2016. 359 s. (In Russ.).
 11. Ageev E.V., Pereverzev A.S. X-ray diffraction analysis of products sintered from isostatically pressed leaded bronze powders. *MATEC Web*

- of Conferences*. 2019, vol. 298, pp. 00037. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929800037>
12. Ageev E.V., Pereverzev A.S., Khardikov S.V. A study of porosity of products sintered from BrS30 alloy electro-erosion powders. *Materials Science Forum*. 2020, vol. 989, pp. 187–191. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.187>
 13. Ageev E.V., Pereverzev A.S. Microstructure and phase composition of electroerosion materials based on bronze used for the application of metallization and galvanic coatings. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2020, vol. 14, no. 6, pp. 1286–1288. <https://doi.org/10.1134/S1027451020060233>
 14. Ageev E.V., Pereverzev A.S., Sabel'nikov B.N. X-ray spectral analysis of sintered articles made of electroerosive lead bronze obtained in lighting kerosene. *MATEC Web of Conferences*. 2020, no. 329, pp. 02007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032902007>
 15. Latypov R.A., Latypova G.R., Ageev E.V., Altukhov A.Y., Ageeva E.V. Properties of the coatings fabricated by plasma-jet hard-facing by dispersed mechanical engineering wastes. *Russian metallurgy (Metally)*. 2018, no. 6, pp. 573–575. <https://doi.org/10.1134/S0036029518060137>
 16. Bilous O., Mahura B. Application of wear-resistant coating by electrospark alloying method using an eutectic electrode material. *Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science*. 2018, vol. 4, no. 1, pp. 40–48. <https://doi.org/10.23939/ujmems2018.01.040>
 17. Hasanabadi F.M., Ghaini M.F., Ebrahimnia M., Shahverdi H.R. Production of amorphous and nano-crystalline iron based coatings by electro-spark deposition process. *Surface and Coatings Technology*. 2015, vol. 270, pp. 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.03.016>
 18. Kiryukhantsev-Korneev Ph., Sytchenko A., Sheveyko A., Moskovskikh D., Vorotylo S. Two-layer nanocomposite tic-based coatings produced by a combination of pulsed cathodic arc evaporation and vacuum electro-spark alloying. *Materials*. 2020, vol. 13, no. 3, pp. 547. <https://doi.org/10.3390/ma13030547>
 19. Breki A.D., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Kolmakov A.G., Sergeyev N.N., Gvozdev A.E., Starikov N.E., Provotorov D.A., Fadin Y.A. Synthesis and tribotechnical properties of composite coatings with PM–DADPE polyimide matrix and fillers of tungsten dichalcogenide nanoparticles upon dry sliding friction. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2016, vol. 7, no. 4, pp. 542–546. <https://doi.org/10.1134/S2075113316040067>
 20. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Klement'ev D.S., Kostychev I.V. Effect of the purity of charge materials and heat treatment parameters on the structure and the mechanical properties of U10A forge tool steel. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2021, no. 10, pp. 1352–1355. <https://doi.org/10.1134/S003602952110030X>

Сведения об авторах

Екатерина Владимировна Агеева, д.т.н., профессор, профессор кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет
E-mail: ageeva-ev@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-2976-2813

Антон Сергеевич Переверзев, к.т.н., доцент кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет
E-mail: chaser-93@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-8460-3364

Андрей Денисович Павлов, студент кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет
E-mail: andreypavlov111@mail.ru

Information about the authors

Ekaterina V. Ageeva, Dr. Sci., Prof., Prof. of the Department of Materials Technology and Transport, South-West State University
E-mail: ageeva-ev@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-2976-2813

Anton S. Pereverzev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Technology and Transport, South-West State University
E-mail: chaser-93@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-8460-3364

Andrey D. Pavlov, student of the Department of Materials Technology and Transport, South-West State University
E-mail: andreypavlov111@mail.ru

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
 The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 25.11.2022
 После доработки 30.11.2022
 Принята к публикации 02.12.2022

Received 25.11.2022
 Revised 30.11.2022
 Accepted 02.12.2022

Оригинальная статья

УДК 621.791:625.143.48

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-92-99

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ
СВАРНОГО ШВА РЕЛЬСОВ ТИПА Р65 КАТЕГОРИИ ДТ350**

© 2022 г. Е. В. Полевой¹, М. А. Мартынов¹, С. В. Коновалов², И. И. Чумачков²

¹АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (Россия, 654043, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Космическое ш., 16)

²Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Рельсы являются важнейшим элементом верхнего строения железнодорожного пути. Для повышения плавности хода, снижения динамических нагрузок в местах соединения все большее распространение получает контактная сварка рельсов в плети в стационарных условиях и алюмотермитная сварка непосредственно в пути. Несмотря на повышение качества соединений, зона сварных стыков вследствие изменения структуры, обусловленной физическими процессами сварки и термообработки, является местом с более низкими механическими характеристиками относительно металла цельнокатаных рельсов. Развитие дефектов в сварных стыковых соединениях является одной из основных причин изъятия рельсов из эксплуатации. Важной составляющей обеспечения качества рельсов и сварных стыков является формирование благоприятной эпюры остаточных напряжений. С целью оценки влияния индукционного нагрева и закалки проведено исследование распределения остаточных напряжений до и после термообработки сварного стыка, полнопрофильных проб рельсов типа Р65 категории ДТ350 из стали марки Э76ХФ текущего производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Установлено, что в головке рельса преобладают сжимающие остаточные напряжения как до, так и после термической обработки, подогрев снижает общие напряжения до 210 – 264 МПа, максимальные сжимающие напряжения (586 МПа) фиксируются на стыке после упрочняющей термообработки. В шейке рельса преобладают растягивающие напряжения, отмечено резкое увеличение напряжений после упрочняющей термической обработки: напряжения возросли более чем в три раза (с 68 до 254 МПа). После подогрева сварного стыка наблюдается незначительное снижение остаточных напряжений в этой области. В подошве рельса фиксируются сжимающие напряжения с идентичной эпюрой независимо от термической обработки. Минимальные напряжения фиксируются по центру подошвы с последующим увеличением к краю пера. Наибольшая разница (57 – 537 МПа) зафиксирована после упрочняющей термообработки по периметру подошвы.

Ключевые слова: рельсы, контактная стыковая сварка, сварной стык, болтовой стык, остаточные напряжения, индукционный нагрев, дифференцированная термическая обработка

Для цитирования: Полевой Е.В., Мартынов М.А., Коновалов С.В., Чумачков И.И. Исследование распределения остаточных напряжений в зоне сварного шва рельсов типа Р65 категории ДТ350 // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 92 – 99. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-92-99](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-92-99)

Original article

**INVESTIGATION OF THE DISTRIBUTION OF RESIDUAL STRESSES IN THE ZONE
OF THE WELDED SEAM OF RAILS OF THE R65 TYPE OF THE DT350 CATEGORY**

© 2022 E. V. Polevoy¹, M. A. Martynov¹, S. V. Konovalov², I. I. Chumachkov²

¹JSC EVRAZ ZSMK (16 Cosmic highway, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

²Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. Rails are the most important element of the superstructure of the railway track. To increase the smoothness of the ride, reduce dynamic loads at the junctions of the rails, contact welding of rails in a whip in stationary conditions and aluminothermic welding directly on the way are becoming more common. Despite the improvement in the quality of the joints, the zone of welded joints, due to a change in the structure due to the physical processes of welding and heat treatment, is still a place with lower mechanical characteristics compared to the metal of solid-rolled rails. The development of defects in welded butt joints is one of the main reasons for removing rails from service. An important component of ensuring the quality of rails and welded joints is the formation of a favorable diagram of residual stresses. In order to assess the effect of induction heating and hardening, a study was made of the distribution of residual stresses before and after heat treatment of the welded joint, full-profile samples of R65 type rails of the DT350 category of steel grade E76HF, the current production of EVRAZ ZSMK JSC. It has been established that compressive residual stresses predominate in the rail head both before and after heat treatment, heating reduces the overall stress level to the level of 210–264 MPa, the maximum compressive stress level equal to 586 MPa is fixed at joint No. 224, after hardening heat treatment. Tensile stresses predominate in the neck of the rail, a sharp increase in stresses after hardening heat treatment was noted, the stress level increased more than three times, from 68 MPa to 254 MPa. After heating the welded joint, a slight decrease in residual stresses in this area is observed. Compressive stresses are recorded in the rail sole, with identical diagram, regardless of heat treatment. A minimum of stress is fixed in the center of the sole, with a subsequent increase towards the edge of the feather. The greatest difference was recorded after hardening heat treatment, from 57 MPa to 537 MPa, respectively.

Keywords: rails, flash butt welding, welded joint, bolted joint, residual stress, induction heating, differential heat treatment

For citation: Polevoy E.V., Martynov M.A., Konovalov S.V., Chumachkov I.I. Investigation of the distribution of residual runs in the observation zone of a welded seam of rails of the R65 type of category DT350. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4 (42), pp. 92 – 99. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-92-99](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-92-99)

Введение

В настоящее время развитие железнодорожных перевозок направлено на увеличение грузонапряженности, повышение пропускной и провозной способности [1 – 5]. Реализуется это за счет увеличения скоростей движения и веса подвижного состава, внедрения более мощных локомотивов, более тяжелых инновационных вагонов с повышенными (более 245,17 кН) осевыми нагрузками, что влечет за собой увеличение в процессе эксплуатации нагрузок на железнодорожные рельсы, стыковые и болтовые соединения. Помимо формирующихся под воздействием колес в рельсах контактных и изгибающих напряжений, влияющих на возникновение и развитие дефектов, большую роль в обеспечении срока службы рельсов оказывает величина и эпюра распределения остаточных напряжений, способных вызвать внезапное хрупкое разрушение при развитии усталостных трещин минимального размера [6 – 10].

Сварной стык (по сравнению с болтовым) снижает динамические нагрузки, увеличивает плавность хода, способствует повышению скоростей движения и прочности самого соединения, исключает риски изломов от болтовых отверстий [11 – 14]. Вместе с тем изменения структуры, обусловленные принятыми в настоящее время на рельсосварочных предприятиях технологиями контактной сварки оплавлением и термообработки, не позволяют добиться равнопрочного состояния по сравнению с рельсовым металлом вне

стыка. Об этом свидетельствует высокий выход рельсов (большое количество изъятых рельсов из пути из-за образования в них дефектов в процессе эксплуатации) из эксплуатации по дефектам в сварных стыках, который достигает 26 % от общего объема лежащих в пути и замененных дефектных рельсов, и рельсов с дефектами, представляющими прямую угрозу безопасности движения из-за возможного разрушения под поездом или схода колес с рельса [15, 16]. Для сварного стыка, в котором перераспределение остаточных напряжений в силу технологических особенностей процесса сварки и термообработки происходит более интенсивно и в большей степени влияет на эксплуатационную стойкость, решение вопросов формирования благоприятной эпюры остаточных напряжений является наиболее актуальным.

В настоящее время перед отечественными и зарубежными производителями стоит задача разработки перспективных режимов сварки и термообработки рельсов, обеспечивающих не только отсутствие дефектов и соответствие сварного соединения требованиям нормативно-технической документации, но и формирование благоприятной эпюры остаточных напряжений в зоне сварного стыка.

Целью настоящей работы является исследование влияния термической обработки на перераспределение остаточных напряжений в зоне сварного стыка как одного из факторов, влияющих на эксплуатационную стойкость сварного соединения.

Режимы сварки
Table 1. Welding modes

Оплавление пульсирующее										
Участок	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S , мм	2,5	4,0	3,8	3,4	3,4	3,2	2,0	2,0	1,5	1,5
U , %	99	99	75	75	75	75	99	99	99	99
$V_{в}$, мм/с	1,0	1,2	0,8	1,0	1,2	1,4	1,0	1,2	1,4	1,6
$V_{н}$, мм/с	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3
Параметры корректора скорости по току										
Участок	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{кор}$, А	220	280	200	250	300	400	450	550	650	750
$I_{ост}$, А	320	380	300	350	400	500	550	700	800	900
$I_{рев}$, А	380	440	350	400	450	550	650	800	900	1000
$I_{кз}$, А	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1400	1400	1400	1400

Примечание: Осадка 16 мм, осадка под током 9 мм. $I_{кор}$ – ток коррекции; $I_{ост}$ – ток остановки подачи; $I_{рев}$ – ток реверса; $I_{кз}$ – ток короткого замыкания.

Материал и методика исследования

Исследовали сварные стыковые соединения, изготовленные из образцов, отобранных от рельса типа Р65 категории ДТ350 из стали марки Э76ХФ текущего производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Стыковые соединения условно замаркированы 1, 2, 3. Сварку стыков проводили на машине контактной стыковой сварки МСР 63.01А рельсоварочной лаборатории АО «ЕВРАЗ ЗСМК», режим представлен в табл. 1. Параметры режима сварки соответствуют требованиям ТУ 24.10.75-369-01124323 – 2019, приложение № 5 [17].

С целью исследования характера распределения остаточных напряжений в зоне сварного шва после сварки, а также влияния термической обработки на изменение эпюры остаточных напряжений стыковое соединение 1 исследовали в состоянии после сварки, сварные стыки 2 и 3 подвергали термической обработке на установке индукционного нагрева УИН 001-100/РТ-С(М) по режимам, представленным в табл. 2.

Сварной стык 3 подвергали «классической» термообработке по принятой на рельсовароч-

ных предприятиях технологии с нагревом токами высокой частоты [18] металла в зоне сварного шва до температур выше точки полиморфного превращения, выдержкой и ускоренным охлаждением.

Сварной стык 2 после сварки подвергали отпуску для снятия напряжений, включающим нагрев до 550 °С, выдержку в течение 240 с и охлаждение на воздухе.

Остаточные напряжения определяли тензометрическим методом согласно требований п. 7.23 ГОСТ Р 51685 – 2013 [19] с монтажом дополнительных датчиков по периметру образца. Данный метод основан на измерении упругих деформаций, возникающих на поверхности темплета при вырезке его из рельса.

Следует отметить, что в соответствии с отечественной [19] и зарубежной [20] нормативной документацией контроль остаточных напряжений рельсов проводится в зоне средней трети подошвы, а касательно сварных стыков не регламентирован и не применяется как критерий качества при производстве рельсовой плети.

Режимы термической обработки
Table 2. Heat treatment modes

Стык	Категория	Марка стали	$t_{нач}$, °С	Параметры термообработки				
				$t_{наг}$, °С	$T_{наг}$, с	$T_{выд}$, с	$T_{охл}$, с	$t_{кон}$, °С
2	ДТ350	Э76ХФ	20	550	10	240	–	–
3	ДТ350	Э76ХФ	20	950	40	180	280	320

Примечание: $t_{нач}$ – начальная температура пробы; $t_{наг}$ – температура нагрева; $T_{наг}$, $T_{выд}$ и $T_{охл}$ – время нагрева, выдержки и охлаждения; $t_{кон}$ – температура конца термической обработки.

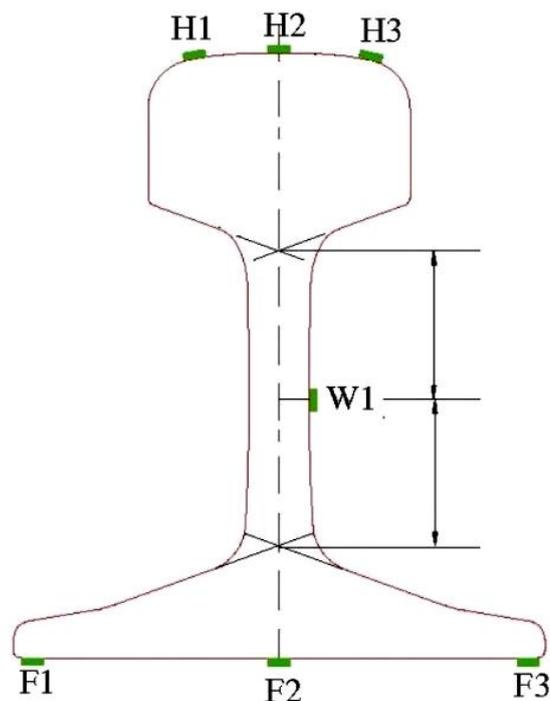


Рис. 1. Схема расположения тензорезисторов
Fig. 1. Strain gauge layout

Измерения остаточных напряжений в головке, шейке и подошве рельсов по линии сварного стыка проводили с применением измерительного усилителя Spider 8 и с использованием тензорезисторов марки FLA-3-11-1LJC (производство фирмы Tokyo Measuring Instruments Lab.), с принятым модулем упругости $2,07 \cdot 10^5$ МПа.

В исследуемом сечении (ось сварного шва) на поверхность сварного стыка вдоль продольной оси стыков наклеивали семь тензорезисторов в соответствии со схемой (рис. 1):

- три датчика монтировали на поверхности катания головки: по вертикальной оси симметрии (датчик H2) и на расстоянии 20 мм в сторону левой и правой выкружек (датчики H1 и H3 соответственно);

- один датчик (W1) монтировали в центральной части шейки;

- три датчика монтировали на поверхности основания подошвы: по вертикальной оси симметрии (датчик F2) и на расстоянии 55 мм в сторону левой и правой боковых граней пера подошвы (датчики F1 и F3 соответственно).

После наклейки тензорезисторов и сушки измеряли начальные показания, полученные значения заносили в таблицу. Далее из рельсовой пробы вырезали темплет толщиной 20 ± 1 мм с тензорезисторами, после чего проводили повторные замеры. По разнице значений (с учетом модуля упругости) определяли величины продольных остаточных напряжений.

Результаты исследования

Результаты измерения остаточных напряжений приведены в табл. 3 (знак «-» перед значением свидетельствует о наличии сжимающих остаточных напряжений, «+» – растягивающих).

Т а б л и ц а 3

Результаты измерения остаточных напряжений
Table 3. Residual stress measurement results

Тензорезистор	Напряжения, МПа, в стыке			Координаты расположения, мм
	1 (без ТО)	2 (ТО)	2 (подогрев)	
H1 (головка)	-417	-586	-264	17
H2 (головка)	-363	-417	-223	37
H3 (головка)	-438	-568	-210	57
W1 (шейка)	+68	+254	+59	95
F1 (подошва)	-464	-535	-433	20
F2 (подошва)	-228	-57	-181	75
F3 (подошва)	-574	-518	-426	130

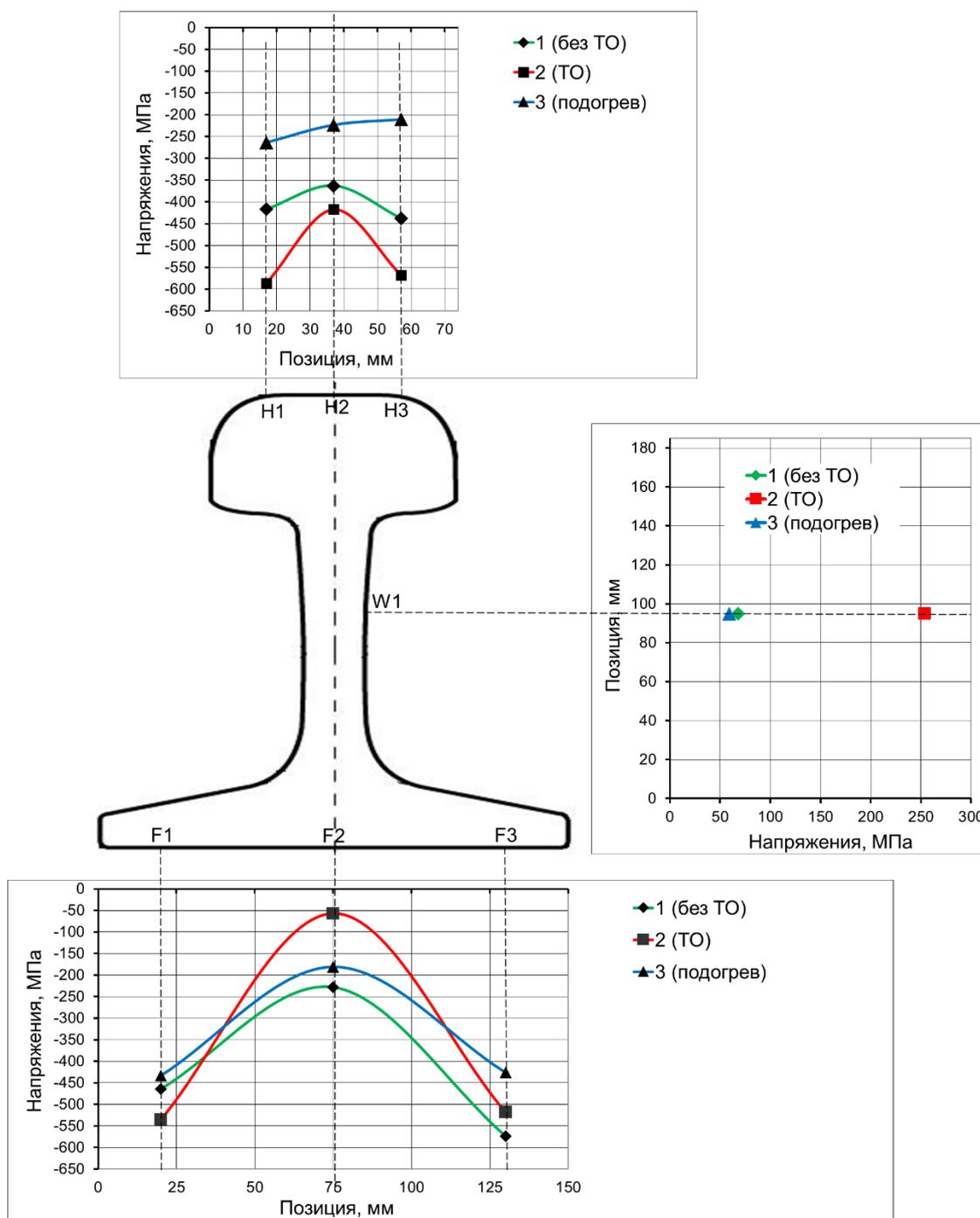


Рис. 2. Эпюры распределения остаточных напряжений по режимам 1 – 3

Fig. 2. Residual stress distribution diagrams по режимам 1 – 3

Эпюры остаточных напряжений сварного стыка без термообработки и после термообработки по двум режимам на УИН представлены на рис. 2. Для всех образцов в головке и подошве рельсов преобладают сжимающие напряжения, в шейке – растягивающие. Наиболее высокие остаточные напряжения в головке рельсов (от 417 до 586 МПа) наблюдаются в пробах, подвергнутых термообработке по стандартной технологии, наименьшие (от 210 до 264 МПа) – при подогреве сварного стыка до 550 °С. В стыках после сварки

(без термообработки) остаточные напряжения в головке составили 363 – 438 МПа.

В шейке рельса (позиция W1) остаточные напряжения для стыка 1 в состоянии после сварки (без термообработки) и стыка 3, нагретого до 550 °С, находятся на сопоставимом уровне: +68 и +59 МПа соответственно. Остаточные напряжения в шейке стыка после термообработки по классической технологии (проба 2) составили +254 МПа, что более чем в три раза выше относительно остаточных напряжений стыков 1 и 3.

Распределения остаточных напряжений в подошве рельса исследуемых сварных стыков имеет схожий характер: с увеличением значений от центра подошвы к краю пера. Наиболее ярко выражено изменение остаточных напряжений на пробе 2 после термообработки по классическому режиму: в центре подошвы сжимающие напряжения снизились до 59 МПа, при этом сжимающие напряжения по краям пера подошвы составляют 510 – 535 МПа, что может отрицательно влиять на усталостную прочность сварного стыка в процессе эксплуатации.

Подогрев сварного стыка до 550 °С (стык 3) снижает напряжения относительно сварного стыка без термообработки, наиболее значительное снижение напряжений наблюдается на поверхности катания головки.

Выводы

Проведенные исследования сварных стыков рельсов типа Р65 категории ДТ350 из стали марки Э76ХФ показали, что в головке и подошве сварных стыков по месту сварного шва образуются сжимающие остаточные напряжения, в шейке – растягивающие. Термообработка рельсов по классической технологии приводит к существенному снижению напряжений по центру подошвы и наиболее значительному перепаду значений напряжений между центром и боковыми гранями, наиболее высоким сжимающим остаточным напряжениям в головке и растягивающим в шейке.

Подогрев сварного стыка до 550 °С приводит к небольшому снижению остаточных напряжений по сравнению с состоянием непосредственно после сварки (без термообработки). В целом эпоэра остаточных напряжений с превалированием сжимающих напряжений должна оказывать благоприятное влияние на усталостную прочность стыка в процессе эксплуатации.

Для всесторонней оценки влияния термообработки на качественные характеристики и потребительские свойства стыка требуется проведение дополнительных исследований микроструктуры, механических свойств и твердости, статических испытаний на трехточечный изгиб, а также проведение циклических испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старовойтов М.М., Ваганова О.Н. Ключевые ориентиры развития путевого комплекса // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 12. С. 2–4.
2. Jing G., Siahkouhi M., Edwards J.R., Dersch M.S., Hoult N.A. Smart railway sleepers – a review of recent developments, challenges, and future prospects // *Construction and Building Materials*. 2021. No. 271. P. 776–778. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121533>
3. Akkerman G.L., Skutina M.A. Control over transverse shifts of rail sleeper lattice which impact on deformation of ballast layer // *Procedia Engineering*. 2017. No. 189. P. 181–185. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.029>
4. Godefroid L.B., Faria G.L., Cândido L.C., Viana T.G. Failure analysis of recurrent cases of fatigue fracture in flash butt welded rails // *Engineering Failure Analysis*. 2015. No. 58 (2). P. 407–416. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.05.022>
5. Jihua L., Peng C., Yangting O., Guiyuan Z., Pijie Y., Zhibiao X., Yongjian L., Peng L., Chenggang H., Xin D., Yujun Z. Study on wear and rolling contact damage mechanism between quenched U75V rail and wheels with different microstructures // *Wear*. 2023. No. 512-513. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204544>
6. Brennan L., Gedney, Dimitrios C., Rizos. Combining welding-induced residual stress with thermal and mechanical stress in continuous welded rail // *Results in Engineering*. 2022. No. 16. C. 1–95. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100777>
7. Xiu-Yang F., Hao-Nan Z., Dong-Wen M., Ze-Jian W., Wei H. Influence of welding residual stress on subsurface fatigue crack propagation of rail // *Engineering Fracture Mechanics*. 2022. No. 271. Article 108642. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108642>
8. Yang L., Kin S.T., Nellian A.S., John Hock L.P. Structural fatigue investigation of thermite welded rail joints considering weld-induced residual stress and stress relaxation by cyclic load // *Engineering Structures*. 2021. No. 235. Article 112033. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112033>
9. Ninshu M., Zhipeng C., Hui H., Dean D., Murakawa H., Jiluan P. Investigation of welding residual stress in flash-butt joint of U71Mn rail steel by numerical simulation and experiment // *Materials & Design*. 2015. No. 88. P. 1296–1309. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.124>
10. Ghazanfari M., Tehrani P. H. Increasing fatigue crack initiation life in butt-welded UIC60 rail by optimization of welding process parameters // *International Journal of Fatigue*. 2021. No. 151. Article 106367. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106367>
11. Крейнис З.Л., Селезнева Н.Е. Бесстыковой путь. Устройство, техническое обслуживание, ремонт. Москва: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. 472 с.
12. Zerbst U., Lundén R., Edel K.-O., Smith R.A. Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails – a review // *Engineering Fracture*

- Mechanics. 2009. Vol. 76. No. 17. P. 2563–2601. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2009.09.003>
13. Hang S., Chung L. P., Peter M., Qianhua K., Guozheng K., Wenyi Y. Numerical study on the ratcheting performance of rail flash butt welds in heavy haul operations // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021. No. 199. Article 106434. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106434>
 14. Mubarak C. K. A., Upadhyay A. Stability of continuous welded rail on steel bridge subjected to thermal loading // *Structures*. 2021. No. 34. P. 4524–4531. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.10.050>
 15. Залива Д.В. Влияние эксплуатационных, технических и технологических факторов на образование дефектов рельсов и мероприятия по снижению их воздействия. В кн.: Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений. Сборник научных докладов. Екатеринбург: ОАО «УИМ», 2022. С. 95–109.
 16. Bauri L.F., Alves L.H.D., Pereira H.B., Tschiptschin A.P., Goldenstein H. The role of welding parameters on the control of the microstructure and mechanical properties of rails welded using FBW // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. No. 4. P. 8058–8073. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.030>
 17. ТУ 24.10.75-369-01124323 – 2019 «Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом». Введ. 1 января 2021 г. Москва: ОАО «РЖД», 2021. 40 с.
 18. Шур Е.А. Повреждения рельсов. Москва: Интекст, 2012. 192 с.
 19. ГОСТ Р 51685 – 2013 Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. Введ. 14 октября 2013. Москва: Стандартинформ, 2014. 95 с.
 20. DIN EN 13674-1:2017. Железные дороги. Верхнее строение пути. Рельсы. Часть 1. Рельсы Виньоля 46 кг/м и более. Технический комитет (CEN/TC 256) «Железные дороги» (секретариат DIN, Германия). Европейский комитет по железным дорогам (CEN). 2017. 113 с.
- #### REFERENCES
1. Starovoitov M.M., Vaganova O.N. Key guidelines for the development of the travel complex. *Put' i putevoe khozyaistvo*. 2021, no. 12, pp. 2–4. (In Russ.)
 2. Jing G., Siahkouhi M., Edwards J. R., Dersch M. S. Hoult N.A. Smart railway sleepers – a review of recent developments, challenges, and future prospects. *Construction and Building Materials*. 2021, no. 271, pp. 776–778. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121533>
 3. Akkerman G.L. Skutina M.A. Control over transverse shifts of rail sleeper lattice which impact on deformation of ballast layer. *Procedia Engineering*. 2017, no. 189, pp. 181–185. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.029>
 4. Godefroid L.B., Faria G.L., Cândido L.C., Viana T.G. Failure analysis of recurrent cases of fatigue fracture in flash butt welded rails. *Engineering Failure Analysis*. 2015, no. 58 (2), pp. 407–416. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.05.022>
 5. Jihua L., Peng C., Yangting O., Guiyuan Z., Pijie Y., Zhibiao X., Yongjian L., Peng L., Chenggang H., Xin D., Yujun Z. Study on wear and rolling contact damage mechanism between quenched U75V rail and wheels with different microstructures. *Wear*. 2023, no. 512–513, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204544>
 6. Brennan L. Gedney, Dimitrios C. Rizos. Combining welding-induced residual stress with thermal and mechanical stress in continuous welded rail. *Results in Engineering*. 2022, no. 16, pp. 1–95. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100777>
 7. Xiu-Yang F., Hao-Nan Z., Dong-Wen M., Ze-Jian W., Wei H. Influence of welding residual stress on subsurface fatigue crack propagation of rail. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022, no. 271, article 108642. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108642>
 8. Yang L., Kin S.T., Nellian A.S., John Hock L.P. Structural fatigue investigation of thermite welded rail joints considering weld-induced residual stress and stress relaxation by cyclic load. *Engineering Structures*. 2021, no. 235, article 112033. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112033>
 9. Ninshu M., Zhipeng C., Hui H., Dean D., Murakawa H., Jiluan P. Investigation of welding residual stress in flash-butt joint of U71Mn rail steel by numerical simulation and experiment. *Materials & Design*. 2015, no. 88, pp. 1296–1309. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.124>
 10. Ghazanfari M., Tehrani P.H. Increasing fatigue crack initiation life in butt-welded UIC60 rail by optimization of welding process parameters. *International Journal of Fatigue*. 2021, no. 151, article 106367. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106367>
 11. Kreinis Z.L., Selezneva N.E. *Besstykovoi put'. Ustroistvo, tekhnicheskoe obsluzhivanie, remont*. Moscow: Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2012, 472 p. (In Russ.)

12. Zerbst U., Lundén R., Edel K.-O., Smith R.A. Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails – a review. *Engineering Fracture Mechanics*. 2009, vol. 76, no. 17, pp. 2563–2601. <https://doi.org/10.1016/j.engfrac.mech.2009.09.003>
13. Hang S., Chung L. P., Peter M., Qianhua K., Guozheng K., Wenyi Y. Numerical study on the ratcheting performance of rail flash butt welds in heavy haul operations. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021, no. 199, article 106434. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106434>
14. Mubarack C. K. A., Upadhyay A. Stability of continuous welded rail on steel bridge subjected to thermal loading. *Structures*. 2021, no. 34, pp. 4524–4531. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.10.050>
15. Zaliva D.V. The influence of operational, technical and technological factors on the formation of rail defects and measures to reduce their impact. In: *Improving the quality and operating conditions of rails and rail fasteners. Collection of scientific reports. Yekaterinburg: JSC "UIM". 2022, pp. 95–109. (In Russ.)*.
16. Bauri L.F., Alves L.H.D., Pereira H.B., Tschiptschin A.P., Goldenstein H. The role of welding parameters on the control of the microstructure and mechanical properties of rails welded using FBW. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020, vol. 9, no. 4, pp. 8058–8073. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.030>
17. TU 24.10.75-369-01124323 – 2019 "Railway rails welded by electric contact method". Introduction. January 1, 2021. Moscow: JSC "Russian Railways", 2021, 40 p. (In Russ.).
18. Shur E.A. *Rail damage*. Moscow: Intext, 2012, 192 p. (In Russ.).
19. GOST R 51685 – 2013 *Railway rails. General technical conditions. Introduction*. October 14, 2013. Moscow: Standartinform, 2014, 95 p. (In Russ.).
20. DIN EN 13674-1:2017. *Railways. The upper structure of the path*. Rails. Part 1. Vignole rails 46 kg/m and more. Technical Committee (CEN/TC 256) "Railways" (DIN secretariat, Germany). European Committee on Railways (CEN). 2017, 113 p. (In Russ.).

Сведения об авторах

Егор Владимирович Полевой, к.т.н., начальник отдела, АО «ЕВРАЗ ЗСМК»
E-mail: Egor.Polevoj@evraz.com
ORCID: 0000-0001-9025-5442

Михаил Александрович Мартынов, главный специалист по сварке, АО «ЕВРАЗ ЗСМК»
E-mail: Mikhail.Martynov@evraz.com
ORCID: 0000-0001-9901-6384

Сергей Валерьевич Коновалов, д.т.н., профессор кафедры механики и машиностроения, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: konovalov@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0003-4809-8660

Илья Игоревич Чумачков, аспирант кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: I.I.Chumachkov@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-4721-6821

Information about the authors

Egor V. Polevoy, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, JSC EVRAZ ZSMK
E-mail: Egor.Polevoj@evraz.com
ORCID: 0000-0001-9025-5442

Mikhail A. Martynov, Chief Welding Specialist, JSC EVRAZ ZSMK
E-mail: Mikhail.Martynov@evraz.com
ORCID: 0000-0001-9901-6384

Sergey V. Konovalov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanics and Mechanical Engineering, Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University
E-mail: konovalov@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0003-4809-8660

Ilya I. Chumachkov, postgraduate student of the Department of Mechanics and Mechanical Engineering, Siberian State Industrial University
E-mail: I.I.Chumachkov@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-4721-6821

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 16.11.2022
 После доработки 24.11.2022
 Принята к публикации 25.11.2022

Received 16.11.2022

Revised 24.11.2022

Accepted 25.11.2022

Оригинальная статья

УДК 621.762

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-100-105

**АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕЧЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ХРОМСОДЕРЖАЩИХ
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХ ПОРОШКОВ**

© 2022 г. С. В. Харди́ков¹, С. А. Граш́ков¹, Е. В. Агее́ва²

¹Курская государственная сельскохозяйственная академия (Россия, 305021, Курск, ул. Карла Маркса, 70)

²Юго-Западный государственный университет (Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94)

Аннотация. Представлены результаты анализа характеристик спеченных изделий из хромсодержащих электроэрозионных порошков. Одним из основных направлений развития технологии машиностроения в настоящее время является совершенствование существующих и разработка новых безотходных, экологически чистых, материалосберегающих производственных процессов. В решении этой проблемы определенная роль принадлежит порошковой металлургии. В последние годы большое внимание уделяется развитию методов изготовления порошковых материалов высокой плотности. Для реализации исследований были выбраны отходы хромсодержащей стали марок ШХ15 и Х13. Путем электрической эрозии на установке электроэрозионного диспергирования получили порошковые материалы. В качестве рабочей среды диспергирования был выбран бутиловый спирт. Консолидация порошка проведена методом искрового плазменного спекания с использованием системы SPS 25-10 (Thermal Technology, США). Установлено, что микротвердость спеченного образцов стали марок ШХ15 и Х13 составляет 154 и 461 НВ. Установлено, что пористость спеченных образцов стали марок Х13 и ШХ15 равна 3,34 (95 % пор имеют размер до 2 мкм) и 1,72 % (90 % пор имеют размер до 1 мкм). По результатам исследований установлено, что микротвердость спеченного образца из стали марки ШХ15 ниже, чем у образца из стали марки Х13. Пористость у образца из стали марки ШХ15 ниже, чем у образца из стали марки Х13. Спеченные изделия из порошкового материала стали марки Х13 имеют более твердую поверхность и могут использоваться при производстве мелких нагруженных деталей.

Ключевые слова: электроэрозионное диспергирование, сталь марки ШХ15, сталь марки Х13, микротвердость, пористость, спирт бутиловый

Для цитирования: Харди́ков С.В., Граш́ков С.А., Агее́ва Е.В. Анализ характеристик спеченных изделий из хромсодержащих электроэрозионных порошков // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 100 – 105. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-100-105](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-100-105)

Original article

**ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF SINTERED PRODUCTS MADE OF
CHROMIUM-CONTAINING ELECTROEROSIVE POWDERS**

© 2022 S. V. Hardikov¹, S. A. Gashkov¹, E. V. Ageeva²

¹Kursk State Agricultural Academy (70 Karl Marx str., Kursk, 305021, Russian Federation)

²Southwest State University (94 ul. 50 let Oktyabrya, Kursk, 305040, Russian Federation)

Abstract. The article presents the results of the analysis of the characteristics of sintered products made of chromium-containing electroerosive powders. One of the main directions of the development of mechanical engineering technology at present is the improvement of existing and the development of new waste-free, environmentally friendly, material-saving production processes. Powder metallurgy plays a certain role in solving this problem. In recent years, much

attention has been paid to the development of methods for the manufacture of high-density powder materials. For the implementation of the planned studies, waste chromium-containing steels SHX15 and H13 have been selected. Powder materials were obtained by electrical erosion at the electro-erosive dispersion unit developed by the authors. Butyl alcohol was chosen as the working medium of dispersion. The powder was consolidated by the spark plasma sintering method using the spark plasma sintering system SPS 25-10 (Thermal Technology, USA). It is established that the microhardness of the sintered steel sample SHH15 is equal to 154 HV. The microhardness of the sintered steel sample H13 is equal to 461 HV. It was found that the porosity of the sintered steel sample H13 is equal to 3.34 %, and also that 95 % of the pores have a size of up to 2 microns. The porosity of the sintered steel sample SHH15 is 1.72 %, and also that 90 % of the pores have a size of up to 1 microns. According to the results of the research, it was found that the microhardness of the sintered sample made of steel SHH15 is lower than that of the sample made of steel H13. The porosity of a sample made of steel SHH15 is lower than that of a sample made of steel H13. Therefore, it can be concluded that sintered products made of powder material steel H13 have a harder surface and can be used in the production of small loaded parts.

Keywords: electroerosive dispersion, SHH15, H13, microhardness, porosity, butyl alcohol

For citation: Hardikov S.V., Grashkov S.A., Ageeva E.V. Analysis of the characteristics of special products made of chromium-containing electroerosive powders. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4 (42), pp. 100 – 105. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-100-105](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-100-105)

Введение

Одним из основных направлений развития технологии машиностроения в настоящее время является совершенствование существующих и разработка новых безотходных, экологически чистых, материалосберегающих производственных процессов, то есть таких процессов, которые обеспечивают получение заготовок с минимальными припусками под последующую механическую обработку или вообще без них при одновременном снижении расхода дефицитных материалов. В решении этой проблемы определенная роль принадлежит порошковой металлургии. В последние годы большое внимание уделяется развитию методов изготовления порошковых материалов высокой плотности (горячее вакуумное прессование, горячая и холодная штамповка, экструзия, ковка, прокатка).

Для получения металлических порошков большой интерес вызывает метод электроэрозионного диспергирования. Этот метод является одним из наиболее перспективных способов получения порошков. Метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД) отличается относительно невысокими энергетическими затратами и экологической чистотой процесса, позволяет получить порошки из отходов производства и потребления [1 – 11]. Тем не менее, широкое использование метода ЭЭД сдерживается отсутствием информации по оптимизации режимов порошкообразования и свойствам полученных порошков. Для широкого использования рассматриваемого метода требуются обширные теоретические и экспериментальные исследования [12 – 21].

Целью настоящей работы является проведение исследований характеристик спеченных изделий из хромосодержащих электроэрозионных порошков.

Методы и принципы исследования

Для реализации намеченных исследований были выбраны хромосодержащих сталей марок ШХ15 и Х13. Путем электрической эрозии на установке электроэрозионного диспергирования получили порошковые материалы. В качестве рабочей среды диспергирования был выбран бутиловый спирт.

Консолидация порошка проведена методом искрового плазменного спекания с использованием системы искрового плазменного спекания SPS 25-10 (Thermal Technology, США). Исходный материал размещали в матрице из графита, помещаемой под пресс в вакуумной камере. Электроды, интегрированные в механическую часть пресса, подводят электрический ток к матрице и создают искровые разряды между спекаемыми частицами материала, обеспечивая интенсивное взаимодействие. Система SPS 25-10 предназначена для спекания порошковых материалов под давлением (метод искрового плазменного спекания). В искровом плазменном спекании используется импульсный постоянный ток с высоким значением силы тока для быстрого и равномерного распределения энергии искровой плазмы между частицами. Система SPS 25-10 позволяет спекать электропроводные, неэлектропроводные и композитные материалы до высокой степени плотности при максимальной температуре 2400 °С в аргоне, азоте или вакууме (относительно конструкции матрицы, размера образца и первоначальных характеристик материала) при предельном уровне вакуума 10^{-3} мм. рт. столба (чистая, пустая, сухая комната и дегазированная камера) и мощности пресса 25 т общего усилия.

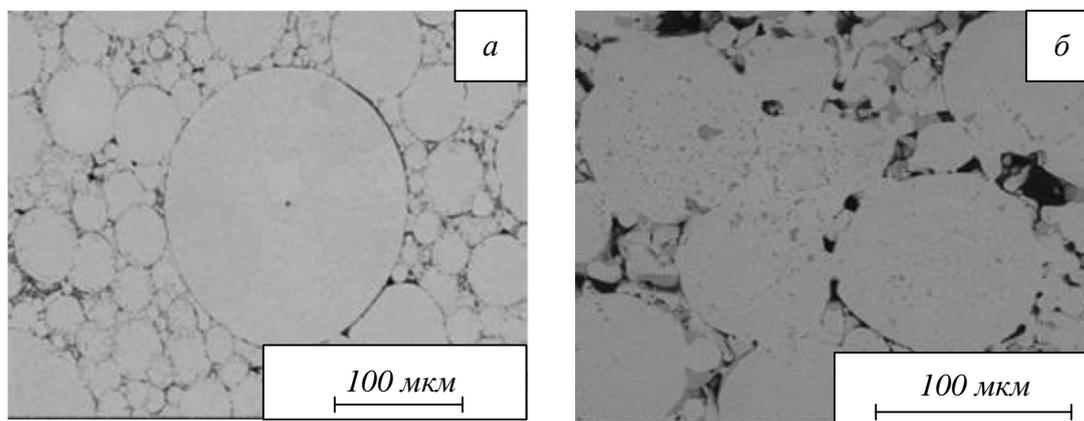


Рис. 1. Микроструктура образцов стали марок Х13 (а) и ШХ15 (б)
 Fig. 1. Microstructure of samples of steel grades Kh13 (a) and ShKh15 (b)

Основные результаты

Металлографическим методом исследовали пористости спеченных образцов (по поперечному шлиффу) (рис. 1, 2(N – отношение количества пор, определенного размера. Ко всему объему пор; D – средний размер пор), табл. 1). Установлено, что микротвердость спеченных образцов стали марок ШХ15 и Х13 составляет 154 HV и 461 HV.

Микротвердость спеченных образцов приведена в табл. 2.

Установлено, что пористость спеченных образцов стали марок Х13 и ШХ15 равна 3,34 (95 % пор имеют размер до 2 мкм) и 1,72 % (90 % пор имеют размер до 1 мкм).

Выводы

По результатам исследований, направленных на изучение характеристик спеченных изделий из хромсодержащих электроэрозионных порошков, установлено, что микротвердость спеченных образцов из стали марки ШХ15 ниже, чем у стали марки Х13. Пористость у образцов из стали марки ШХ15 ниже, чем у образцов из стали марки Х13. Спеченные изделия из порошкового материала стали марки Х13 имеют более твердую поверхность и могут использоваться при производстве мелких нагруженных деталей, большая пористость в срав-

нении со спеченными изделиями из стали марки ШХ15 позволит лучше удерживать смазку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ageev E.V., Loktionova O.G., Altukhov A.Y. Obtaining and research of additive products from electro-erosive cobalt-chrome powders // Materials Science Forum. 2020. Vol. 989. P. 801–805. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.801>
2. Ageev E.V., Altukhov A.Y., Pereverzev A.S. Study of the additive products of electroerosive cobalt-chrome powders by x-ray methods // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2020. Vol. 14. No. 6. P. 1279–1286. <https://doi.org/10.1134/S1027451020060221>
3. Ageev E.V., Pereverzev A.S. Microstructure and phase composition of electroerosion materials based on bronze used for the application of metallization and galvanic coatings // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2020. Vol. 14. No. 6. P. 1287–1289. DOI: 10.1134/S1027451020060233\
4. Ageev E.V., Altukhov A.Y., Valguzov D.I. Microanalysis of additive products from

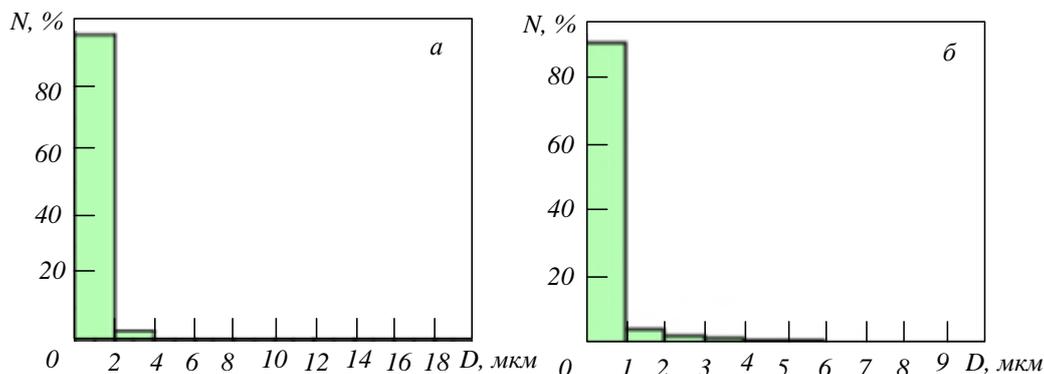


Рис. 2. Пористость образцов стали марок Х13 (а) и ШХ15 (б)
 Fig. 2. Porosity of samples of steel grades Kh13 (a) and ShKh15 (b)

Т а б л и ц а 1

Пористость (металлографический метод)**Table 1. Porosity (metallographic method)**

Образец	Пористость, %	D_{\min}	D_{\max}	D_{med}
X13	3,34	0,1	15,3	0,6
ШХ15	1,72	0,1	9,8	0,1

Пр и м е ч а н и е. D_{\min} , D_{\max} и D_{med} – минимальный, максимальный и средний размеры пор в образце.

Т а б л и ц а 2

Микротвердость**Table 2. Microhardness**

Номер отпечатка	Значение HV при нагрузке 200 г образцов стали марки	
	ШХ15	X13
1	152	436
2	146	485
3	141	469
4	139	478
5	143	436
6	144	453
7	149	456
8	277	450
9	136	475
10	112	472

electro-erosion cobalt-chrome powders // *Solid State Phenomena*. 2020. Vol. 299. P. 508–512. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.508>

- Ageev E.V., Altukhov A.Y., Korolyov M.S. The phase composition of products from electro-erosive cobaltchrome powders, obtained by additive technologies // *Solid State Phenomena*. 2020. Vol. 299. P. 611–616. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.611>
- Pykhtin A.I., Ageev E.V., Altukhov A.Yu., Emelyanov I.P. X-ray spectral microanalysis of sintered samples from electroerosive cobalt-chromium powders // *Journal of Applied Engineering Science*. 2018. Vol. 16. No. 1. P. 83–86. <https://doi.org/10.5937/jaes16-16497>
- Ageev E.V., Altukhov A.Y., Pikalov S.V., Serebrovskii V.I., Safronov R.I. Research of mechanical properties of the sintered samples from electro-erosion cobalt-chromium powder // *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*. 2018. Vol. 7. No. 2. P. 28–29. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.2.9895>
- Ageev E.V., Altukhov A.Y., Gulidin S.S. X-ray microanalysis of hardmetal powder, produced by electroerosion dispersion of vk8 alloy in kerosene environment // *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 870. P. 422–427. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.870.422>
- Altukhov A.Yu., Ageev E.V., Kuznetsova L.P., Kuznetsova L.P., Pikalov S.V. Powder sintering of high speed steel // *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*. 2016. Vol. 7. No. 2. P. 717–724.
- Altukhov A.Y., Latypova G.R., Andreeva L.P. Effect of the technological melting parameters of cobalt–chromium powders produced by electric discharge dispersion on the properties of the additive products made from them // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2022. Vol. 2022. No. 6. P. 694–698. <https://doi.org/10.1134/S0036029522060040>
- Пат. 2681238. Способ получения спеченных изделий из электроэрозионных вольфрамосодержащих нанокomпозиционных порошков / Е.В. Агеев, Е.В.Агеева, А.Ю. Алтухов, Е.П. Новиков, А.С. Переверзев; заявка № 2018112280 от 05.04.2018.
- Пат. 2018116408. Способ получения металлического нанопорошка из отходов свинцовой бронзы в дистиллированной воде / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, А.С. Переверзев; заявл. 03.05.2018; опубл. 09.01.2020. Бюл. № 1.
- Пат. 2713900. Способ получения спеченных изделий из изостатически спрессованных электроэрозионных нанокomпозиционных порошков свинцовой бронзы / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.С. Переверзев; заявка № 2018120632 от 05.06.2018.
- Агеев Е.В., Переверзев А.С., Горохов А.А. Исследование микроструктуры спеченных электроэрозионных нанокomпозиционных порошков свинцовой бронзы // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2018. № 3 (28). С. 29–35.
- Агеева Е.В., Переверзев А.С., Осьминина А.С. Влияние напряжения на электродах на производительность процесса электроэрозионного диспергирования отходов свинцовой бронзы. В кн.: *Поколение будущего. Взгляд молодых ученых: сб. науч. ст. 6-й Междунар. молод. науч. конф. Курск, 2017. С. 28–30.*
- Агеева Е.В., Переверзев А.С., Осьминина А.С. Исследование влияния емкости разрядных конденсаторов на производительность процесса электроэрозионного диспергирования отходов свинцовой бронзы в осветительном керосине. В кн.: *Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации.*

Сб. тр. XIII Междунар. науч.-практич. конф. Курск, 2018. С. 10–13.

17. Грашков С.А., Колмыков В.И. Повышение износостойкости стали ХВГ для деталей топливной аппаратуры дизелей методом нитроцементации // Известия Юго-Западно-го государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2020. Т. 10. № 1. С. 43–56.
18. Алехин Ю.Г., Грашков С.А., Угримов А.С. Инновационная технология восстановления изношенных деталей автотракторной техники путем применения электроискровых покрытий на основе электроэрозионных наноматериалов. В кн.: Прогрес-сивные технологии и процессы. Сборник научных статей 3-й Международной молодежной научно-практической конференции. Ответственный редактор Горохов А.А., 2016. С. 14–17.
19. Белан Э.А., Грашков С.А., Алехин Ю.Г. Показатели качества и технического уровня восстановления коленчатых валов. В кн.: Перспективное развитие науки, техники и технологий. Сборник научных статей материалы 6-й Международной научно-практической конференции. 2016. С. 22–26.
20. Агеева Е.В., Грашков С.А., Сысоев А.А. Микротвердость спеченных изделий из электроэрозионных коррозионно-стойких порошков, полученных в воде. В кн.: Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сб. науч. тр. 7-й Междунар. молодежной научно-практ. конф. 2020. С. 10–12.
21. Алехин Ю.Г., Грашков С.А., Угримов А.С. Качество наплавленных покрытий лемехов плугов. В кн.: Качество в производственных и социально-экономических системах: сб. науч. тр. 5-й Междунар. науч.-техн. конф. 2017. С. 11–13.
1. Ageev E.V., Loktionova O.G., Altukhov A.Y. Obtaining and research of additive products from electro-erosive cobalt-chrome powders. *Materials Science Forum*. 2020, vol. 989, pp. 801–805. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.801>
2. Ageev E.V., Altukhov A.Y., Pereverzev A.S. Study of the additive products of electroerosive cobalt-chrome powders by x-ray methods. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2020, vol. 14, no. 6, pp. 1279–1286. <https://doi.org/10.1134/S1027451020060221>
3. Ageev E.V., Pereverzev A.S. Microstructure and phase composition of electroerosion materials based on bronze used for the application of metallization and galvanic coatings. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2020, vol. 14, no. 6, pp. 1287–1289. <https://doi.org/10.1134/S1027451020060233>
4. Ageev E.V., Altukhov A.Y., Valguzov D.I. Microanalysis of additive products from electro-erosion cobalt-chrome powders. *Solid State Phenomenon*. 2020, vol. 299, pp. 508–512. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.508>
5. Ageev E.V., Altukhov A.Y., Korolyov M.S. The phase composition of products from electro-erosive cobalt-chrome powders, obtained by additive technologies. *Solid State Phenomenon*. 2020, vol. 299, pp. 611–616. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.611>
6. Pykhtin A.I., Ageev E.V., Altukhov A.Yu., Emelyanov I.P. X-ray spectral microanalysis of sintered samples from electroerosive cobalt-chromium powders. *Journal of Applied Engineering Science*. 2018, vol. 16, no. 1, pp. 83–86. <https://doi.org/10.5937/jaes16-16497>
7. Ageev E.V., Altukhov A.Y., Pikalov S.V., Serbrowskii V.I., Safronov R.I. Research of mechanical properties of the sintered samples from electro-erosion cobalt-chromium powder. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*. 2018, vol. 7, no. 2, pp. 28–29. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.2.9895>
8. Ageev E.V., Altukhov A.Y., Gulidin S.S. X-ray microanalysis of hardmetal powder, produced by electroerosion dispersion of vk8 alloy in kerosene environment. *Materials Science Forum*. 2016, vol. 870, pp. 422–427. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.870.422>
9. Altukhov A.Yu., Ageev E.V., Kuznetsova L.P., Kuznetsova L.P., Pikalov S.V. Powder sintering of high speed steel. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*. 2016, vol. 7, no. 2, pp. 717–724.
10. Altukhov A.Y., Latypova G.R., Andreeva L.P. Effect of the technological melting parameters of cobalt–chromium powders produced by electric discharge dispersion on the properties of the additive products made from them. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2022, vol. 2022, no. 6, pp. 694–698. <https://doi.org/10.1134/S0036029522060040>
11. Ageev E.V., Ageeva E.V., Altukhov A.Yu., Novikov E.P., Pereverzev A.S. A method for obtaining sintered products from electroerosive tungsten-containing nanocomposite pow-

- ders. Pat. 2681238. Application no. 2018112280 dated 05.04.2018.
12. Ageeva E.V., Ageev E.V., Pereverzev A.S. Pat. A method for obtaining metal nanopowder from lead bronze waste in distilled water; applicant and patent holder of the South-Western State University. No. 2018116408; application. 03.05.2018; publ. 09.01.2020. *Byul.* no. 1.
 13. Ageev E.V., Ageeva E.V., Pereverzev A.S. A method for obtaining sintered products from isostatically pressed electroerosive nanocomposition powders of lead bronze. Pat. 2713900. Application no. 2018120632 dated 05.06.2018.
 14. Ageev E.V., Pereverzev A.S., Gorokhov A.A. Investigation of the microstructure of sintered electroerosive nanocomposition powders of lead bronze. *Izvestiya Southwest State University. Series: Engineering and Technology.* 2018, no. 3 (28), pp. 29–35.
 15. Ageeva E.V., Pereverzev A.S., Osminina A.S. The effect of voltage on electrodes on the performance of the process of electroerosive dispersion of lead bronze waste. In: *Generation of the future: The view of young scientists: collection of scientific articles of the 6th International. young. Scientific conference.* Kursk, 2017, pp. 28–30.
 16. Ageeva E.V., Pereverzev A.S., Osminina A.S. Investigation of the effect of the capacitance of discharge capacitors on the performance of the process of electroerosive dispersion of lead bronze waste in lighting kerosene. In: *Modern instrumental systems, information technologies and innovations: Sat. tr. XIII International Scientific and Practical Conference.* Kursk, 2018, pp. 10–13.
 17. Grashkov S.A., Kolmykov V.I. Increasing the wear resistance of HVG steel for diesel fuel equipment parts by nitrocementation method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Engineering and Technology.* 2020, vol. 10, no. 1, pp. 43–56.
 18. Alekhin Yu.G., Grashkov S.A., Ugrimov A.S. Innovative technology of restoration of worn parts of automotive equipment by using electric spark coatings based on electroerosive nanomaterials. In: *Progressive technologies and processes. Collection of scientific articles of the 3rd International Youth Scientific and Practical Conference,* 2016, pp. 14–17.
 19. Belan E.A., Grashkov S.A., Alyokhin Yu.G. Indicators of quality and technical level of crankshaft restoration. *Perspective development of science, technology and technologies. collection of scientific articles materials of the 6th International Scientific and Practical Conference.* 2016, pp. 22–26.
 20. Ageeva E.V., Grashkov S.A., Sysoev A.A. Microhardness of sintered products from electro-

erosive corrosion-resistant powders obtained in water. In: *Product quality: control, management, improvement, planning: sat. sci. tr. 7th International. youth Scientific and Practical conference,* 2020, pp. 10–12.

21. Alekhin Yu.G., Grashkov S.A., Ugrimov A.S. The quality of deposited coatings of ploughshares. In: *Quality in production and socio-economic systems: collection of scientific tr. 5th International Scientific-technical conf,* 2017, pp. 11–13.

Сведения об авторах

Сергей Владимирович Харди́ков, к.т.н., доцент кафедры процессы и машины в агроинженерии, Курская государственная сельскохозяйственная академия
E-mail: hardikov1990@mail.ru
ORCID: 0000-0003-3835-6486

Сергей Александрович Граш́ков, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой процессы и машины в агроинженерии, Курская государственная сельскохозяйственная академия
E-mail: rigii46@mail.ru
ORCID: 000-0002-0870-0525

Екатерина Владимировна Агеева, д.т.н., профессор, профессор кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет
E-mail: ageeva-ev@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-2976-2813

Information about the authors

Sergey V. Hardikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Processes and Machines in Agroengineering, Kursk State Agricultural Academy
E-mail: hardikov1990@mail.ru
ORCID: 0000-0003-3835-6486

Sergey A. Grashkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Processes and Machines in Agroengineering, Kursk State Agricultural Academy
E-mail: rigii46@mail.ru
ORCID: 000-0002-0870-0525

Ekaterina V. Ageeva, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Materials Technology and Transport, Southwestern State University
E-mail: ageeva-ev@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-2976-2813

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
 The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 01.11.2022
 После доработки 11.11.2022
 Принята к публикации 14.11.2022

Received 01.12.2022
 Revised 11.11.2022
 Accepted 14.11.2022

Оригинальная статья

УДК 621.791.754

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-106-111

АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУРОВЫХ ШТАНГ ИЗ СТАЛИ 30ХГСА, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО УЛУЧШЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

© 2022 г. Е. В. Варнавский

ООО «Кузбасский центр сварки и контроля» (Россия, 650040, Кемерово, ул. Радищева, стр. 1Б)

Аннотация. В угольной, нефтяной и газодобывающей отраслях промышленности штанги буровые являются неотъемлемым инструментом. Они предназначены для передачи крутящего момента и осевого усилия от вращателя бурового станка к механическому буровому инструменту, а также для передачи высоконапорной водоцементной суспензии. Низкое качество рассматриваемой конструкции может привести к авариям на опасных производственных объектах и к человеческим жертвам.

Ключевые слова: сварка, штанга буровая, эффективность, разрушающий и неразрушающий контроль, экономия сварочных материалов, снижение энергозатрат, увеличение производительности труда

Для цитирования: Варнавский Е. В. Анализ механических характеристик буровых штанг из стали 30ХГСА, изготовленных по улучшенной технологии // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 106 – 111. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-106-111](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-106-111)

Original article

ANALYSIS OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF DRILL RODS FROM STEEL 30KHGSA, MANUFACTURED BY IMPROVED TECHNOLOGY

© 2022 E. V. Varnavskiy

LLC «Kuzbass Welding and Control Center» (1B st. Radishcheva, Kemerovo, 650040, Russian Federation)

Abstract. In the coal, oil and gas industry, drilling rods are an essential tool. They are designed to transmit torque and axial force from the rotator of a drilling rig to a mechanical drilling tool, as well as to transmit high-pressure water-cement slurry. The low quality of the considered design can lead to accidents at hazardous production facilities and to human casualties.

Keywords: welding, drill rod, efficiency, destructive and non-destructive testing, saving of welding materials, reduction of energy costs, increase in labor productivity

For citation: Varnavskiy E. V. Analysis of mechanical characteristics of drill rods from steel 30KHGSA, manufactured by improved technology. Bulletin of the Siberian State Industrial University. 2022, no. 4 (42), pp. 106 – 111. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-106-111](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-106-111)

Введение

Ручная дуговая сварка – это сварка плавлением штучными электродами, при которой подача электрода и перемещение дуги вдоль свариваемых кромок проводится вручную [1].

В настоящее время предприятия при производстве буровых штанг (рис. 1) сталкиваются с рядом проблем при применении рассматриваемого способа сварки: невысокая скорость сварки, небольшая производительность, потребность в постоянной замене электродов и зачистке

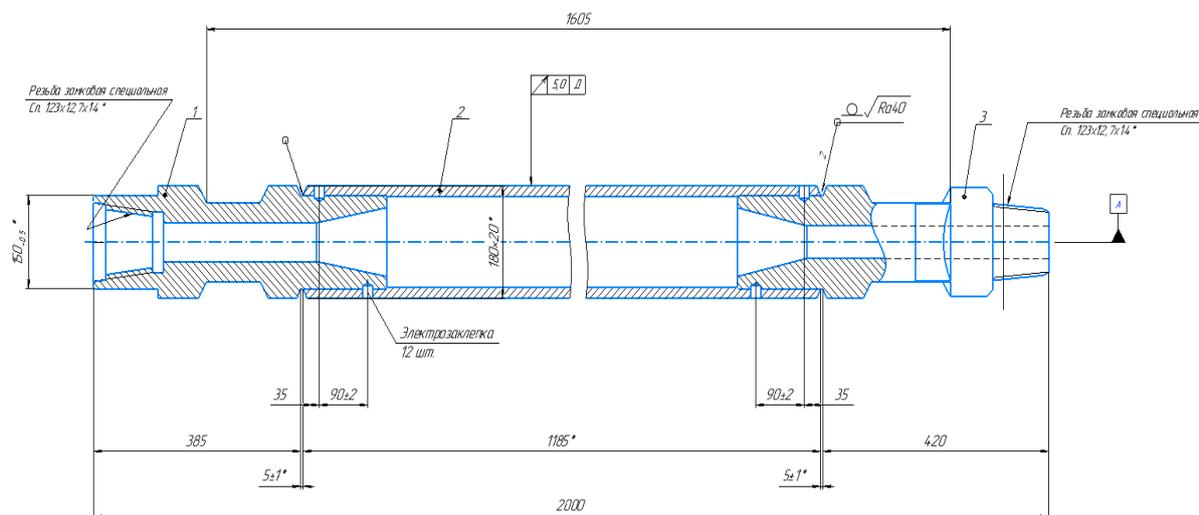


Рис. 1. Эскиз буровой штанги
Fig. 1. Sketch of a drill rod

сварного шва от шлака, лишние потери времени на прокатку электродов. Неудовлетворительное качество рассматриваемой конструкции (рис. 1) может привести к авариям на опасных производственных объектах, а также к человеческим жертвам [2, 3].

В современной экономике стремительно возрастающая конкуренция и повышение требований заказчиков к качеству продукции вынуждают любого производителя сварочной продукции непрерывно искать методы повышения производительности труда в области сварочного производства и улучшения качества продукции. Решить вышеуказанные задачи возможно за счет изменения способа сварки (взамен дуговой сварки плавящимся покрытым электродом применять дуговую сварку плавящимся электродом в защитном газе) [4].

При рассматриваемом способе сварки дуга будет гореть между электродной проволокой и изделием, но при этом подача плавящегося электрода (проволоки) будет механизирована. Изменение положения сварочной горелки вдоль шва с необходимой скоростью сварки будет выполняться сварщиком вручную.

Целью работы является установление целесообразности использования дуговой сварки плавящимся электродом в защитном газе при изготовлении штанг буровых.

Материал и технология сварки

В качестве основного материала применяется сталь марки 30ХГСА. При дуговой сварке плавящимся покрытым электродом применялись электроды марки ЭА-395/9 диаметром 3 – 5 мм. Для дуговой сварки плавящимся электродом в защитном газе была выбрана проволока сплошного сечения ОК Aristorod 69 диаметром 1,2 мм, близкая по химическому составу и механическим

свойствам электродам марки ЭА-395/9, что гарантирует более однородное соединение и позволяет сократить расходы на материалы более чем в два раза. При этом для защиты зоны дуги и сварочной ванны применяются защитные газы Ar и CO₂ (смесь в соотношении 80 и 20 % соответственно).

Конструктивные элементы при дуговой сварке плавящимся покрытым электродом представленной в НД [5]. Две заготовки свариваются между собой стыковым швом по ГОСТ 5264-80-С20. Толщина образца 20 мм, диаметр – 180 мм, длина шва – 565,2 мм, скос кромки 25° (рис. 2).

Конструктивные элементы при дуговой сварке плавящимся электродом в защитном газе представлены в НД [6]. Две заготовки свариваются между собой стыковым швом по ГОСТ 14771-76-С20. Толщина образца – 20 мм, диаметр – 180 мм, длина шва – 565,2 мм. Скос кромки составляет 20°, а также уменьшаются геометрические размеры сварного соединения (рис. 3).

Применение предлагаемой технологии позволит уменьшить общий угол разделки с 50 (рис. 4, а) до 40° (рис. 4, б), что снизит площадь поперечного сечения шва. В свою очередь это означает снижение количества проходов по сравнению с дуговой сваркой плавящимся покрытым электродом (как следствие – меньшее количество сварочных материалов), а также сокращение времени, затрачиваемого на операцию «сварка».

Результаты расчета экономической эффективности

Проведены расчеты следующих показателей: количество сварочных материалов и расход электроэнергии, затрачиваемых на сварку одного шва (табл. 1), скорость сварки и время, затраченные на сварку одного шва (табл. 2).

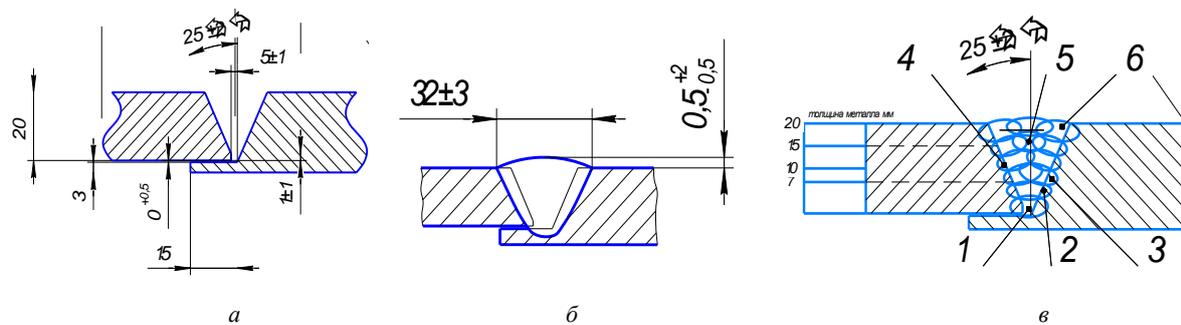


Рис. 2. Конструктивные элементы при дуговой сварке плавящимся покрытым электродом:
a и *б* – геометрические размеры при разделке кромок и сварного соединения; *в* – последовательность наложения слоев
 Fig. 2. Structural elements in arc welding with a consumable coated electrode:
a and *б* – geometric dimensions when cutting edges and of the welded joint; *в* – the sequence of overlay layers

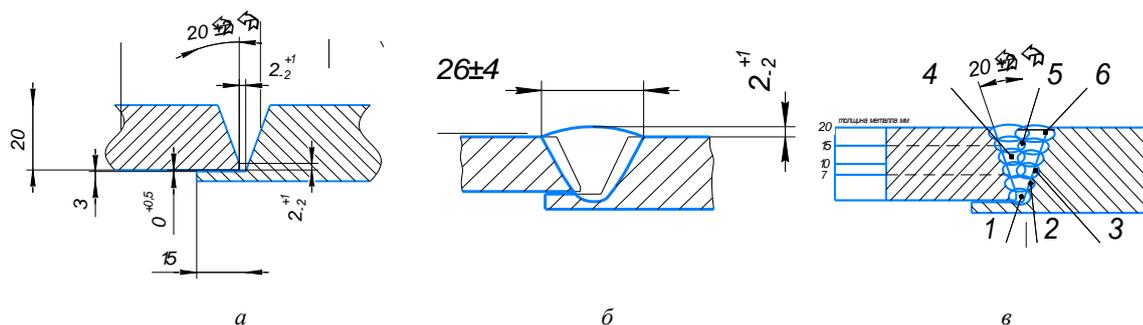


Рис. 3. Конструктивные элементы при дуговой сварке плавящимся электродом в защитном газе:
a и *б* – геометрические размеры при разделке кромок и сварного соединения; *в* – последовательность наложения слоев
 Fig. 3. Structural elements in gas-shielded consumable electrode arc welding:
a and *б* – geometric dimensions when cutting edges and of the welded joint; *в* – the sequence of overlay layers

Расчеты показали, что экономия сварочных материалов при использовании дуговой сварки плавящимся электродом в защитном газе проволокой Aristorod 69 составит 43,74 % на один шов. Экономия электроэнергии составит 48,28 % (рис. 5). Скорость сварки возрастет в 13,8 раза. Полное время сварки снизится в 15,44 раза (рис. 6). Наглядно экономию и улучшение видно на диаграммах (рис. 5, 6).

Время сварки одной буровой штанги диаметр 180 мм дуговой сваркой плавящимся покрытым электродом составляет 7,72 ч (463,2 мин.), а дуговой сваркой плавящимся электродом в защитном газе – 0,5 ч (30 мин.). Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что за рабочую восьмичасовую смену производительность труда возрастет в 15,44 раза.

Потребность в производстве штанг буровых на 2022 г. составляет 300 штук. Годовой экономический эффект составит 378 579 рублей.

Были проведены механические испытания рассматриваемого сварного соединения на растяжение и ударный изгиб, а также замеры твердости.

Испытание на растяжение (по ГОСТ 6996 – 66; ГОСТ 1497 – 84)

Испытание проводили на разрывной машине РМ-50М, предназначенной для статических испытаний металлов, арматурной стали, листового и круглого проката на растяжение при нормальной температуре по ГОСТ 1497 – 84 [7, 8]. Машина оснащена системой измерения, позволяющей проводить испытания с установленной скоростью нагружения, обеспечивающей измерение перемещения активного захвата и его индикацию, результата записывали на самопишущем двухкоординатном приборе. Погрешность испытания ± 1 %.

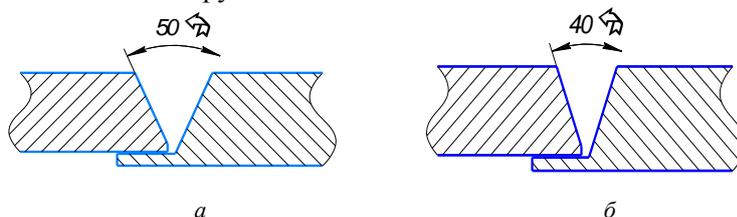


Рис. 4. Углы разделки кромки и при дуговой сварке плавящимся покрытым электродом (*a*) и электродом в защитном газе (*б*)
 Fig. 4. Bevel angles edge – in arc welding with a consumable coated electrode (*a*) and electrode in a protective gas (*б*)

Расчет экономического эффекта*Table 1. Calculation of the economic effect*

Наименование	Дуговая сварка плавящимся покрытым электродом	Дуговая сварка плавящимся электродом в защитном газе	Экономический эффект
Сварочные материалы на сварку одного шва, руб.	1031,8	451,3	– 580,5
Электроэнергия на сварку одного шва, руб.	8,7	4,2	– 4,5
		Итого:	– 576

Испытание на ударный изгиб (по ГОСТ 6996-66; ГОСТ 9454 – 78)

Испытание проводили на копре маятниковом МК-30А, предназначенном для испытания образцов, металлов и сплавов, на двухопорный ударный изгиб по ГОСТ 9454 – 78 (метод Шарпи) [7]. Запас энергии 150 Дж. Погрешность испытания $\pm 1\%$.

Испытания на твердость

Испытания проводили на приборе ТШ-2 для измерения твердости по Бринеллю, предназначенном для определения твердости металлов по методу вдавливания в испытуемое изделие стального закаленного шарика под действием установленной нагрузки в течении некоторого времени [9].

Выводы

Проанализировав полученные результаты, можно сделать следующие выводы о целесообразности использования дуговой сварки плавящимся электродом в защитном газе при изготовлении буровых штанг. Разработана технология сварки штанг буровых дуговой сваркой плавящимся электродом в защитном газе. Проведены механические испытания образцов материала из стали 30ХГСА, механические характеристики

соответствуют требованиям ГОСТ 8731 – 74. Внедрение указанной технологии позволит получить годовой экономический эффект в размере 378 579 руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абабков Н.В., Петрова Е.Е., Пимонов М.В. Технологии и оборудование дуговой сварки и резки. Кемерово: КузГТУ, 2017. 185 с.
2. Смирнов А.Н., Муравьев В.В., Абабков Н.В. Разрушение и диагностика металлов. Москва – Кемерово: Инновационное машиностроение. 2016. 479 с.
3. Никитенко М.С., Князьков К.В., Абабков Н.В. и др. Разработка комплекса средств технической диагностики, восстановления и упрочнения элементов горнодобывающего оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № S6. С. 447–456.
4. Министерство труда и социальной защиты РФ. URL: <https://mintrud.gov.ru/docs/mintrud/orders/143/> (дата обращения: 13.12.2022).
5. ГОСТ 5264 – 80. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры (с Изменением № 1). Москва: Стандарт-информ, 2010. 34 с.

Расчетные показатели*Table 2. Calculated indicators*

Наименование	Дуговая сварка плавящимся покрытым электродом	Дуговая сварка плавящимся электродом в защитном газе
Скорость сварки, м/ч	1	13,8
Полное время сварки, ч	3,86	0,25

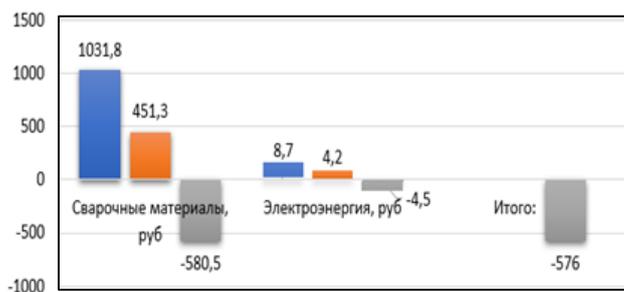


Рис. 5. Экономический эффект по затратам на сварочные материалы и электроэнергию
Fig. 5. Economic effect on the cost of welding consumables and electricity

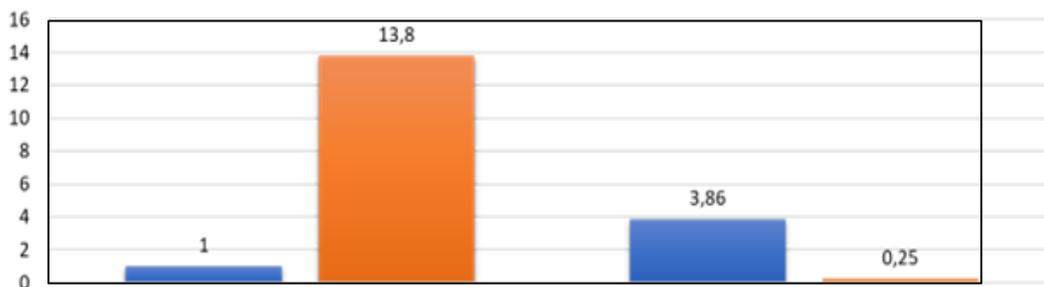


Рис. 6. Сопоставление параметров режимов сварки: скорости сварки и полного времени сварки
Fig. 6. Comparison of parameters of welding modes: welding speed and total welding time

6. ГОСТ 14771 – 76. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры (с Изменениями № 1, 2, 3). Москва: Стандартинформ, 2007. 38 с.
7. ГОСТ 6996 – 66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств (с Изменениями № 1, 2, 3, 4). Москва: Стандартинформ, 2005. 44 с.
8. ГОСТ 1497 – 84. Металлы. Методы испытаний на растяжение (с Изменениями № 1, 2, 3). Москва: Стандартинформ, 2008. 22 с.
9. ГОСТ 9012 – 59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю (с Изменениями № 1, 2, 3, 4, 5). Москва: Стандартинформ, 2007. с 39.

Т а б л и ц а 3

Результаты испытаний на растяжение

Table 3. Tensile Test Results

Образец	Диаметр/размер образца, мм	Временное сопротивление, Н/мм ² (кгс/мм ²)	Среднее значение, Н/мм ² (кгс/мм ²)	Место разрушения
181-1	12,0×20	791,8 (80,8)	791,8 (80,8)	Основной металл
188-2	12,0×20	791,8 (80,8)		Основной металл
Значение по ГОСТ 8731 – 74, не менее			686 (70)	–

Т а б л и ц а 4

Результаты испытаний на ударный изгиб

Table 4. Impact Test Results

Образец	Тип образца по ГОСТ 6996 – 66	Температура испытания, °С	Расположение надреза	Ударная вязкость KCU, Дж/см ²	Среднее значение для трех образцов, Дж/см ²
188-3	VI	–60	центр шва	71	65
188-4	VI	–60	центр шва	54	
188-5	VI	–60	центр шва	69	

Результаты испытаний на твердость по бринеллю (ГОСТ 9012 – 59)

Table 5. Brinell hardness test results (GOST 9012 – 59)

Зона испытаний	диаметр шарика, мм	нагрузка, кгс	выдержка, с	Диаметр отпечатка, мм		Твердость, НВ
				d_1	d_2	
Центр шва	10	3000	10	3,50	3,50	302
ЗТВ	10	3000	10	3,50	3,70	302 – 269
Основной металл	10	3000	10	3,90	3,95	241 – 235

REFERENCES

1. Ababkov N.V., Petrova E.E., Pimonov M.V. *Technologies and equipment of arc welding and cutting*. Kemerovo: KuzGTU, 2017, 185 p. (In Russ.).
Smirnov A.N., Murav'ev V.V., Ababkov N.V. *Destruction and diagnostics of metals*. Moscow – Kemerovo: Innovatsionnoe mashinostroenie. 2016, 479 p. (In Russ.).
2. Nikitenko M.S., Knyaz'kov K.V., Ababkov N.V., etc. Development of a complex of means of technical diagnostics, restoration and hardening of elements of mining equipment. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*. 2013, no. S6, pp. 447–456. (In Russ.).
3. *Ministry of Labor and Social Protection of the Russian Federation*. URL: <https://mintrud.gov.ru/docs/mintrud/orders/143/> (date of reference: 13.12.2022). (In Russ.).
4. *GOST 5264–80. Manual arc welding. The joints are welded. The main types, structural elements and dimensions (with Change No. 1)*. Moscow: Standart-inform, 2010. 34 s. (In Russ.).
5. *GOST 14771–76. Arc welding in protective gas. The joints are welded. Main types, structural elements and dimensions (with Changes No. 1, 2, 3)*. Moscow: Standartinform, 2007, 38 p. (In Russ.).
6. *GOST 6996–66. Welded joints. Methods for determining mechanical properties (with Changes № 1, 2, 3, 4)*. Moscow: Standartinform, 2005, 44 p. (In Russ.).
7. *GOST 1497 – 84. Metals. Tensile testing methods (with Amendments No. 1, 2, 3)*. Moscow: Standartinform, 2008, 22 p. (In Russ.).
8. *GOST 9012 – 59. Metals. Brinell hardness measurement method (with Changes № 1, 2, 3, 4, 5)*. Moscow: Standartinform, 2007, 39 p. (In Russ.).

Сведения об авторах

Егор Владимирович Варнавский, инженер-технолог сварочного производства, ООО «Кузбасский центр сварки и контроля»
E-mail: vev142@mail.ru

Information about the authors

Egor V. Varnavskiy, welding production process engineer, LLC «Kuzbass Welding and Control Center»
E-mail: vev142@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 08.11.2022

После доработки 11.11.2022

Принята к публикации 14.11.2022

Received 08.11.2022

Revised 11.11.2022

Accepted 14.11.2022

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

Оригинальная статья

УДК 334.021

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-112-123

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СТИМУЛИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЕМОЙ ПОДСИСТЕМЫ БЛАГОТВОРИТЕЛЬНОГО ФОНДА

© 2022 г. Т. И. Ефремкова, Е. С. Блохина, Т. В. Петрова, А. В. Хренова

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. В настоящее время восприятие благотворительности и благотворительных фондов происходит через призму пожертвований в форме милостыни. Считается, что ресурсный потенциал благотворительного фонда может формироваться только при наличии пожертвований, осуществляемых множеством людей. В действительности финансовая стабильность благотворительного фонда не может быть обеспечена только разовыми пожертвованиями сострадательных граждан. Поэтому разработка модели стимулирования управляемой подсистемы благотворительного фонда, применение которой обеспечит прирост ресурсного потенциала фонда, является актуальным направлением исследования. В настоящей работе дано определение понятия «ресурсный потенциал благотворительного фонда», представлена его структура. Выявлены основные условия аккумуляции финансовых средств благотворительного фонда с позиции рыночных отношений с донорами. Разработана математическая модель формирования ресурсного потенциала благотворительного фонда, основанная на выборе веерной системы аккумуляции финансовых потоков.

Ключевые слова: математическая модель, ресурсный потенциал, устойчивое развитие, управление благотворительным фондом

Для цитирования: Ефремкова Т.И., Блохина Е.С., Петрова Т.В., Хренова А.В. Разработка модели стимулирования управляемой подсистемы благотворительного фонда // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 112 – 122. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-112-123](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-112-123)

Original article

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR STIMULATING THE MANAGED SUBSYSTEM OF A CHARITABLE FOUNDATION

© 2022 T. I. Efremkova, E. S. Blohina, T. V. Petrova, A. V. Khrenova

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. Currently the perception of charity and charitable foundations is through the prism of donations in the form of alms. It is believed that the resource potential of a charitable foundation can be formed only if there are donations made by many people. In fact, the financial stability of a charitable foundation cannot be ensured only by one-time donations from compassionate citizens. Therefore, the development of a model for stimulating the managed subsystem of the BF, the application of which will ensure an increase in the resource potential of the fund, is an urgent area of research. The article defines the concept of "resource potential of a charitable foundation", presents its structure. The main conditions for the accumulation of financial resources of a charitable foundation are identified from the standpoint of market relations with

donors. A mathematical model has been developed for the formation of the resource potential of a charitable foundation, based on the choice of a rolling system for accumulating financial flows.

Keywords: mathematical model, resource potential, sustainable development, charity fund management

For citation: Efremkova T.I., Blohina E.S., Petrova T.V., Khrenova A.V. Development of a model for stimulating the managed subsystem of a charitable foundation. Bulletin of the Siberian State Industrial University. 2022, no. 4 (42), pp. 112 – 122. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-112-123](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-112-123)

Введение

Развитие некоммерческого сектора в России является одним из актуальных направлений экономики страны, поэтому невозможно переоценить роль благотворительных фондов (БФ) в создании и перераспределении общественных благ. От того, насколько развита сеть благотворительных фондов в каждом регионе, напрямую зависит уровень удовлетворенности жителей качеством жизни.

В настоящее время исследованиями различных аспектов управления благотворительными фондами занимаются ученые и в России, и за рубежом.

Исследователи Стэнфордского университета отмечают большой разрыв между инновационным качественным подходом руководителей благотворительного фонда к реализации непосредственных благотворительных программ и проектов и низким уровнем финансового управления БФ. Так, W.L. Foster, P. Kim, B. Christiansen [1] провели анализ используемой долгосрочной финансовой стратегии в современных благотворительных фондах и доказали факт отсутствия универсальной финансовой модели в некоммерческом секторе, использование которой могло бы обеспечить устойчивое развитие БФ. Эту проблему авторы связывают с особенностями управления НКО: управление НКО более сложное, чем коммерческой организацией, поскольку в бизнесе создание ценного, с точки зрения конечного потребителя, продукта всегда приводит к его реализации и получению прибыли, а в благотворительном фонде создание и реализация ценного (для реципиента) продукта или услуги никак не связано с получением дохода БФ.

Современные исследования зарубежных научных коллективов в области корпоративной благотворительности позволили доказать факт экономической заинтересованности доноров (юридических лиц) в сотрудничестве с БФ. Доказано, что покупательская активность на товары, участвующие в благотворительных акциях, гораздо выше, чем на аналогичные товары. Именно поэтому реклама через благотворительность является эффективным рабочим инструментом повышения уровня продаж донора

(юридического лица) и, как следствие, приводит к увеличению выручки [2].

Зарубежные ученые (E. Craig, M. Noetel, P. Slattery и др.) провели ряд эмпирических исследований, направленных на изучение задачи увеличения суммы разового пожертвования донорами (физическими лицами), и выявили зависимости между суммой разового пожертвования и физическими особенностями сотрудника благотворительного фонда, отвечающего за ведение переговоров [3]. Авторы предлагают с целью увеличения сумм пожертвований привлекать физически привлекательных женщин-сотрудников БФ.

В Китае проблему отсутствия регулярного финансирования благотворительных фондов решили, введя на уровне правительства директивную систему обязательных для всех юридических лиц отчислений (в виде процента от прибыли) в БФ [4].

По данным научной электронной библиотеки Elibrary интерес российских исследователей к сфере благотворительности в последние пять лет находится на низком уровне по отношению к иным отраслям научного знания (менее 8 % публикаций), что не соотносится с усилением внимания правительства России к развитию благотворительного сектора экономики, отраженном в Концепции содействия развитию благотворительной деятельности в Российской Федерации на период до 2025 года.

У подавляющего большинства отечественных фондов основой привлечения финансовых ресурсов выступают регулярные пожертвования, которые незначительно дополняет фандрайзинг, в то время как устойчивое получение доходов от финансовых инвестиций практикует лишь незначительное количество фондов. В работе [5] предлагается четырехэтапная модель формирования финансовых ресурсов благотворительного фонда. На первом этапе необходим анализ текущей обстановки/среды, на втором – проведение всестороннего анализа доступных источников формирования финансовых ресурсов, на третьем – формирование собственного портфеля источников финансирования на основе пошаговой схемы анализа использования привлекаемых/полученных источников финансирования,

на четвертом – разработка плана внедрения сформированного портфеля.

В работе А.В. Петровой [6] исследуются вопросы влияния мотивов, побуждающих корпоративных доноров участвовать в благотворительности, на интенсивность участия. Установлено, что корпоративная благотворительность отражает позиции руководства компании, а не коллектива, в результате чего зачастую происходит конфликт интересов. Для достижения баланса интересов всех участников благотворительной деятельности предлагается процесс поиска доноров и достижения договоренностей о сотрудничестве между БФ и донорами строить на основе диагностики ролевой мотивации его участников.

Решением задачи стимулирования потенциальных доноров (юридических лиц) в рамках совершенствования налоговых механизмов занималась группа исследователей Байкальского государственного университета [7]. Научный коллектив разработал методику оценки результативности введения налоговой льготы, которая в отличие от имеющихся (модель максимизации прибыли Р. Швартца и модель управленческого дискреционного поведения О. Уильямсона) учитывает изменение реакции налогоплательщиков, осуществляющих благотворительные расходы, на введение льготного налогообложения. В результате исследования доказан тезис о том, что благотворительность является ресурсом, который можно продавать наравне с другими товарами, следовательно, категория «стоимость товара» применима к благотворительной деятельности. Льготное налогообложение является способом снижения стоимости данного ресурса для «продавца». В связи с этим налоговая льгота выступает инструментом, способным увеличить объем благотворительных расходов через уси-

ление мотивации к совершению большего объема расходов за счет компенсации через предоставление льготы.

Создание благотворительного фонда зачастую вовсе не гарантирует его успешного развития. Данный феномен особенно характерен для небольших городов и регионов; это связано с особенностями управления подобными некоммерческими организациями (НКО) в части накопления ресурсного потенциала.

Объем имеющегося ресурса и степень интенсивности его накопления характеризуют организационную систему БФ с позиции стабильности и перспективности развития. Поскольку эффективность функционирования благотворительного фонда напрямую зависит от ресурсного потенциала, его формирование является стратегической задачей управляющей подсистемы, которая может быть частично решена через разработку оптимальной системы стимулирования сотрудников БФ [10].

Анализ экономической литературы показывает наличие множества различных трактовок понятия «ресурсный потенциал» [8 – 11]. Однако отдельно взятое определение ресурсного потенциала невозможно полноценно использовать по отношению к благотворительному фонду, учитывая специфику его функционирования. На основе проведенного анализа предлагается рассматривать ресурсный потенциал благотворительного фонда как способность НКО к стабильному функционированию на рынке и поэтапному развитию. В качестве элементов ресурсного потенциала благотворительного фонда предлагается выделить три группы ресурсов: материальные активы, нематериальные активы, финансовые ресурсы (рис. 1).

Ресурсный потенциал благотворительного фонда состоит из различных характеристик,



Рис. 1. Структура ресурсного потенциала благотворительного фонда
Fig. 1. The structure of the resource potential of the charitable foundation



Рис. 2. Веерная структура системы аккумуляции финансового ресурса БФ
 Fig. 2. The fan structure of the financial resource accumulation system of the BF

присущих данной организационной системе [12, 13]. Под *материальными активами* понимаются основные средства (здания и сооружения, находящиеся в собственности или в оперативном управлении), материальные ресурсы, выраженные совокупно средствами и предметами труда. *Трудовые ресурсы* фонда (штатные сотрудники и волонтеры) используются в процессе осуществления благотворительной деятельности [11]. Важно понимать, что формирование базы материальных ресурсов в БФ происходит двумя способами:

- приобретение материального ресурса управляющей подсистемой БФ за счет собственных средств;

- поступление на баланс фонда материального ресурса путем прямой передачи его донором в качестве пожертвования.

Нематериальные активы благотворительного фонда представлены различными группами ресурсов.

1 – Информационные ресурсы состоят из онлайн и офлайн площадок, на которых управляемая подсистема фонда реализует благотворительные проекты (сайт фонда, страницы в социальных сетях, баннеры в торговых центрах и прочее).

2 – Инновационные ресурсы представляют собой организованную совокупность взаимосвязанных условий и ресурсов (материальных, финансовых, кадровых, информационных, интеллектуальных и иных), обеспечивающих, с одной стороны, сохранение и увеличение производственных ресурсов и, с другой стороны, возможность разработки и использования в практической работе фонда новых методов и инструментов взаимодействия с донорами и реципиентами [3].

3 – Базы данных необходимы управляющей подсистеме БФ для анализа характеристик до-

норов-источников финансовых поступлений с целью планирования и прогнозирования.

4 – Деловая репутация является самостоятельным ресурсом, создание и поддержание которого во многом определяет успешность сотрудничества с донорами и реципиентами.

5 – Ноу-хау понимается в качестве рациональных решений по аккумуляции финансовых средств БФ в части привлечения новых доноров и увеличения суммы разового пожертвования и обеспечению обязательств БФ перед донорами в части увеличения объема продаж их товаров и услуг.

Финансовые ресурсы БФ формируются за счет пожертвований доноров, предпринимательской деятельности фонда и инвестирования. Донорами БФ могут являться как физические, так и юридические лица.

В настоящей работе акцентируется внимание на взаимодействии управляющей подсистемы БФ с донорами – юридическими лицами, называемыми агентами, причем донор должен находиться в рыночных отношениях с БФ. В работе управляющей подсистемы БФ по аккумуляции финансового ресурса важно применять принцип системности поиска и привлечения доноров, что обеспечит стабильные поступления пожертвований в БФ как залог его поступательного развития [12, 13].

Система аккумуляции финансового ресурса БФ имеет веерную структуру и является многоэлементной [14], поскольку при функционировании фонда наблюдается ситуация одновременного наличия нескольких агентов, подчиненных одному центру (рис. 2). Указанная система включает в себя центр, представленный управляющей подсистемой БФ, находящейся на верхнем уровне иерархии, и агентов (доноров –

**Прогноз численности потенциальных агентов, привлекаемых
к благотворительной деятельности в течение года**

Table 1. Forecast of the number of potential agents involved in charitable activities during the year

Среднее количество юридических лиц, обслуженных за день работы сотрудником БФ, чел.	Количество потенциальных агентов, привлекаемых к благотворительной деятельности в течение года, при числе рабочих дней, затраченных сотрудником БФ за год на привлечение юридических лиц, чел.				
	200	210	220	235	247
0,25	50	52	55	58	61
0,50	100	105	110	117	123
1,00	200	210	220	235	247
1,50	300	315	330	352	370
2,00	400	420	440	470	494

юридических лиц), находящихся на нижнем уровне.

Основной задачей сотрудника БФ, отвечающего за осуществление взаимодействий с агентами, является обеспечение стабильного объема пожертвований со стороны юридических лиц в течение всего календарного года. Решение этой задачи возможно за счет организации интенсивных контактов с потенциальными агентами. Количество реальных агентов-доноров, сделавших пожертвования в течение года, будет зависеть от количества потенциальных агентов, с которыми сотрудник БФ осуществил взаимодействие в течение года, а также от величины конверсии.

В свою очередь, количество потенциальных агентов, с которыми была проведена предварительная работа по разъяснению мотивационных методов, будет определяться как интенсивностью временных затрат сотрудника БФ в течение каждых рабочих суток, так и степенью использования сотрудником календарного фонда времени работы.

В табл. 1 представлен прогноз количества потенциальных агентов, привлекаемых к благотворительной деятельности в течение года, в зависимости от степени экстенсивной и интенсивной загрузки сотрудника БФ. Прогноз составлен на основе практического опыта работы в данной сфере.

Сотрудник БФ, осуществляющий контакты с юридическими лицами, в течение года в зависимости от поставленных перед ним задач может провести предварительную работу по разъяснению мотивационных методов, способных обеспечить взаимовыгодное сотрудничество донора с фондом, с 50 – 500 потенциальными агентами. Если учесть, что величина конверсии в данной сфере составляет около 0,2 (чел./чел.), то реальное количество юридических лиц, которое может быть вовлечено в благотворительную

деятельность фонда, в течение года варьируется в зависимости от интенсивности работы сотрудника БФ в диапазоне от 10 до 100 чел.

В целях повышения степени заинтересованности сотрудника БФ в увеличении интенсивности работы по привлечению агентов целесообразно формировать его заработную плату как сумму двух частей: фиксированной части, размер которой определяется на уровне МРОТ в регионе, и суммы процентов от размера пожертвований, сделанных в адрес БФ агентами. Для построения математической модели решения обозначенной задачи необходимо ввести переменные модели и формализовать связанные с ними зависимости.

В качестве переменной модели x обозначим размер переменной части заработной платы сотрудника БФ, ответственного за привлечение юридических лиц к благотворительной деятельности, выраженный в процентах от суммы денежных поступлений от агента. Величина переменной части заработной платы сотрудника БФ будет формировать два разнонаправленных, с точки зрения БФ, денежных потока:

- с одной стороны, по мере роста переменной части заработной платы сотрудника БФ в зависимости от количества привлекаемых к благотворительной деятельности юридических лиц будет увеличиваться общая сумма пожертвований, поступающих в распоряжение фонда;

- с другой стороны, будет возрастать и сумма денежных средств, выплачиваемых сотруднику БФ в качестве вознаграждения за интенсивность работы.

Таким образом, может быть поставлена оптимизационная задача, заключающаяся в определении размера переменной части заработной платы сотрудника фонда, обеспечивающего максимальную величину пожертвований от агентов, остающуюся в распоряжении фонда за

Планируемая зависимость переменной части ЗП сотрудника БФ от количества фактически привлеченных агентов

Table 2. The planned dependence of the variable part of the PO of the BF employee on the number of agents actually involved

Среднее количество агентов, привлеченных сотрудником БФ за год, чел.		Среднемесячное количество агентов, осуществляющих пожертвования в БФ, чел.	Сумма финансовых средств, передаваемых агентами в БФ за месяц, руб.		Процент переменной части ЗП сотрудника БФ, %	Ежемесячный размер переменной части ЗП сотрудника БФ, руб.	
нижняя граница	верхняя граница		нижняя граница	верхняя граница		нижняя граница	верхняя граница
10	12	6,0	270 833	325 000	0,20	542	650
12	15	7,3	325 000	406 250	0,50	1 625	2 031
15	20	9,5	406 250	541 667	0,70	2 844	3 792
20	25	12,2	541 667	677 083	0,90	4 875	6 094
25	30	14,9	677 083	812 500	1,04	7 042	8 450
30	35	17,6	812 500	947 917	1,08	8 775	10 238
35	40	20,3	947 917	1 083 333	1,20	11 375	13 000
40	45	23,0	1 083 333	1 218 750	1,20	13 000	14 625
45	50	25,7	1 218 750	1 354 167	1,24	15 113	16 792
50	55	28,4	1 354 167	1 489 583	1,36	18 417	20 258
55	60	31,1	1 489 583	1 625 000	1,40	20 854	22 750
60	65	33,9	1 625 000	1 760 417	1,56	25 350	27 463
65	70	36,6	1 760 417	1 895 833	1,60	28 167	30 333
70	75	39,3	1 895 833	2 031 250	1,60	30 333	32 500
75	80	42,0	2 031 250	2 166 667	1,64	33 313	35 533
80	85	44,7	2 166 667	2 302 083	1,70	36 833	39 135
85	90	47,4	2 302 083	2 437 500	1,80	41 438	43 875
90	95	50,1	2 437 500	2 572 917	1,90	46 313	48 885

вычетом расходов на оплату труда и отчислений на социальные нужды.

Однако для постановки задачи в таком случае необходимо определиться с видом зависимости между уровнем привлечения реальных агентов и процентом переменной части заработной платы сотрудника БФ. Характер такой зависимости должен подбираться для конкретных условий ведения деятельности и соответствовать мотивам сотрудников фонда. Так, например, в табл. 2 приведен пример планируемой зависимости переменной части заработной платы (ЗП) сотрудника БФ от количества привлеченных им агентов в течение года при средней плановой сумме ежемесячного пожертвования в размере 50 тыс. руб. Среднемесячное количество агентов, осуществляющих пожертвования в БФ, определялось исходя из

постоянной средней за год интенсивности привлечения агентов.

Отметим, что с точки зрения сотрудника фонда количество агентов, привлеченных к благотворительной деятельности за год, будет выступать в качестве аргумента, в то время как процент переменной части ЗП сотрудника, определяемый в зависимости от количества привлеченных агентов, – в качестве функции.

С точки зрения БФ, напротив, величина процента переменной части заработной платы сотрудника от общей суммы пожертвований юридических лиц выступает в качестве аргумента (переменной модели – x), а количество привлеченных за год агентов – в качестве одного из результирующих показателей (y , чел.).

С использованием методов регрессионного анализа по данным табл. 2 можно получить

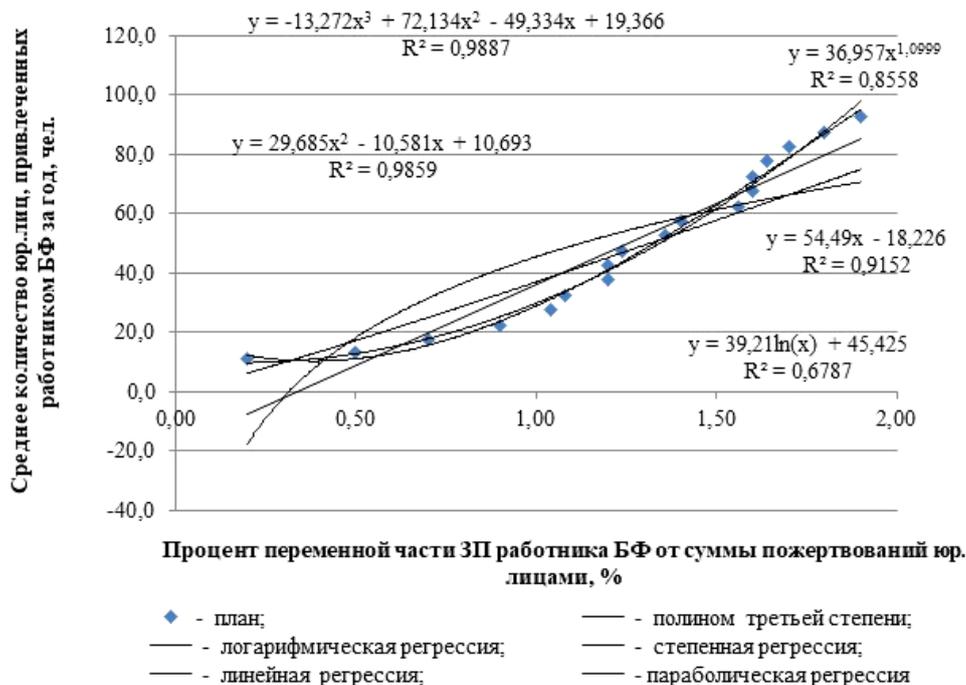


Рис. 3. Плановая зависимость переменной части ЗП сотрудника БФ от количества фактически привлеченных агентов в течение года

Fig. 3. Planned dependence of the variable part of the PO of the BF employee on the number of agents actually involved during the year

плановую зависимость количества привлекаемых к осуществлению целевых действий агентов одним работником БФ за год. Виды зависимостей представлены на рис. 3.

Наилучшим образом для аппроксимации рассматриваемой зависимости подходят полиномиальные регрессии второй и третьей степени: степень их адекватности составляет соответственно 98,6 и 98,9 %. Учитывая незначительное различие между адекватностью моделей в качестве оптимальной из них следует выбрать параболическую регрессию, характеризующуюся меньшей трудоемкостью расчетов и более ясной интерпретацией параметров.

Таким образом, для целей моделирования примем следующую зависимость среднего количества привлеченных одним сотрудником БФ агентов в течение года от процента переменной части его ЗП при средней сумме одного пожертвования на уровне 50 тыс. руб.:

$$y(x) = 29,685x^2 - 10,581x + 10,693; R^2 = 0,9859. (1)$$

Кроме переменных решаемой задачи необходимо сформулировать такие элементы модели, как параметры, уравнения связи и критерий эффективности.

К параметрам модели относятся (табл. 3):

1 – фиксированная часть заработной платы сотрудника БФ (A , руб./мес.), принятая на

уровне минимального размера оплаты труда в регионе;

2 – коэффициенты регрессии и свободный член параболической зависимости количества агентов, привлекаемых одним сотрудником БФ за год, от процента переменной части его заработной платы, определяемые формулой (1);

3 – верхняя и нижняя границы изменения процента переменной части заработной платы сотрудника БФ от суммы пожертвований юридического лица (p_1 и p_2 , %), принятые на основании плановой зависимости, представленной в табл. 1;

4 – верхняя граница ежемесячной суммы переменной части заработной платы сотрудника БФ (B , руб.), принятая исходя из уровня заработной платы сотрудников БФ;

5 – нижняя и верхняя границы изменения количества привлеченных одним сотрудником БФ агентов за год (y_1 и y_2 , чел.), принятые на основе анализа интенсивности работы сотрудников БФ (табл. 1) и величины конверсии; средняя сумма ежемесячного пожертвования агента (S , руб.); доли пожертвований, направляемых на текущие расходы (α) и, в том числе, на заработную плату сотрудников фонда с отчислениями на социальные нужды (γ).

Для записи системы уравнений, в которой определяется оптимальное решение поставленной задачи, введем вспомогательные переменные (табл. 4): среднее количество агентов, осуществляющих пожертвования в БФ; средние суммы пожертвований

Параметры модели
Table 3. Model parameters

Показатель	Условное обозначение	Значение
Фиксированная часть заработной платы сотрудника БФ, руб./мес.	A	18057
Параметры параболической зависимости количества агентов, привлекаемых одним сотрудником БФ за год, от процента переменной части его заработной платы		
a_0 , чел.	a_0	10,693
a_1 , чел./%	a_1	-10,581
a_2 , чел./% ²	a_2	29,685
Границы изменения переменной части заработной платы сотрудника БФ от суммы пожертвований юридического лица, %:		
нижняя граница	p_1	0
верхняя граница	p_2	2,0
Верхняя граница ежемесячной суммы переменной части заработной платы сотрудника БФ, руб.	B	40000
Границы изменения количества привлеченных одним сотрудником БФ агентов за год, чел.:		
нижняя граница	y_1	0
верхняя граница	y_2	100
Средняя сумма ежемесячного пожертвования агента, руб.	S	50000
Доля пожертвований, направляемых на хозяйственные нужды, доли ед.	α	Не более 0,20
Доля пожертвований, направляемых на оплату труда и отчисления на социальные нужды, доли ед.	γ	Не более 0,05
Доля пожертвований, направляемых на благотворительные цели и инвестирование, доли ед.	$\beta = 1 - \alpha$	Не менее 0,80

от агентов за месяц и год; переменная часть заработной платы сотрудника БФ, осуществляющего привлечение агентов; годовые расходы фонда на заработную плату сотрудника, осуществляющего привлечение агентов, с отчислениями на социальные нужды. Все перечисленные показатели зависят от количества привлеченных агентов и, следовательно, определяются как функции от процента переменной части заработной платы сотрудника БФ.

Используя введенные переменные и параметры модели, формализуем ограничения и условия решения задачи обоснования оптимальной величины материального стимулирования сотрудника БФ (табл. 5).

Критерием эффективности решаемой задачи будет выступать максимум суммы ежегодных пожертвований от юридических лиц ($S_r(x)$) за вычетом расходов на заработную плату сотрудника, осуществляющего привлечение агентов, с отчислениями на социальные нужды ($R(x)$):

$$F(x) = S_r(x) - R(x) \longrightarrow \max. \quad (2)$$

Таким образом, математическая модель оптимизации суммы ежегодных пожертвований, поступающих в БФ от агентов в зависимости от степени

материального стимулирования сотрудников БФ, осуществляющих привлечение агентов этого типа, в общем случае примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2; \\ p_1 \leq x \leq p_2; \\ y_1 \leq y(x) \leq y_2; \\ y(x) = \text{целое}; \\ y_m(x) = \frac{y(x) + 12}{12 \cdot 2}; \\ S_m(x) = S y_m(x); \\ S_r(x) = 12 S_m(x); \\ 3\Pi_{\text{перем}}(x) = \frac{x}{100} S_m(x); \\ 3\Pi_{\text{перем}}(x) \leq B; \\ 3\Pi_{\text{мес}} = A + 3\Pi_{\text{перем}}(x); \\ R(x) = 123\Pi_{\text{мес}} \cdot 1,302; \\ \frac{R(x)}{S_r(x)} \leq \gamma; \end{array} \right. \quad (3)$$

Вспомогательные переменные
Table 4. Auxiliary variables

Показатель	Условное обозначение
Среднемесячное количество агентов, осуществляющих пожертвования в БФ, чел.	$y_m(x)$
Средняя сумма пожертвований от агентов за месяц, руб.	$S_m(x)$
Средняя сумма пожертвований от агентов за год, руб.	$S_r(x)$
Переменная часть заработной платы сотрудника БФ, руб./мес.	$ЗП_{\text{перем}}(x)$
Годовые расходы БФ на заработную плату сотрудника и отчисления на социальные нужды, руб.	$R(x)$

$$F(x) = S_r(x) - R(x) \longrightarrow \max.$$

Используя частные значения параметров (табл. 3), перейдем к частному виду модели (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} y(x) = 10,693 - 10,581x + 29,685x^2; \\ 0 \leq x \leq 2,00; \\ 0 \leq y(x) \leq 100; \\ y(x) = \text{целое}; \\ y_m(x) = \frac{y(x)}{12} \frac{1+12}{2}; \\ S_m(x) = 50000 y_m(x); \\ S_r(x) = 12 S_m(x); \\ ЗП_{\text{перем}}(x) = \frac{x}{100} S_m(x); \\ ЗП_{\text{перем}}(x) \leq 40000; \\ ЗП_{\text{мес}} = 18057 + ЗП_{\text{перем}}(x); \\ R(x) = 123 ЗП_{\text{мес}} + 1,302; \\ \frac{R(x)}{S_r(x)} \leq 0,05; \end{array} \right. \quad (4)$$

$$F(x) = S_r(x) - R(x) \longrightarrow \max.$$

Решение модели (4) средствами MS Excel позволило получить результат, представленный в табл. 6.

Распределение оптимальной суммы пожертвований по направлениям их использования с учетом ограничений (табл. 3) представлено в табл. 7.

Максимальная эффективность в размере 26 392 917,43 рублей (табл. 6) достигается при привлечении сотрудником фонда 84 агентов за год. При этом сумма переменной части заработной платы сотрудника достигает 40000 руб. в месяц, а общая сумма заработной платы – 58 057 руб. в месяц. Доля расходов фонда на заработную плату с отчислениями в этом случае не превышает 3,32 % от годовой суммы пожертвований.

Анализ оптимального решения поставленной задачи показывает, что наибольшее влияние на оптимальное значение суммы привлекаемых пожертвований оказывают следующие факторы:

- характер эмпирической зависимости интенсивности труда сотрудника БФ по привлечению агентов от уровня его материального стимулирования;
- величина конверсии;
- средняя сумма ежемесячного пожертвования одним привлеченным агентом;
- верхняя граница переменной части заработной платы сотрудника БФ.

Выводы

Разработана математическая модель формирования ресурсного потенциала благотворительного фонда, которая позволяет стабилизировать и максимизировать потоки финансового ресурса в БФ и наиболее эффективно применять управляющие воздействия на управляемую подсистему фонда, что сказывается на оптимизации использования трудовых ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Foster W.L., Kim P., Christiansen B. Ten Nonprofit Funding Models // *Stanford Social Innovation Review*. 2009. Vol. 7 (2). P. 32–39. <https://doi.org/10.48558/E9AC-JA59>
- Ye S., Liu Y., Gu S., Chen H. Give Goods or Give Money? The Influence of Cause-Related Marketing Approach on Consumers' Purchase Intention // *Front. Psychol.* 2021. Article 533445. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.533445>
- Noetel M., Slattery P., Saeri A.K., Lee J., et al. How do we get people to donate more to charity? An overview of reviews // *Project: Ready Research*. 2020. <https://doi.org/10.31234/osf.io/xmva>
- Mechanisms of Charitable Donations in China / ed. J. Gao. Sponsored by the Chinese Fund for the Humanities and Social Sciences. Springer. 2022.

Формализация ограничений и зависимостей задачи
Table 5. Formalization of constraints and dependencies of the task

Уравнение/неравенство	Содержание
$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$	Определение количества агентов, ежегодно привлекаемых одним сотрудником БФ к сотрудничеству
$p_1 \leq x \leq p_2$	Ограничение по диапазону изменения процента переменной части заработной платы сотрудника БФ, осуществляющего привлечение агентов
$y_1 \leq y(x) \leq y_2$	Ограничение по диапазону изменения количества агентов, ежегодно привлекаемых одним сотрудником БФ к сотрудничеству
$y(x) = \text{целое}$	Условие целочисленности количества ежегодно привлекаемых агентов
$y_m(x) = \frac{y(x)}{12} \frac{1+12}{2}$	Определение среднемесячного количества агентов, осуществляющих пожертвования в БФ в течение года
$S_m(x) = Sy_m(x)$	Определение средней суммы пожертвований от юридических лиц за месяц
$S_r(x) = 12S_m(x)$	Определение средней суммы пожертвований от юридических лиц за год
$ЗП_{\text{перем}}(x) = \frac{x}{100} S_m(x)$	Определение переменной части заработной платы сотрудника, осуществляющего привлечение агентов, за месяц
$ЗП_{\text{перем}}(x) \leq B$	Ограничение по верхней границе ежемесячной суммы переменной части заработной платы сотрудника БФ, осуществляющего привлечение агентов
$ЗП_{\text{мес}} = A + ЗП_{\text{перем}}(x)$	Определение заработной платы сотрудника, осуществляющего привлечение агентов, за месяц
$R(x) = 12ЗП_{\text{мес}} - 1,302$	Определение суммы годовых расходов БФ на заработную плату сотрудника, осуществляющего привлечение агентов (с отчислениями на социальные нужды)
$\frac{R(x)}{S_r(x)} \leq \gamma$	Ограничение по верхней границе доли расходов на оплату труда с отчислениями от суммы ежегодных пожертвований юридических лиц

5. Брызгалова В.А. Мировой опыт функционирования благотворительных фондов и его использование в России: Дис. ... канд. экономич. наук. Москва, 2018. 227 с. Режим доступа: https://mgimo.ru/upload/2018/01/Bryzgalova_thesis.pdf
6. Петрова А.В. Благотворительность как социально-ролевое взаимодействие: теория и история процесса: Автореф. дис. ... канд. соц. наук. Екатеринбург, 2003. 23 с. Режим доступа: <https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/451/1/urgu0173s.pdf>
7. Головань С.А. Совершенствование налогового механизма стимулирования благотворительной деятельности: Дис.... канд. экономич. наук. Иркутск, 2017. 227 с. Режим доступа: <https://nsuet.ru/upload/iblock/38c/Диссертация%20Головань%20С.А..pdf>
8. Рыжук С.Г., Овачук Е.И. Ресурсный потенциал организации // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2012. № 11 (97). С. 115–119.
9. Романов А.П., Губанова М.Н. Экономический потенциал предприятия и его связи с ресурсным и производственным потенциалами // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2010. № 7-9 (30). С. 223–229.
10. Притворова А.А. Ресурсный потенциал предприятия: сущность, роль и оценка // Молодой ученый. 2020. № 5 (295). С. 121–123.
11. Дюйзен Е.Ю. К вопросу о сущности, составе и роли ресурсного потенциала организации // Российское предпринимательство. 2013. № 11 (233).
12. Блохина Е.С., Петрова Т.В. Продукт как результат функционирования благотворительного фонда. В кн.: Актуальные проблемы экономики и управления в XXI веке. Сб. науч. статей. Ч. 1. Новокузнецк: СибГИУ, 2019. С. 43–46.

Оптимальное решение задачи
Table 6. Optimal solution of the problem

Показатель	Значение
Процент переменной части заработной платы сотрудника БФ от общей суммы пожертвований юридических лиц, %	1,76
Количество агентов, привлеченных одним сотрудником БФ за год, чел.	84,00
Среднемесячное количество агентов, осуществляющих пожертвования в БФ, чел.	45,50
Средняя сумма пожертвований от агентов: за месяц, руб.	2 275 000,0
за год, руб.	27 300 000,0
Переменная часть заработной платы сотрудника БФ, руб./мес.	40 000,00
Сумма ЗП сотрудника БФ, руб./мес., всего	58 057,00
ФОТ с отчислениями на соц. нужды за год, руб.	907 082,57
Доля заработной платы и отчислений на соц. нужды от суммы пожертвований, %	3,32
Критерий эффективности (сумма пожертвований от агентов за вычетом расходов на ЗП и отчисления на соц. нужды), руб./год	26 392 917,43

Распределение суммы пожертвований
Table 7. Distribution of the donation amount

Показатель	Значение
Годовая сумма пожертвований в БФ от юр. лиц, руб.	27 300 000,0
Направления расходования пожертвований:	
- на хозяйственные нужды, руб.	5 460 000,0
в том числе: на оплату труда с отчислениями, руб.	907 082,6
- на благотворительность и инвестирование, руб.	21 840 000,0

13. Блохина Е.С., Петрова Т.В., Ефремкова Т.И. Оценка перспективы развития благотворительного фонда на основе анализа величин ежемесячных пожертвований доноров фонда // Электронный научно-образовательный журнал «Искусственные общества». 2021. Т. 16. № 2. <https://ras.jes.su/artsoc/issue.2021.2.16>
14. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. Москва: Физматлит, 2007. 583 с.

REFERENCES

- Foster W.L., Kim P., Christiansen B. Ten Nonprofit Funding Models. *Stanford Social Innovation Review*. 2009, vol. 7 (2), pp. 32–39. <https://doi.org/10.48558/E9AC-JA59>
- Ye S., Liu Y., Gu S., Chen H. Give Goods or Give Money? The Influence of Cause-Related Marketing Approach on Consumers' Purchase Intention. *Front. Psychol.* 2021, article 533445. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.533445>
- Noetel M., Slattey P., Saeri A.K., Lee J., et al. How do we get people to donate more to charity? An overview of reviews. *Project: Ready Research*. 2020. <https://doi.org/10.31234/osf.io/yxmva>
- Mechanisms of Charitable Donations in China*. Gao. J. ed. Sponsored by the Chinese Fund for the Humanities and Social Sciences. Springer, 2022.
- Bryzgalova V.A. *World experience in the functioning of charitable foundations and its use in Russia: Diss. ... candidate of economic Sciences*. Moscow, 2018. 227 p. Available at URL: https://mgimo.ru/upload/2018/01/Bryzgalova_thesis.pdf
- Petrova A.V. *Charity as a socio-role interaction: theory and history of the process: Abstract. diss. ... candidate of Social Sciences*. Yekaterinburg, 2003. 23 p. Available at URL: <https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/451/1/urgu0173s.pdf>
- Golovan S.A. *Improving the tax mechanism for stimulating charitable activities: Dis. ... Candidate of Economic Sciences*. Irkutsk, 2017. 227 p. Available at URL: <https://nsuem.ru/upload/>

iblock/38c/Диссертация%20Головань%20С.А..pdf

8. Ryzhuk S.G., Ovachuk E.I. Resource potential of the organization Resource potential of the organization. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2012, no. 11 (97), pp. 115–119. (In Russ.).
9. Romanov A.P., Gubanova M.N. The economic potential of the enterprise and its relationship with resource and production potentials // Issues of modern science and practice. V.I. Vernadsky University. 2010, no. 7-9 (30), pp. 223–229.
10. Pritvorova A.A. Resource potential of the enterprise: essence, role and evaluation. *Young scientist*. 2020, no. 5 (295), pp. 121–123.
11. Duizen E.Yu. To the question of the essence, composition and role of the resource potential of the organization. *Russian entrepreneurship*. 2013, no. 11 (233).
12. Blokhina E.S., Petrova T.V. A product as a result of the functioning of a charitable foundation. In: *Actual problems of economics and management in the XXI century. Sat. sci. Articles. Part 1*. Novokuznetsk: SibGIU, 2019, pp. 43–46. (In Russ.).
13. Blokhina E.S., Petrova T.V., Efremkova T.I. Assessment of the prospects for the development of the charitable foundation based on the analysis of the values of monthly donations from donors of the foundation. *Elektronnyi nauchno-obrazovatel'nyi zhurnal «Iskusstvennye obshchestva»*. 2021, vol. 16, no. 2. (In Russ.). <https://ras.jes.su/artsoc/issue.2021.2.16>
14. Novikov D.A. Theory of management of organizational systems. Moscow: Fizmatlit, 2007, 583 p. (In Russ.).

Сведения об авторах

Татьяна Ивановна Ефремкова, к.э.н., доцент кафедры менеджмента и отраслевой экономики, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: efremkova@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-4568-005X

Елена Сергеевна Блохина, ведущий специалист по финансовой аналитике, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: belselena2016@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4568-005X

Татьяна Викторовна Петрова, д.э.н., профессор, преподаватель кафедры менеджмента и отраслевой экономики, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: ptrvt@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5399-9060

Анна Викторовна Хренова, заведующий сектором международных программ и проектов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: nvkz-anna@yandex.ru.
ORCID: 0000-0002-5399-9060

Information about the authors

Tat'yana I. Efremkova, Cand. Sci. (Ec.), Assist Professor of Chair of Management and Industry Economics, Siberian State Industrial University

E-mail: efremkova@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-2718-0668

Elena S. Blohina, leading specialist in financial analytics, Siberian State Industrial University

E-mail: belselena2016@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4568-005X

Tat'yana V. Petrova, Dr. Sci. (Ec.), Professor, Lecturer of the Department of Management and Industry Economics, Siberian State Industrial University

E-mail: ptrvt@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5399-9060

Anna V. Khrenova, Head of the International Programs and Projects Sector, Siberian State Industrial University

E-mail: nvkz-anna@yandex.ru.
ORCID: 0000-0002-5399-9060

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 09.08.2022

После доработки 07.11.2022

Принята к публикации 08.11.2022

Received 09.08.2022

Revised 07.11.2022

Accepted 08.11.2022

Оригинальная статья

УДК 338.012

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-124-131

ЭЛЕМЕНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ПОВЕСТКИ

© 2022 г. И. А. Нагайцев

ООО «Распадская угольная компания» (Россия, 654027, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, пр. Курако, 33)

Аннотация. Изменение климата по вероятности наступления и ожидаемому размеру убытков является одним из самых значительных рисков, угрожающих миру, как в настоящее время, так и в последующие десятилетия [1]. Рассмотрены основополагающие соглашения мирового сообщества, которые направлены на борьбу с климатическими изменениями. Представлены инструменты и стандарты для учета выбросов парниковых газов и реализации климатических проектов (действия Европейского Союза и России), нацеленные на снижение антропогенного воздействия от производств.

Ключевые слова: климатические изменения, Парижское соглашение, климатическая повестка

Для цитирования: Нагайцев И.А. Элементы реализации климатической повестки // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 123 – 130. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-124-131](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-124-131)

Original article

ELEMENTS OF THE IMPLEMENTATION OF THE CLIMATE AGENDA

© 2022 I. A. Nagaytsev

Raspadskaya Coal Company (33 Kurako ave., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654027, Russian Federation)

Abstract. Climate change, in terms of the probability of occurrence and the expected amount of losses, is one of the most significant risks threatening the world, both at present and in the coming decades [1]. The article discusses the fundamental agreements of the world community aimed at combating climate change, instruments and standards for accounting for greenhouse gas emissions and the implementation of climate projects. Actions of the European Union and Russia aimed at reducing the anthropogenic impact of production on climate change.

Key words: climate change, Paris Agreement, climate agenda, GHG Protocol, ISO 14064, EU ETS.

For citation: Nagaytsev I.A., Petrova T.V. Elements of the implementation of the climate agenda. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4 (42), pp. 123 – 130. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-124-131](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-124-131)

Введение

Климатические изменения – долгосрочные температурные изменения погодных условий. Одной из причин изменения климата является большое скопление парниковых газов (ПГ) в

атмосфере Земли. С наступлением эпохи индустриализации в XVIII веке количество выбросов парниковых газов в атмосферу увеличивалось за счет использования в энергетических отраслях ископаемых видов топлива. Для борьбы с кли-

матическими изменениями мировым сообществом разработаны различные меры по снижению выбросов ПГ и переходу к углеродной нейтральности.

Основная часть

Первым значимым шагом на пути к решению проблемы климатических изменений стала Рамочная конвенция ООН об изменении климата, подписанная 197 государствами в 1992 г. Главная цель конвенции – недопущение опасного антропогенного воздействия на климат [1, 2]. Конвенция предусматривает следующие аспекты:

- необходимость учета выбросов ПГ;
- формирование, реализация и актуализация национальных программ по сокращению выбросов ПГ;
- периодическое предоставление принятых и предусмотренных мер по осуществлению конвенции;
- достижение целей по снижению выбросов ПГ с учетом различных социально-экономических условий стран.

Дополнительным документом к Рамочной конвенции стал Киотский протокол (1997 г.), обязывающий подписавшие его стороны сокращать выбросы парниковых газов. Этот документ содержал реальные рыночные механизмы, чтобы свести к минимуму неблагоприятные последствия изменения климата, воздействие на международную торговлю, социальные, экологические и экономические сферы жизнедеятельности человека [3].

На смену Киотскому протоколу, действие которого закончилось в 2020 г., в декабре 2015 г. на Парижской конференции по климату (COP21) было принято Парижское соглашение по борьбе с климатическими изменениями и активизации деятельности для обеспечения устойчивого низкоуглеродного развития [4]. В отличие от Киотского протокола в новом соглашении представлены следующие пункты:

- отсутствуют конкретные количественные обязательства по снижению или ограничению выбросов ПГ (политику в сфере снижения выбросов парниковых газов каждая страна определяет самостоятельно);
- обязательства по сокращению выбросов ПГ берут на себя все государства (ранее только развитые страны и страны с переходной экономикой).

Цель Парижского соглашения – удержать повышение глобальной температуры в XXI веке в пределах 2 °С и попытаться снизить этот показатель до 1,5 °С.

Для достижения цели созданы различные инструменты сокращения выбросов парниковых газов. Наиболее эффективными являются систе-

мы торговли квотами на выбросы и введение углеродных налогов.

С целью минимизации рисков, связанных с применением этих инструментов, компании проводят инвентаризацию выбросов парниковых газов от своих производств, а также разрабатывают мероприятия по снижению «углеродного следа» и перехода к углеродной нейтральности с учетом всех выбросов парниковых газов на протяжении всего жизненного цикла продукта.

Инвентаризация выбросов парниковых газов – процесс, который включает сбор данных о выбросах ПГ от деятельности компании, выбор коэффициентов выбросов и других параметров для качественной оценки. Выбросы парниковых газов делятся на три типа (рис. 1): прямые (Score 1), косвенные энергетические (Score 2) и прочие косвенные выбросы (Score 3).

Прямые выбросы парниковых газов возникают на технологических процессах при производстве продукции компании:

- выбросы стационарного сжигания ископаемого топлива (генерация электрической и тепловой энергии), транспортировки материалов, продукции (мобильное сжигание топлива);
- деятельность любых производственных объектов, сопровождающаяся значительной эмиссией парниковых газов.

Также учитывают косвенные энергетические выбросы ПГ (Score 2), возникающие при производстве тепло- и электроэнергии, приобретенной от сторонних организаций. Компании должны включать в свою отчетность данные о выбросах при генерации этих видов энергии. Например, для производства продукции предприятием у энергосетевой компании приобретен некоторый объем электроэнергии. Электроэнергия, поставляемая энергосетевой компанией, генерируется ТЭС и ГЭС. Электроэнергия, произведенная на ГЭС, является углеродно нейтральной, в отчет компании по косвенным выбросам парниковых газов пойдут только выбросы от ТЭС, которые возникли при производстве объема купленной электроэнергии.

Помимо вышеописанных типов выбросов учитываются прочие косвенные выбросы (Score 3), возникающие вне зоны контроля компании. Прочие косвенные выбросы делятся на upstream («восходящие», «вверх по цепочке») и downstream («нисходящие», «вниз по цепочке»). Это выбросы, полученные при производстве закупаемого и реализуемого сырья и оборудования, их транспортировке, а также иные выбросы, которые относятся к активности, не связанной и не контролируемой компанией. Примером таких выбросов являются выбросы ПГ, генерирующиеся при транспортировке проданной продукции

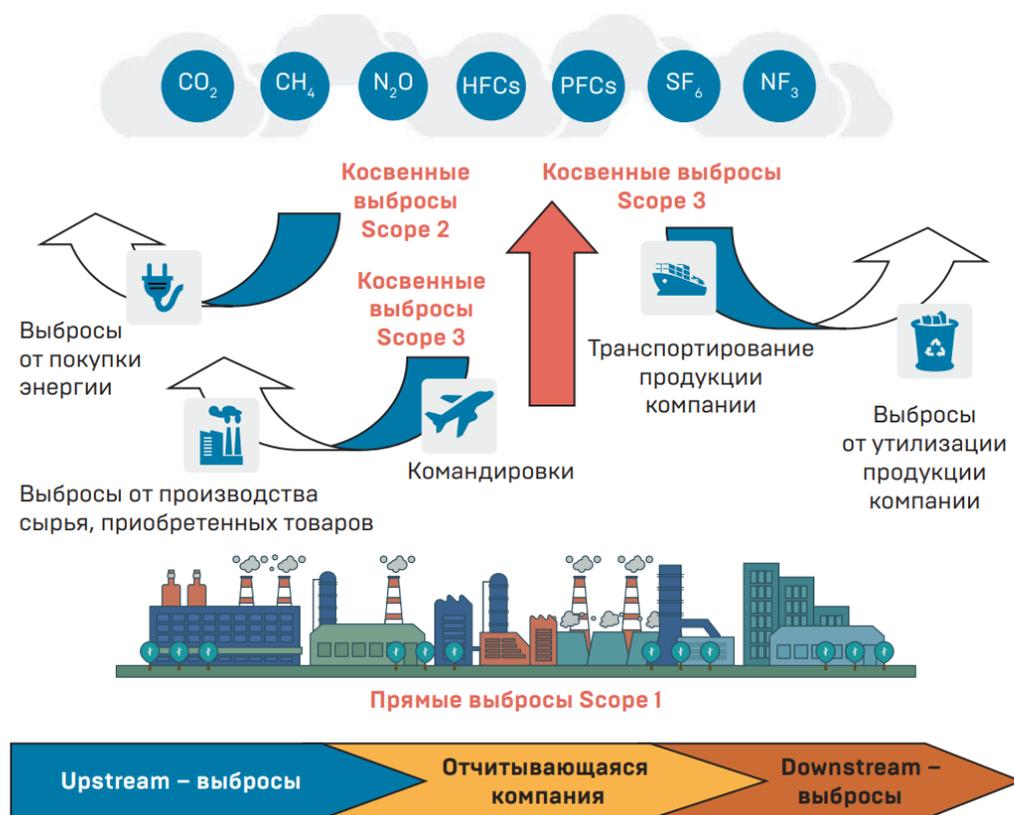


Рис. 1. Области охвата выбросов парниковых газов [5]
Fig. 1. Greenhouse gas emission scope [5]

автомобильным транспортом от склада поставщика до покупателя. Рассматриваемые выбросы будут учитывать в Score 3 продавец и покупатель, а транспортная компания учтет в Score 1. Необходимо помнить о двойном учете выбросов ПГ у разных компаний, участвующих в цепочке производства продукта.

В своей деятельности все больше социально-ответственных крупных компаний объявляют о заинтересованности в реализации климатической повестки (в снижении углеродного следа и переходе к углеродной нейтральности). Сложность реализации климатической повестки заключается в различных требованиях заинтересованных сторон по предоставлению информации по выбросам парниковых газов, мероприятиям по их снижению и климатических проектов.

На сегодняшний день существуют различные стандарты учета выбросов парниковых газов на уровне организаций и критерии климатических проектов, но основополагающими являются GHG протокол и стандарты серии ISO 14064.

Greenhouse Gas (GHG) Protocol разработан World Resource Institute (Институт мировых ресурсов) (WRI) и World Business Council for Sustainable Development (Всемирный деловой совет по устойчивому развитию) (WBCSD) [6]. Протокол парниковых газов отражает наиболее широко используемые в мире стандарты учета вы-

бросов парниковых газов компаний. Инструменты протокола GHG позволяют компаниям и городам проводить инвентаризацию своих выбросов ПГ, а также помогают им отслеживать прогресс в достижении своих целей в области климатической повестки.

Стандарт ISO 14064 – международный стандарт корпоративной отчетности по выбросам парниковых газов [7], впервые опубликованный в 2006 г. В России на данный момент введен ГОСТ Р ИСО 14064 – 2021 [8] (идентичен стандарту ISO 14064 «Газы парниковые»), который состоит из трех частей:

- требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и удалении парниковых газов на уровне организации;
- требования и руководство по количественной оценке, мониторингу и составлению отчетной документации для проектов сокращения выбросов парниковых газов или их удаления на уровне проекта;
- требования и руководство по валидации и верификации утверждений, касающихся парниковых газов.

Все три части стандарта связаны между собой. Первая часть устанавливает требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и поглощении парниковых газов на уровне организации. Вторая часть рас-

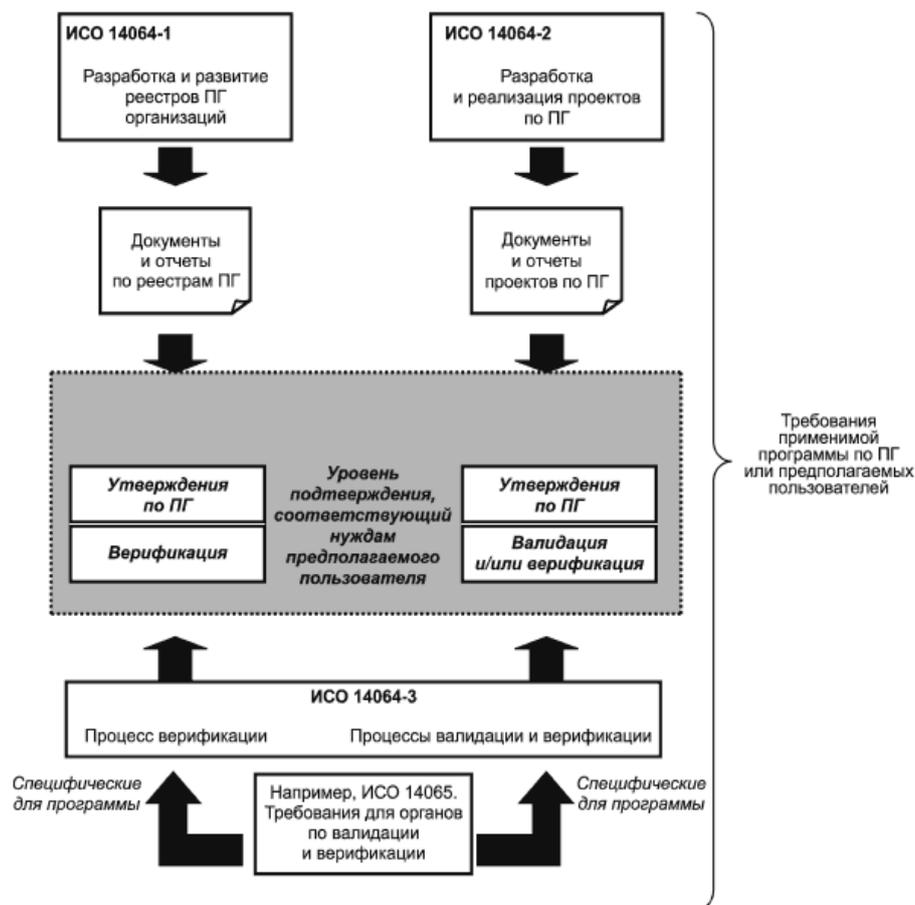


Рис. 2. Связь между частями комплекса стандартов ИСО 14064
 Fig. 2. Relationship between parts of the ISO 14064 set of standards

пространяется на проекты по снижению выбросов ПГ. В ней установлены требования к исходным данным и мониторингу выбросов, правила определения количественных данных снижения выбросов, которые представляют собой основу для верификации проектов. Третья часть распространяется на требования к верификации реестров по снижению выбросов парниковых газов. Связь между тремя частями комплекса стандартов ИСО 14064 представлена на рис. 2.

Для реализации климатической повестки подписавшие ее страны разрабатывают стратегии по снижению выбросов ПГ, применяя вышеописанные инструменты и стандарты. Ключевым инструментом сокращения выбросов парниковых газов в странах Европейского Союза является Система торговли квотами (СТК) (European Union's Emissions Trading System (EU ETS)) – крупнейший углеродный рынок в мире [9]. С помощью EU ETS Европейский Союз создал рыночный механизм, который устанавливает плату за выбросы и создает стимул для их сокращения наиболее экономичным способом. За последние 16 лет углеродный след в Европе с использованием EU ETS снизился на 42,8 %. Механизм системы торговли выбросами заключается в следующем: компании покупают на год

квоты на выбросы парниковых газов у государства в соответствии с эмиссией ПГ от своих производств. Рассматриваемая мера способствует интенсивным действиям компаний по снижению углеродного следа и возможности продажи приобретенных квот на выбросы другим компаниям, а также избеганию платы сверх норматива. Существует бесплатное получение квот на выбросы ПГ при использовании низкоуглеродных технологий и реализации проектов по декарбонизации. Первой страной в мире, которая ввела налог на выбросы ПГ в 1990 г., стала Финляндия. В настоящее время налог на выбросы парниковых газов введен в 16 европейских странах, каждая из которых самостоятельно формирует перечень парниковых газов, попадающих под действие налога, а также плату за тонну выбросов ПГ в пересчете на CO_2 . Каждому парниковому газу присвоен свой потенциал глобального потепления: для оксида углерода (CO_2) от равен единице, для метана (CH_4) – 28, для оксида азота (N_2O) – 265 (согласно пятому оценочному докладу МГЭИК). Ставки налога на выбросы углерода, доля покрываемых выбросов парниковых газов и год внедрения в европейских странах по состоянию на 2020 г. приведены в табл. 1 [10].

Ставки налога на выбросы ПГ в Европе в 2020 г.
Table 1. Carbon tax rates in Europe in 2020

Страна	Ставка налога на выбросы углерода		Год реализации
	Евро	Доллары США	
Дания	23,77	26,00	1992
Эстония	1,83	2,00	2000
Финляндия	62,18	68,00	1990
Франция	44,81	49,00	2014
Исландия	27,43	30,00	2010
Ирландия	25,60	28,00	2010
Латвия	9,14	10,00	2004
Лихтенштейн	90,53	99,00	2008
Норвегия	48,46	53,00	1991
Польша	0,09	0,10	1990
Португалия	23,77	26,00	2015
Словения	17,37	19,00	1996
Испания	14,63	16,00	2014
Швеция	108,81	119,00	1991
Швейцария	90,53	99,00	2008
Украина	0,37	0,40	2011
Великобритания	20,12	22,00	2013
Среднее значение	35,85	39,21	–

Цена за тонну выбросов ПГ варьируется от очень высокой (Швеция с 119 долларов за тонну) до очень низкой (Польша с 0,1 долларов за тонну). Средняя цена выбросов ПГ в ЕС составляет 39,21 долларов за тонну выбросов.

В мире функционируют еще 24 системы торговли квотами на выбросы ПГ, наиболее крупными являются СТК Китая и СТК США. В России пилотная СТК будет запущена в 2022 г.

В рамках реализации Парижского соглашения в России в 2015 г. издан Указ Президента РФ «О сокращении выбросов парниковых газов»:

– обеспечить к 2030 г. сокращение выбросов парниковых газов до 70 % относительно уровня 1990 г. с учетом максимально возможной поглощающей способности лесов, иных экосистем, а также при условии устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития Российской Федерации [11];

– разработать с учетом особенностей отраслей экономики Стратегию социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. и утвердить ее;

– создать условия для реализации мер по сокращению и предотвращению выбросов парни-

ковых газов, а также по увеличению поглощения ПГ.

Стратегия социально-экономического развития РФ до 2050 г. предусматривает два сценария: инерционный и целевой (интенсивный) [12]. На рис. 3 представлены возможные сценарии достижения углеродной нейтральности.

Инерционный сценарий предполагает сохранение текущей экономической модели, включая сохранение структуры баланса по выработке и потреблению энергии. Рассмотренный сценарий не позволяет достичь углеродной нейтральности на горизонте планирования. Инерционный сценарий развития сопряжен с рисками, выражающимися в виде снижения бюджетных доходов в результате сокращения энергетического экспорта, потери доли в мировом валовом внутреннем продукте, отставании в технологическом развитии, исчерпании возможностей экспортно-сырьевой модели развития, ухудшении условий привлечения долгового финансирования, снижении объема инвестиций, оттока капитала, потенциального риска оттока человеческого капитала, медленного роста располагаемых доходов населения.

Целевой (интенсивный) сценарий развития обеспечивает взаимосвязь между целями меж



Рис. 3. Перспективы достижения углеродной нейтральности и параметры сценариев [13]

Fig. 3. Prospects for achieving carbon neutrality and scenario parameters [13]

дународной климатической повестки по снижению выбросов парниковых газов, экономическими возможностями страны по переходу на технологии с низким уровнем выбросов парниковых газов и обеспечением национальных интересов социально-экономического развития. Такой сценарий рассматривает меры политики в области технического регулирования, финансовой и налоговой политики, направленные на снижение эмиссии парниковых газов. Реализация целевого сценария может обеспечить высокие показатели социально-экономического развития страны, а также приведет к выполнению условий Парижского соглашения по снижению выбросов парниковых газов.

Для реализации целевого сценария стратегии и регулирования выбросов парниковых газов разработаны и приняты следующие нормативно-правовые акты:

– Федеральный закон № 296 от 02.07.2021 г. «Об ограничении выбросов парниковых газов»; он включает в себя меры по ограничению выбросов, порядок предоставления отчетности, порядок проверки отчетов, критерии отчетности выбросов, порядок отнесения проектов компании по снижению выбросов ПГ к климатическим, реестр углеродных единиц, их обращение и зачет [14];

– Распоряжение правительства РФ 707 от 20.04.2022 г. «Правила предоставления и проверки отчетов о выбросах парниковых газов...», включающее правила предоставления отчетности [15];

– Приказ Министерства Природы № 300 от 30.06.2015 г., состоящий из расчетных методик количественного определения выбросов ПГ при производстве (Scope 1) [16];

– Приказ Министерства Природы № 330 от 29.06.2017 г., содержащий методику расчета косвенных выбросов парниковых газов (Scope 2) [17].

Российская методика расчетов выбросов парниковых газов основана на международных методиках, однако в настоящее время она имеет отличия (табл. 2).

Выводы

Важность борьбы с изменением климата как на мировом уровне, так и для каждой отдельной страны предопределила заключение соглашений по снижению выбросов ПГ. Для решения климатической проблемы разработаны различные инструменты учета выбросов и их снижения. Также внедряются механизмы создания фактической цены выбросов ПГ: системы торговли квотами и введение углеродных налогов. Одной из старейших и наиболее эффективных систем торговли квотами является СТК Европейского Союза, с помощью которой за последние 16 лет выбросы ПГ в ЕС удалось снизить более чем на 40 %. Страны, города и отдельные компании в рамках климатической повестки формируют стратегии снижения выбросов парниковых газов. Россия разработала свою стратегию низкоуглеродного развития до 2050 г. с учетом экономических возможностей и обеспечения национальных интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Global Risks Report 2020. World Economic Forum, 2020. 102 p.

Различия Международных методик расчета выбросов ПГ от Российской***Table 2. Differences between International methods for calculating GHG emissions from the Russian***

Типы выбросов	Greenhouse Gas (GHG) Protocol	Приказы Министерства природы №№ 300, 330
Score 1	Учитываются выбросы ПГ (правая колонка). Дополнительно к учету принимаются выбросы от мобильного сжигания топлива (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O), утечки метана при обращении с отходами (CH ₄) и прочие выбросы ПГ непосредственно от операций, связанных с деятельностью компании при создании продукции	Стационарное сжигание топлива (CO ₂), сжигание в факелах (CO ₂ , CH ₄), фугитивные выбросы (CO ₂ , CH ₄), нефтепереработка (CO ₂), производства кокса (CO ₂), цемента (CO ₂), извести (CO ₂), стекла (CO ₂), керамических изделий (CO ₂), аммиака (CO ₂), азотной кислоты, капролактама, глиоксаля и глиоксиловой кислоты (N ₂ O), нефтехимическое производство (CO ₂), производство фторсодержащих соединений (SF ₆ , CHF ₃), черная металлургия (CO ₂), производства ферросплавов (CO ₂), первичного алюминия (CF ₄ , C ₂ F ₆ , CO ₂), прочие промышленные процессы (CO ₂), авиационный транспорт (CO ₂), железнодорожный транспорт (CO ₂)
Score 2	<i>Два метода расчета:</i> – региональный метод (location-based); определение средних значений интенсивности выбросов по региону; применим для всех электросетей; – рыночный метод (market-based); применим в странах, где рынки сбыта электроэнергии предоставляют потребителю возможность выбора источника происхождения электроэнергии	<i>Два метода расчета**:</i> – региональный метод (location-based); применяются региональные коэффициенты косвенных энергетических выбросов (отсутствуют публикуемые коэффициенты расчета); – рыночный метод (market-based); применяются рыночные коэффициенты косвенных энергетических выбросов
Score 3	Прочие косвенные выбросы, которые делятся на upstream («восходящие», «вверх по цепочке») и downstream («нисходящие», «вниз по цепочке»)	Требования отсутствуют
Пр и м е ч а н и е: * – составлено автором; ** – в соответствии с Постановлением Правительства № 707 Score 2 пока не входит в отчетность по ПГ.		

- Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата. Генеральная Ассамблея, 1992. 24 с.
- Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. Генеральная Ассамблея, 1997. 20 с.
- Парижское соглашение к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. Генеральная Ассамблея, 2015. 42 с.
- Ермакова М.С. Выбросы парниковых газов // Экология производства. 2021. С. 98–105.
- The Greenhouse Gas (GHG) Protocol, a Corporate Accounting and Reporting Standard, 2001. 116 с.
- Стандарт ISO 14064 Greenhouse gases, 2018. 47 с.
- ГОСТ Р ИСО 14064 – 2021 Газы парниковые. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 49 с.
- Директива Европейского Парламента и совета о комплексной проверке корпоративной устойчивости. Европейская комиссия, 2021. 69 с.
- State and Trends of Carbon Pricing 2020. World Bank Group, 2020. 105 с.
- Указ Президента Российской Федерации № 666 О сокращении выбросов парниковых газов. 2020.
- Стратегия социально экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Правительство Российской Федерации, 2021. 34 с.
- Стратегия низкоуглеродного развития и позиция России к 26-й сессии Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата в Глазго. Министерство экономического развития РФ, 2021. 22 с.
- Федеральный закон № 296 Об ограничении выбросов парниковых газов, 2021. 20 с.
- Постановление Правительства РФ № 707 Об утверждении правил предоставления и проверки отчетов о выбросах парниковых газов, 2022. 36 с.

16. Приказ Министерства Природы РФ № 300, 2015. 68 с.
17. Приказ Министерства Природы РФ № 330, 2017. 11 с.

REFERENCES

1. *Report on global risks for 2020*. The World Economic Forum. 2020, 102 p.
2. *United Nations Framework Convention on Climate Change*. The General Assembly. 1992, 24 p. (In Russ.).
3. *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. General Assambleya. 1997, 20 p. (In Russ.).
4. *Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. General Assambleya. 2015, 42 p. (In Russ.).
5. Ermakova M.S. *Greenhouse gas emissions. Ecology of production*. 2021, pp. 98–105. (In Russ.).
6. *Protocol on Greenhouse Gases (GHG), Corporate Accounting and Reporting Standard*. 2001, 116 p.
7. *ISO 14064 Greenhouse gases*. 2018, 47 p. (In Russ.).
8. *GOST R ISO 14064–2021 Greenhouse gases*. Moscow: Russian Institute of Standardization. 2021, 49 p. (In Russ.).
9. *The Directive of the European Parliament and the Council on the comprehensive audit of corporate sustainability*. The European Commission. 2021, 69 p. (In Russ.).
10. *The state and trends of carbon pricing by 2020*. The World Bank Group. 2020, 105 p.
11. *Decree of the President of the Russian Federation no. 666 On Reducing Greenhouse Gas Emissions*. 2020. (In Russ.).
12. *Strategy of socio-economic development of the Russian Federation with low greenhouse gas emissions until 2050*. The Government of the Russian Federation. 2021, 34 p. (In Russ.).
13. *Low-carbon Development Strategy and Russia's position on the 26th session of the Conference of the Parties to the UN Framework Convention on Climate Change in Glasgow*. Ministry of Economic Development of the Russian Federation. 2021, 22 p. (In Russ.).
14. *Federal Law no. 296 On Limiting Greenhouse Gas Emissions*. 2021, 20 p. (In Russ.).
15. *Resolution of the Government of the Russian Federation no. 707 On the Approval of the Rules for the Provision and verification of reports on greenhouse Gas Emissions*. 2022. 36 p. (In Russ.).
16. *Order of the Ministry of Labor of the Russian Federation no. 300*. 2015, 68 p. (In Russ.).
17. *Order of the Ministry of Labor of the Russian Federation no. 330*. 2017, 11 p. (In Russ.).

Сведения об авторах

Илья Александрович Нагайцев, главный специалист по экологическому сопровождению проектов, ООО «Распадская угольная компания»
E-mail: Ilya.Nagajtsev@raspadskaya.ru

Information about the authors

Ilya Alexandrovich Nagajtsev, Chief Specialist for Environmental Support of Projects, LLC Raspadskaya Coal Company
E-mail: Ilya.Nagajtsev@raspadskaya.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 11.08.2022
После доработки 25.08.2022
Принята к публикации 05.09.2022

Received 11.08.2022
Revised 25.08.2022
Accepted 05.09.2022

Оригинальная статья

УДК 331.548

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-132-141

**КАЧЕСТВО РАБОЧЕЙ СИЛЫ В СОВРЕМЕННЫХ
СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

© 2022 г. Л. А. Пьянкова, О. А. Затепякин

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская область – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Исследуемая экономическая категория «качество рабочей силы» маркируется индексом глобальной конкурентоспособности отдельного государства в общей мировой ситуации. Качество рабочей силы обуславливает рейтинг экономической состоятельности наряду с общими факторами (управление государственными финансами, уровень инфляции, меры защиты прав интеллектуальной собственности, развитая судебная система и другое). Качество рабочей силы отражает уровневую дифференциацию в зависимости от средств производства и представляет совокупность квалификационно-личностных свойств, проявляемых непосредственно в процессе труда, широко охватывающих профессиональный, физиологический и социально-психологический базисы работника, его адаптационные умения как непрерывно развивающегося субъекта социально-трудовых отношений. Повышение качества рабочей силы коррелирует с совершенствованием характеристик его структурных элементов (природных, приобретенных и социально значимых индикаторов в ходе выполнения определенной профессиональной деятельности). Качество рабочей силы производно рабочей силе, где дуалистично отражается товар, находящийся в руках рабочего (носителя компетенций и капитал) имеющий цену после продажи собственником результата труда, произведенного рабочим. Обсуждаемая дефиниция – динамичная, активно прирастающая экономическая категория, трансформирующаяся за счет развития и формирования квалификационных умений и навыков работника, его готовности к этим процессам в создаваемых работодателем условиях. Развитие качества рабочей силы – показатель социально-экономических, политических процессов, ведущих трендов развития общества, влияющих на рынок труда. Ядром прироста качества рабочей силы в условиях информационного и высокоразвитого технологического общества с очевидными признаками искусственного интеллекта выступают креативность, коммуникабельность, принятие масштабных изменений, готовность к образованию на всей траектории ее профессионального пути, формирование необходимых компетенций «на опережение», полипрофессионализм, толерантность к стрессу и неопределенности в условиях множественных вызовов среды. Приведенный набор – это универсалии, дифференцируемые в реальной профессионально-социальной среде. В существующем мирохозяйственном укладе содержание качества рабочей силы трансформируется за счет замены человеческого труда информационными технологиями

Ключевые слова: качество рабочей силы, рабочая силы, повышение качества рабочей силы

Для цитирования: Пьянкова Л.А., Затепякин О.А. Качество рабочей силы в современных социально-экономических условиях // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 132 – 141. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-131-140](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-131-140)

Original article

**THE QUALITY OF THE WORKFORCE IN MODERN SOCIO-ECONOMIC
CONDITIONS**

© 2022 L. A. Pyankova, O. A. Zatepyakin

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The studied economic category "quality of labor force" is marked by the index of global competitiveness of an individual state in the general world situation. As a matter of fact, the quality of the workforce determines the rating of economic viability, along with general factors: public finance management, inflation rate, measures to protect intellectual property rights, a developed judicial system, and more. The quality of the labor force reflects the level differentiation depending on the means of production and represents a set of qualification and personal properties manifested directly in the labor process, broadly covering the professional, physiological and socio-psychological basis of the employee, his adaptive skills as a continuously developing subject of social and labor relations. The improvement of the quality of the workforce correlates with the improvement of the characteristics of its structural elements: natural, acquired and socially significant indicators in the course of performing a certain professional activity. "The quality of labor force" is derived from "labor force", which dualistically reflects the goods in the hands of the worker – the carrier of competencies and capital – having a price after the owner sells the result of labor produced by the worker. The definition under discussion is a dynamic, actively growing economic category that is being transformed due to the development and formation of the qualification skills of the employee, his readiness for these processes in the conditions created by the employer. The development of the quality of the workforce is an indicator of socio-economic, political processes, leading trends in the development of society that affect the labor market. The core of the increase in the quality of the workforce in the conditions of an informational and highly developed technological society with obvious signs of artificial intelligence are creativity, sociability, acceptance of large-scale changes, readiness for education throughout the trajectory of its professional path, the formation of the necessary competencies "ahead of the curve", polyprofessionalism, tolerance to stress and uncertainty in the conditions of multiple environmental challenges. The above set are universals differentiated in a real professional and social environment. In the existing world economic system, the content of the quality of labor is transformed by replacing human labor with information technologies.

Keywords: labor force quality, labor force, labor force quality improvement

For citation: Pyankova L.A., Zatepyakin O.A. The quality of the labor force in modern Socio-economic conditions. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4 (42), pp. 131 – 140. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-132-141](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-132-141)

Введение

Проведенные государственные реформы в России в области экономики и промышленности, ставящие целью запуск рыночных механизмов накопления капитала, оказались неэффективными и только усилили разрывы в технологическом и экономическом потенциалах страны на фоне стремительно развивающегося мирового сообщества. Практически во всех отраслях происходит массовое применение новейших достижений науки и техники. Появление инноваций во всех аспектах деятельности человека обусловили определенный тип поведения большинства компаний во всем мире, нацеленный на адаптацию к существующим изменениям (трансформировались современные технические средства, появились новые виды продукции, выросла наукоемкость производства).

Обозначенные реалии требуют переосмысления управленческим составом стратегии развития собственных организаций, стоящих перед ними целей и приоритетов. В сложившейся ситуации мощный ресурс выживания и конкурентоспособности кроется в использовании внутренних резервов производства, одним из которых является повышение качества рабочей силы в процессе внутрифирменной подготовки персонала.

Цель настоящей работы – раскрыть содержание качества рабочей силы в современных социально-экономических условиях.

Задачи исследования следующие:

- провести категориальный анализ качества рабочей силы и предложить классификационную структуру в условиях замещения человеческого труда информационными технологиями;
- сформировать концептуально новое представление о перечне актуальных универсальных и «тяжелых» («машинных») компетенций работников в рамках приближающегося промышленно-технологического уклада.

Основные результаты

В современных социально-экономических реалиях человека на производстве следует рассматривать как основной капитал компании (в то же время предмет статей расходов), что ориентирует управленческий вектор организаций на рост качественной занятости рабочей силы, выступающей общенациональной задачей. Работник как создатель продаваемых, а значит, приносящих прибыль предприятию, продукции и услуг ценен в той мере, в какой он обладает необходимыми компетенциями, оказывается готов к их своевременному обновлению и наращиванию.

На совместном заседании Госсовета и Комиссии по мониторингу достижения целевых показателей развития страны сделан акцент на том, что подготовка высококвалифицированных рабочих (инженерных кадров) для реальной экономики – это не чья-то корпоративная, частная задача, это общенациональная необходимость, одно из главных условий существенного повышения производительности труда. Поэтому решению насущных экономических проблем посвящена реализация принятой правительством РФ «Стратегии государственной национальной политики Российской Федерации на период до 2025 года» [1]. Основным посылом таких мер является осуществление деятельности правительства и представителей российского бизнеса в области повышения производительности имеющихся и создания новых высокотехнологичных и высокопроизводительных рабочих мест путем повышения качества рабочей силы на различных этапах ее подготовки, начиная от профессионального обучения и заканчивая внутриорганизационными мероприятиями, предусмотренными в предложенной организацией «Деловая Россия» «Стратегии 25×25». Современные компании, претендующие на ведущие позиции на рынке, не только опираются на имеющийся продуктивный опыт, но и находятся в постоянном поиске возможностей применения ресурсов искусственного интеллекта для перенастройки бизнес-процесса, корректировки целей и результатов в направлении перезапуска коммуникаций, работы с заинтересованными лицами, подготовки к организационным изменениям, включая готовность рабочих мест, разработки качественных характеристик персонала, определяющих его способности к выполнению профессиональных обязанностей, совершенствованию методов анализа и адекватной оценке уровня качества рабочей силы [2, 3].

Продуктивным является изучение индекса глобальной конкурентоспособности. Он разработан и инициирован Всемирным экономическим форумом (World Economic Forum) при участии сети партнерских организаций (ведущих исследовательских институтов и организаций в странах, анализируемых в отчете), рассчитывается по методике, основанной на комбинации общедоступных статистических данных и результатов глобального опроса руководителей компаний [4]. Настоящее исследование запущено с 2004 года. Оно является глобальным по его территориальному охвату и в настоящее время представляет наиболее полный комплекс показателей конкурентоспособности по различным странам мира. Анализ полученных результатов дает основание для составления рейтинга госу-

дарств по показателю экономической конкурентоспособности.

Представители Всемирного экономического форума в ряду факторов конкурентоспособности национальных экономик называют полярные по своему исходу сущности. Они считают, что отрицательное влияние оказывают неэффективное управление государственными финансами и высокая инфляция, а положительный ее эффект достигается, в том числе, через систему мер, включая защиту прав интеллектуальной собственности, развитую судебную систему и другое. Наряду с институциональными факторами в условиях экспоненциальности происходящих изменений, уменьшения жизненного цикла продукции в обществе, где мышление сдвигается в сторону «больших ценностей», а суть ключевых навыков современного специалиста сводится к интеллектуальным компетенциям, первоочередное значение имеют образование и повышение квалификации рабочей силы, постоянный доступ к новым знаниям и технологиям. Неодинаковое влияние факторов, определяющих конкурентоспособность экономики стран мира, обусловлено их стартовыми условиями, текущим уровнем ее развития (факторы меняют свой вес в течение времени).

Рассматриваемый индекс составлен на основе 12 переменных, включающих качество институтов, инфраструктуру, макроэкономическую стабильность, здоровье и начальное образование, высшее образование и профессиональную подготовку, эффективность рынка товаров и услуг, эффективность рынка труда, развитость финансового рынка, уровень технологического развития, размер внутреннего рынка, конкурентоспособность компаний, инновационный потенциал [5].

Ансамбль именно этих индикаторов построен на теоретических и эмпирических исследованиях, причем ни один фактор не в состоянии обособленно обеспечить конкурентоспособность экономики. Очевидно, что снижение расходов на образование может происходить по причине неэффективности рынка рабочей силы, а также и других недостатков институциональной структуры, включая отсутствие рабочих мест для выпускников. Улучшение макроэкономической среды за счет оптимизации контроля над государственным финансированием будет заметным в случае преодоления коррупции и масштабных нарушений. Внедрение инноваций предпринимателями – это не всегда только вопрос технологий, сколько экономической целесообразности их применения, когда ожидаемая прибыль превышает необходимые вложения. Выводы Всемирного экономического форума о причинах конкурентоспособности экономики

тех или иных стран мира связаны с готовностью правительства этих государств проводить всеобъемлющую политику, основываясь не только на учете самих факторов, но и наличии связей между ними. На фоне заметных технологических прорывов, происходящих в государствах с развитой и даже развивающейся экономикой, Россия отличается низким уровнем качества рабочей силы. В представленных вторичных исследованиях, показывающих рейтинг стран мира по индексу глобальной конкурентоспособности за 2019 – 2020 гг. [6, 7], Россия не вошла в десятку, оказавшись на 43 месте.

Осмысляя экономическую категорию «качество рабочей силы», обратились к ГОСТ Р ИСО 9000 – 2008 [8]. В этом нормативе качество – это степень соответствия совокупности присущих характеристик требованиям. Под качеством рабочей силы следует понимать совокупность таких характеристик рабочей силы, которые удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ней работодателем, уровнем технического оснащения производственной базы предприятия и обществом в целом. Уровневая дифференциация качества рабочей силы зависит от использования средств производства, влияющих на производительность труда. Высокий уровень качества рабочей силы предусматривает создание качественно новых средств производства, увеличивающих производительность труда. Средний уровень качества рабочей силы – использование действующих средств производства, маркером низкого уровня качества рабочей силы является применение устаревших средств производства.

В российской экономической литературе одно из определений качества рабочей силы может быть представлено совокупностью квалификационно-личностных свойств человека, проявляемых им непосредственно в процессе труда, включая его физиологические и социально-психологические особенности (состояние здоровья, когнитивные умения), а также адаптированность, реализуемую в гибкости, мобильности, мотивируемости, инновационности, профориентированности и профессиональной пригодности.

Изучение рабочей силы находится в фокусе основного внимания в экономической теории К.О. Маркса. В научном труде «Капитал» К.О. Марксом предложено следующее определение рабочей силы: «...под рабочей силой или способностью к труду, мы понимаем совокупность физических и духовных способностей, которыми обладает организм, живая личность человека, и которые пускаются им в ход всякий раз, когда он производит какие-либо потребительные стоимости» [9]. Примечательно, что рабочая сила для К.О. Маркса дуалистична (товар и капитал).

Товаром она является в руках рабочего как носителя определенных умений и навыков, капиталом становится же только после продажи в руках капиталиста во время самого процесса производства.

Содержание категории «качество рабочей силы» коррелирует с определенным уровнем развития профессиональных и квалификационных качеств работника, позволяющих исполнять поставленные перед ним трудовые задачи с соответствующей степенью сложности и интенсивности в рамках существующего на конкретном предприятии способа производства. Показателем уровня качества рабочей силы при этом являются общеобразовательный и квалификационный базисы развития работника, его профессиональная пригодность. В соответствии с анализом рассмотренных выше подходов к трактовке понятия качество рабочей силы наиболее содержательным представляется совокупность свойств человека, проявляющихся в процессе труда, включая квалификацию и личностные характеристики работника. Они суть его физиологических и социально-психологических особенностей: состояние здоровья, умственное развитие, способность к адаптации, проявляемые в гибкости, мобильности, профессиональной ориентации, уровне мотивации, способности к принятию инноваций, профессиональной ориентированности и пригодности.

Руководствуясь этим определением, можно предложить следующую классификационную структуру качества рабочей силы:

- природные качества (здоровье, возраст, быстрота, физические показатели);
- приобретенные качества (знания, навыки, образование, квалификация, компетентность);
- социально значимые качества, социальная квалификация (мобильность, адаптируемость, обучаемость, ответственность, лояльность, мотивация, креативность, коммуникабельность).

Отметим основополагающие конструкты, полагая, что качество рабочей силы многослойная структура ее квалификации.

Качество рабочей силы по своей сути многогранная, комплексная научная категория, представленная системой развивающихся на протяжении истории экономических отношений, характеризующаяся наличием сложной структуры, где основными элементами являются способности человека к получению образования и повышению квалификации, его мобильность и возможности адаптации, уровень экономической культуры и развития компетенций, профессиональных знаний и навыков. Креативность и коммуникабельность – значимые составляющие качества рабочей силы в связи с формированием

информационного общества и экономики знаний, определяющие эффективность использования актуальной информации и человеческого капитала как основного фактора развития социума. Высокий уровень развития рассматриваемых качеств у работников позволяет компаниям наиболее полно использовать имеющийся человеческий капитал для достижения поставленных перед ними целей и заявленной миссии.

Повышение качества рабочей силы связано с совершенствованием характеристик его структурных элементов (природных, приобретенных и социально значимых качеств в результате определенной деятельности). В этом случае таковой является целенаправленная деятельность компании по развитию сотрудников за счет организации внутрифирменной подготовки персонала, которая специализируется на формировании приобретаемых и социально значимых качеств рабочей силы (знаний, навыков, квалификации, коммуникабельности и т.д.), а также может способствовать улучшению природных качеств рабочей силы. Стоит заметить, что не все элементы качества рабочей силы поддаются улучшению (возраст работника). Такие ее составляющие как быстрота реакции, здоровье, мобильность могут быть изменены в компании через систему мер социальной поддержки работников. Природные качества рабочей силы сравнительно более тяжело поддаются улучшению с остальными элементами, так как во многом обусловлены уровнем жизни и достатка работника [10].

Цифровизация является ведущим трендом нового сложного мира, связанным с изменением бизнес-процессов с точки зрения их философской, инструментальной и критериальной основ для трансформации компетенций персонала организаций, выступает главным условием осуществления масштабных государственных инвестиций для реализации соответствующих мероприятий, приводящих к росту экономики в плане соотношения затрат и результатов. Вне зависимости от сценария экономического развития требуются гарантии достаточной отдачи от таких вложений для обоснования целесообразности их осуществления.

Основное предназначение цифровизации отраслей – привести к изменению спроса на факторы производства. Под влиянием цифровых технологий и связанных с ними новых бизнес-моделей трансформируются не только отдельные сектора, но и вся структура экономики и межотраслевых взаимодействий (работа с данными, клиентский опыт, партнерство и коллабо-

рации, HR-стратегия и культура, внедрение инноваций, управление ценностью).

Расчеты показывают, что в базовом сценарии при умеренно-благоприятных макроэкономических и институциональных условиях (опережающем росте инвестиционной активности во всех секторах российской экономики и достижении максимальных эффектов научно-технологического развития) цифровизация может значительно повысить факторную производительность как отраслей промышленности, так и сферы услуг (см. таблицу) [11].

Цифровизация, оказывая влияние как на отдельно взятого работника, так и на отрасли и бизнес-модели, несет в себе определенные риски, которые следует учесть и максимально нивелировать. Согласно исследованию Норберта Арнольда и Томаса Келера «Цифровое общество», признается необходимость регулирования последствий внедрения искусственного интеллекта [12]. В создаваемых цифровизацией условиях существования общества сценарии злоупотребления современными технологиями становятся настолько очевидными, что их последствия могут далеко превосходить описанное Джорджем Оруэллом в его антиутопии «1984», а также другими авторами (Рэем Брэдбери, Джеком Лондоном или Евгением Замятиным, еще в 1920 году написавшим роман «Мы»).

Немецкие исследователи видят решение проблемы противостояния негативным последствиям цифровизации в углублении сферы защиты личных данных от злоупотреблений. Подобный шаг рассматривается ими как право на информационное самоопределение, охрану права личности в случае ее цифровой обработки. Поэтому процессу цифровизации экономики и особенно общественной жизни в условиях существующего мирохозяйственного уклада должно сопутствовать усиление общественного контроля за соблюдением законов, связанных с внедрением цифровизации.

Приближающаяся, а где-то уже и наступающая (Германия, Сингапур, Великобритания) четвертая индустриальная революция (Индустрия 4.0) означает полную автоматизацию производства в формате «цифры», управляемого интеллектуальными системами в режиме реального времени в постоянном взаимодействии с внешней средой, выходящее за границы одного предприятия, с перспективой объединения в глобальную промышленную сеть вещей и услуг [13]. Индустрия 4.0 описывает текущий тренд развития автоматизации и обмена данными, ко-

Влияние цифровизации на факторную производительность труда отраслей промышленности и сферы услуг
The impact of digitalization on the factor productivity of industries and services

Сектора экономики	Вклад производительности (СПФ), %	Вклад капитала, %	Вклад труда, %	Итого, %
Финансовый сектор	0,92	1,20	0,93	3,04
Транспорт	1,29	1,20	0,55	3,03
Строительство	0,98	1,02	0,88	2,88
Образование	1,00	1,20	0,57	2,77
Химическая промышленность	1,64	1,40	-0,43	2,61
Машиностроение	1,52	1,48	-0,46	2,54
Прочие услуги	0,93	0,79	0,24	1,95
Здравоохранение	0,81	0,58	0,25	1,65
Легкая промышленность	1,02	0,96	-0,65	1,32
Электроэнергетика	0,32	0,83	0,04	1,19
Торговля	0,60	0,36	0,04	1,00
АПК	0,78	0,69	-0,56	0,91
Госуправление	0,58	0,24	-0,40	0,41
Лесопромышленный комплекс	0,31	0,14	-0,53	-0,08
Металлургия	0,25	0,10	-0,55	-0,21
Добыча	0,08	0,04	-0,46	-0,35

торый включает в себя киберфизические системы, Интернет вещей и облачные вычисления, автономные роботы, большие данные, интеграцию и другое. Она представляет собой новый уровень организации производства и управления цепочкой создания стоимости на протяжении всего жизненного цикла выпускаемой продукции, включает такие глобальные тренды, как аддитивные технологии, кибербезопасность, дополненную реальность и другое.

Согласно исследованиям KPMG International за 2020 год одной из крупнейших в мире сетей, осуществляющих аудиторские, налоговые и консультационные услуги, входящая в аудиторскую компанию Большой четверки и имеющая представительство в Москве [14], четвертая промышленная революция – это вызов процессам трансформации к темпам, в которых большинство производителей отстает, что в перспективе создаст или уже создает конкурентные угрозы со стороны новых, более активных и инновационно продвинутых на рынке игроков. Рассматриваемое обстоятельство с неизбежностью подвигает руководство компаний к разработке централизованной стратегии по запуску широкомасштабных изменений. Однако отмечается, что у высшего руководства многих произ-

водителей есть ложное ощущение безопасности. При этом, поскольку организации придерживаются подхода к трансформации на основе отдельных проектов по принципу «снизу-вверх», начиная с физических изменений на заводах и заканчивая интеграцией больших данных, то в качестве доказательства трансформации в рамках четвертой промышленной революции приводится сокращение затрат. Компании сигнализируют об улучшении финансовых результатов в краткосрочной перспективе. Однако в долгосрочном сценарии отдельные инициативы могут обходиться дороже и приносить меньше прибыли, если компании окажутся вынуждены корректировать курс с учетом невероятной скорости изменений, происходящих в секторе промышленного производства.

Трансформация в рамках приближающегося промышленно-технологического уклада должна предусматривать ряд шагов, стартуя от разработки стратегии в каждом структурном подразделении предприятия, пересмотра всей архитектуры организации, начиная с функциональных подразделений и заканчивая системой создания стоимости. Важным является создание динамичной корпоративной культуры, предполагающей принятие новых цифровых технологий,

повышающих стоимость бизнеса и пересмотр способов оценки успешности ключевых показателей эффективности. Приближение к четвертой промышленной революции для компаний в существующих условиях означает формирование базиса, включая стратегический подход, комплексный план трансформации и соответствующую корпоративную культуру, благоприятную для изменений [15].

При очевидных преимуществах цифровизации, запустившей новый формат бизнес-процессов, приведших к организационным изменениям, упрощению производственных процессов с частичным переносом в автоматизированное их исполнение и многократное ускорение, она имеет целый ряд недостатков социально-экономического и психологического свойств [16].

Существует риск наступления хаоса из-за разных форматов программирования. В связи с этим встает вопрос унификации языка программирования для всех корпораций. Одной из главных целей остается разработать общий язык для всех компаний. При этом идентичность матриц для процессов программирования исходно несет риски (несколько компаний могут получить абсолютное преимущество на рынке).

Еще одной серьезной проблемой является безопасность сетей, поскольку они все уязвимы к кибератакам. Фактор удаленного влияния на производственный процесс настолько существенен, что может полностью его парализовать. Рост «умных заводов» связан с потенциальным риском нападения и сбоя системы.

Побочным эффектом цифровизации является замена человеческого труда машинным, что в дальнейшем только будет обострять проблему безработицы. Это обстоятельство может существенно навредить развивающимся странам, поскольку поддержание машин в рабочем состоянии очень затратно. Не следует исключать фактор отсутствия спроса на продукцию в условиях обеднения населения и разорения компаний.

Четвертая промышленная революция инициирует процесс социального расслоения, который подобен механизму, запускающему последовательное разрушение технологических и экономических цепочек в бизнес-процессах и в социальных процессах. Появление роботизированных решений множества задач потенциально может понизить ценности низко- и среднеквалифицированного труда. Это может уменьшить прослойку «среднего класса», что ограничит возможности его представителей для вложения в собственный человеческий капитал. Застывший «человеческий капитал» создает работникам труднопреодолимые барьеры для вхождения на рынок высококвалифицированного труда и в

дальнейшем его оплаты, только усиливая их неконкурентность и отставание. Обесценивание низкоквалифицированного человеческого труда и снижение его удельного веса в общем объеме рабочей силы на рынке трудовых услуг грозит потерей для развивающихся стран преимущества дешевой рабочей силы и возможностей для «догоняющего» развития. Это только усилит расслоение в благосостоянии между странами.

На этом общем негативном фоне в условиях нового мирохозяйственного уклада для традиционно отстающих стран в связи с перекраиванием глобального рынка труда и понижением роли некоторых ограничивающих факторов (географического положения, институциональной неразвитости), могут открыться новые возможности, включая стимулирование частного предпринимательства, приносящего благосостояние людям и обеспечивающее экономическое развитие страны. Если государственный подход к стимулированию частной инициативы и предпринимательства сможет интегрировать разные социальные слои и группы это станет стимулом для роста благосостояния.

В ближайшие годы заметное повышение темпов внедрения технологий может произойти только в некоторых отраслях, ввиду организационной и инновационной неготовности компаний. При этом наибольшую заинтересованность организации в настоящее время проявляют к облачным вычислениям и технологиям, связанным с большими данными и электронной коммерцией, шифрованию, роботизации и искусственному интеллекту.

По прогнозам к 2025 г. ожидается временной паритет людей и машин на выполнение текущих задач. Однако уже сейчас 84 % работодателей нацелены на цифровизацию многих рабочих процессов, включая значительное расширение дистанционной работы [17]. Вступивший в силу с 1 января 2021 года закон об удаленной занятости создал условия для ее реального осуществления. Для компаний переход на удаленную работу фактически снимает вопрос мобильности персонала и дает возможность привлекать к работе людей из других регионов без релокации. Упрощение работы с удаленными сотрудниками увеличило массовое распространение электронного документооборота (распространение электронной подписи, введение электронных больничных и трудовых, внедрение новых программ обучения). Пандемия как форсмажорный фактор, инициировала, а в ряде случаев закрепила за цифровизацией ее ведущую роль в оптимизации бизнес-процессов, организационных изменений. Она позволила консолидировать разнородные единицы в единое управляемое целое, а

формат онлайн общения внедрился в управленческие процессы, придав им оперативности.

Следует отметить, что часть функций управления оказались возложены на интеллектуальные системы. Так, голосовой робот с естественной речью снизил нагрузку на сотрудников колл-центра, он помог выстроить комфортную беседу с клиентами, проинформировав или напомнив о каком-то событии или записи, в ряде случаев, даже осуществив продажу, приняв и обработав входящие звонки. Цифровой бэк-офис автоматически оформлял документы, онлайн-конференции помогли проводить встречи, переговоры, совещания, планерки с сотрудниками.

В существующих реалиях появляются новые инструменты удаленного контроля, которые выполняют двойную функцию: помощи и тотального контроля, что не позволяет работнику ощущать себя в безопасности, иметь личное пространство. Роботизированная система анализирует поведение сотрудников, определяя, что с ними происходит и отслеживает их нуждаемость в помощи. Широкое внедрение получила практика подключения к рабочему компьютеру или смартфону сотрудника специальной программы, фиксирующую как часто он проверяет почту, как быстро отвечает на письма.

Сказанное выше позволяет констатировать формирование нового подхода к работе (проектного, когда оказалось возможным привлекать людей из разных регионов и создавать команды для отдельных этапов). Молодое поколение встретило такие изменения достаточно безболезненно, что связано с их отношением к работодателю и того, что для них результат важнее процесса. В этой связи очевидным является развитие института самозанятых, дистанционного формата работы более всего отвечающих потребностям в мобильности и снижении налоговой нагрузки, на который есть запрос на рынке труда.

Смена промышленно-технологического уклада, инициирующего новую концепцию производства на технологическом, финансовом и персонализированном уровнях, появление новых материалов, видов продукции, изменение технологических цепочек актуализирует вопрос рационального использования человеческого потенциала, носителя трудовых функций, производителя благ, обладающего набором личностных переменных, синтезирующих индивидуально-типологические особенности, деловые и профессиональные качества [18]. Это с неизбежностью обостряет проблему качества рабочей силы (важного механизма экономического развития стран, их конкурентоспособности на мировом рынке).

Качество рабочей силы – динамичная, активно прирастающая экономическая категория, трансформирующаяся за счет развития и формирования

квалификационных умений и навыков работника, его готовности к этим процессам, в том числе и в создаваемых работодателем условиях. Развитие качества рабочей силы – зеркало социально-экономических, политических процессов, ведущих трендов развития общества, влияющих на рынок труда. Ядром прироста качества рабочей силы в условиях информационного и высокоразвитого технологического общества с очевидными признаками искусственного интеллекта, выступают креативность, коммуникабельность, принятие масштабных изменений, готовность к образованию на всей траектории ее профессионального пути, формирование необходимых компетенций «на опережение», полипрофессионализм, толерантность к стрессу и неопределенности в условиях множественных вызовов среды. Приведенный набор можно рассматривать некими универсалиями, дифференциация которого происходит в реальной профессионально-социальной среде.

Выводы

В существующем мирохозяйственном укладе содержание качества рабочей силы подверглось трансформации за счет замены человеческого труда информационными технологиями, сформировалось концептуально новое представление о перечне актуальных универсальных и «тяжелых» («машинных») компетенций, насыщаемых системностью и аналогизмом мышления для анализа больших баз данных, отбора существенных и второстепенных факторов в производственном процессе для принятия ответственного решения, умение работать в цифровой среде, коммуникабельность, отчетливо выраженные навыки командной работы, толерантность к ситуациям форсмажора, неопределенности и стрессу, навыки работы с компьютером, включая программирование, владение компьютерными программами и связанные с выполнением непосредственных профессиональных обязанностей. В отдельную группу следует включить навыки, связанные с готовностью к управленческой деятельности, куда могут быть отнесены критическое мышление, способность к координации усилий коллектива, распределение обязанностей, выбор векторов социально-профессионального и личностного развития персонала организации, сформированность системного и креативного мышления, готовность к выявлению неэффективных сотрудников, наличие эмоционального интеллекта, умение управлять собственными эмоциями и эмоциями других, клиентоориентированность и когнитивная гибкость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента РФ от 19.12.2012 № 1666 (ред. от 06.12.2018) "О Стратегии государственной национальной политики Российской Федерации на период до 2025 года" [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_139350/ (дата обращения: 12.02.2022).
2. Тенденции изменения качества рабочей силы как основы ее конкурентоспособности в современной экономике [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tendentsii-izmeneniya-kachestva-rabochey-sily-kak-osnovu-eyo-konkurentosposobnosti-v-sovremennoy-ekonomike/viewer> (дата обращения 07.01.2022).
3. Качество рабочей силы как фактор роста социально-трудового потенциала российской экономики [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dissercat.com/content/kachestvo-rabochei-sily-kak-faktor-rosta-sotsialno-trudovogo-potentsiala-rossiiskoi-ekonomik> (дата обращения 07.01.2022).
4. Всемирный экономический форум [Электронный ресурс]. URL: <https://www.weforum.org/> (дата обращения: 12.02.2022).
5. Рейтинг конкурентоспособности [Электронный ресурс]. URL: <http://crimescience.ru/?p=25246> (дата обращения: 13.02.2022).
6. Рейтинг стран мира по индексу глобальной конкурентоспособности 2019 год [Электронный ресурс]. URL: <https://gtmarket.ru/ratings/global-competitiveness-index> (дата обращения 07.01.2022).
7. Рейтинг стран мира по индексу глобальной конкурентоспособности 2020 год [Электронный ресурс]. URL: <https://gtmarket.ru/ratings/imd-world-competitiveness-ranking> (дата обращения 07.01.2022).
8. ГОСТ Р ИСО 9000 – 2008 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. URL: https://allgosts.ru/03/120/gost_r_iso_9000-2008 (дата обращения: 12.02.2021).
9. Маркс К.О. Капитал. Том 1.4.3. Купля и продажа рабочей силы. URL: http://libelli.ru/works/kapital/1_4_3.htm (дата обращения: 12.02.2022).
10. Клинова М., Сидорова Е. Человеческий капитал в Европейском союзе: государственный и наднациональный. URL: <https://mgimo.ru/upload/iblock/19f/19fe6395e5a15150f715f072dd07a1fa.pdf> (дата обращения: 12.02.2022).
11. Усков В.С. Тенденции становления и развития цифровой экономики в РФ // Стратегии бизнеса. 2020. Т. 8. № 11. С. 311–315.
12. Нифонтов О. Чем полезна и опасна тотальная цифровизация? Приживется ли в России японская концепция "Общество 5.0" // Газета «Экономика». URL: https://www.ng.ru/economics/2018-07-09/8_7261_technology.html (дата обращения: 12.02.2022).
13. Внедрение системы Industry 4.0. URL: <https://mtechrus.com/p-solution/industry-4.html> (дата обращения: 14.06.2022).
14. Четвертая промышленная революция [Электронный ресурс]. URL: <https://home.kpmg/kz/ru/home/insights/2018/12/The-fourth-industrial-revolution.html> (дата обращения: 14.02.2022).
15. Человеческий капитал в Европейском союзе: государственный и наднациональный контексты [Электронный ресурс]. URL: <https://mgimo.ru/upload/iblock/19f/19fe6395e5a15150f715f072dd07a1fa.pdf> (дата обращения 07.01.2022).
16. Что такое цифровая экономика? Тренды, компетенции, измерение [Электронный ресурс]. URL: <https://issek.hse.ru/news/261078389.html> (дата обращения 07.02.2022).
17. Подцероб М. Каким будет рынок труда в 2025 году [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vedomosti.ru/management/articles/2020/10/26/844639-rinok-truda> (дата обращения 07.02.2022).
18. Burykhin B. S., Zatepyakin O. A., Yasinskiy D. Y. Volatility accounting in management of labor quality in industrial enterprises. In: Web of Conferences European Proceedings of Social and Behavioural Scienc. Proceedings of the Trends and Innovations in Economic Studies, Science on Baikal Session (TIESS 2020). 2020. No. 90. P. 704–710.

REFERENCES

1. *Decree of the President of the Russian Federation dated 19.12.2012 N-1666 (ed. dated 06.12.2018) "On the Strategy of the State national policy of the Russian Federation for the period up to 2025"* [Electronic resource]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_139350/ (accessed: 12.02.2022). (In Russ.).
2. *Trends in the quality of the workforce as the basis of its competitiveness in the modern economy* [Electronic resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tendentsii-izmeneniya-kachestva-rabochey-sily-kak->

- osnovy-eyo-konkurentosposobnosti-v-sovremennoy-ekonomike/viewer (accessed: 07.01.2022). (In Russ.).
3. *The quality of the workforce as a factor in the growth of the social and labor potential of the Russian economy* [Electronic resource]. URL: <https://www.dissercat.com/content/kachestvo-rabochei-sily-kak-faktor-rosta-sotsialno-trudovogo-potentsiala-rossiiskoi-ekonomik> (accessed: 07.01.2022). (In Russ.).
 4. *World Economic Forum* [Electronic resource]. URL: <https://www.weforum.org/> (accessed: 12.02.2022). (In Russ.).
 5. *Competitiveness rating* [Electronic resource]. URL: <http://crimescience.ru/?p=25246> (accessed: 13.02.2022). (In Russ.).
 6. *Ranking of the countries of the world according to the global competitiveness index 2019* [Electronic resource]. URL: <https://gtmarket.ru/ratings/global-competitiveness-index> (accessed: 07.01.2022). (In Russ.).
 7. *Rating of the countries of the world according to the Global competitiveness index 2020* [Electronic resource]. URL: <https://gtmarket.ru/ratings/imd-world-competitiveness-ranking> (accessed: 07.01.2022). (In Russ.).
 8. *GOST R ISO 9000 – 2008 Quality management Systems. Basic provisions and dictionary*. URL: https://allgosts.ru/03/120/gost_r_iso_9000-2008 (accessed: 12.02.2021). (In Russ.).
 9. Marks K.O. Capital. Volume 1.4.3. *Purchase and sale of labor*. URL: http://libelli.ru/works/kapital/1_4_3.htm (accessed: 12.02.2022). (In Russ.).
 10. Klinova M., Sidorova E. *Human capital in the European Union: state and supranational*. URL: <https://mgimo.ru/upload/iblock/19f/19fe6395e5a15150f715f072dd07a1fa.pdf> (accessed: 12.02.2022). (In Russ.).
 11. Uskov V.S. Trends in the formation and development of the digital economy in the Russian Federation. *Strategii biznesa*. 2020, vol. 8, no. 11, pp. 311–315. (In Russ.).
 12. Nifontov O. *How is total digitalization useful and dangerous? Will the Japanese concept of "Society 5.0" take root in Russia // Newspaper "Economy*. URL: https://www.ng.ru/economics/2018-07-09/8_7261_technology.html (accessed: 12.02.2022). (In Russ.).
 13. *Implementation of the Industry 4.0 system*. URL: <https://mtechrus.com/p-solution/industry-4.html> (accessed: 14.06.2022). (In Russ.).
 14. *The Fourth Industrial Revolution*. URL: <https://home.kpmg/kz/ru/home/insights/2018/1/2/The-fourth-industrial-revolution.html> (accessed: 14.02.2022). (In Russ.).
 15. *Human capital in the European Union: State and supranational contexts*. URL: <https://mgimo.ru/upload/iblock/19f/19fe6395e5a15150f715f072dd07a1fa.pdf> (accessed: 07.01.2022). (In Russ.).
 16. *What is the digital economy? Trends, competencies, measurement*. URL: <https://issek.hse.ru/news/261078389.html> (accessed: 07.02.2022). (In Russ.).
 17. Podtserob M. *What will be the labor market in 2025*. URL: <https://www.vedomosti.ru/management/articles/2020/10/26/844639-rinok-truda> (accessed: 07.02.2022). (In Russ.).
 18. Burykhin B. S., Zatepyakin O. A., Yasinskiy D. Y. Volatility accounting in management of labor quality in industrial enterprises. In: *Web of Conferences European Proceedings of Social and Behavioural Scienc. Proceedings of the Trends and Innovations in Economic Studies, Science on Baikal Session (TIESS 2020)*. 2020, no. 90, pp. 704–710.

Сведения об авторах

Людмила Алексеевна Пьянкова, к.п.н., доцент кафедры социально-гуманитарных дисциплин, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: duby.ludmila@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-1486-5542

Олег Аркадьевич Затепакин, д.э.н., профессор кафедры менеджмента и отраслевой экономики, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: olegzatepyakin@yandex.ru

Information about the authors

Lyudmila A. Pyankova, Cand. Sci., Asist. Prof., Head of the Department of Social and Humanitarian Disciplines, Siberian State Industrial University
Email: duby.ludmila@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-1486-5542

Oleg A. Zatepyakin, Dr. Sci., Prof., Head of the Department of the Department of Management and Branch Economics, Siberian State Industrial University

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
 The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 26.10.2022
 После доработки 15.11.2022
 Принята к публикации 17.11.2022

Received 26.10.2022
 Revised 15.11.2022
 Accepted 17.11.2022

ГРОМОВУ ВИКТОРУ ЕВГЕНЬЕВИЧУ – 75 ЛЕТ

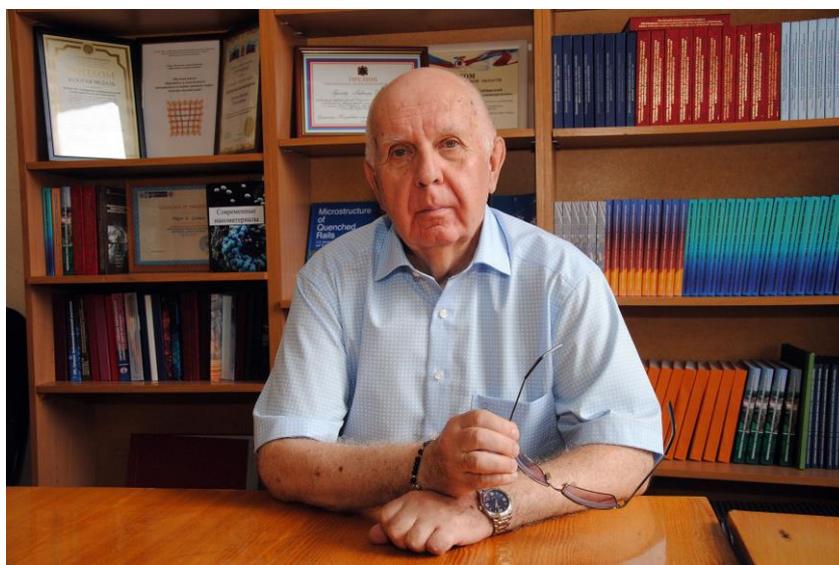
26 ноября 2022 года исполнилось 75 лет члену редакционной коллегии журнала Виктору Евгеньевичу Громову – известному в России и за рубежом металлофизику, Заслуженному деятелю науки РФ, Почетному металлургу РФ, члену Межгосударственного совета по физике прочности и пластичности материалов, члену Научного Совета РАН по физике конденсированных сред, доктору физико-математических наук, профессору, заведующему кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета. Виктор Евгеньевич Громов зарегистрирован в Федеральном реестре экспертов в научно-технической сфере Министерства науки и высшего образования и РАН, он – член редколлегий пяти журналов из списка ВАК.

Как высококвалифицированный специалист Виктор Евгеньевич по праву занимает ведущее место среди ученых России в области материаловедения, физики прочности и пластичности сталей и сплавов. На протяжении долгой научной деятельности его учителями и соратниками являлись и являются известные российские ученые-металлофизики и материаловеды В.Е. Панин, Л.Б. Зуев, Э.В. Козлов, А.М. Глезер, Ю.Ф. Иванов, М.Д. Старостенков.

Экспериментальные и теоретические исследования в области физики прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий (электрических полей и токов, плазменных и электронных пучков), выполненные за 45 лет В.Е. Громовым и его учениками, получили широкую известность и при-

знание в научных кругах и привели к созданию нового научного направления. Результаты исследований нашли применение как в академических, отраслевых и учебных институтах при изучении природы формоизменения металлов и сплавов, так и на ряде предприятий металлургической промышленности и машиностроения при разработке соответствующих электротехнологий. Они внедрены со значительным экономическим эффектом на предприятиях Кузбасса.

За цикл работ по внедрению безкислотной технологии удаления окалина при производстве проволоки из малоуглеродистых и низколегированных сталей на предприятиях металлургической отрасли В.Е. Громов удостоен премии Правительства РФ в области науки и техники. В 2013 г. он стал лауреатом премии РАН имени академика И.П. Бардина. В последние годы научная школа «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий», возглавляемая профессором В.Е. Громовым, плодотворно работает в области наноструктурного материаловедения по грантам РФФИ, РНФ и целевым программам Минобрнауки. За период работы в высшей школе Виктор Евгеньевич Громов проявил качества талантливого педагога и организатора высшего образования. В.Е. Громов – «Лучший профессор Кузбасса 2003», «Почетный профессор Кузбасса» 2015 г., один из ведущих профессоров университета. Пользуется заслуженным уважением студентов и коллег. Его лекции отличает сочетание высокого теоретического уровня с ясной формой изложения.



В.Е. Громов является соавтором трех научных открытий, зарегистрированных Международной академией авторов изобретений и открытий и Российской академией естественных наук. Его наукометрические показатели: индекс Хирша по РИНЦ – 37, Scopus – 20, Web of Science – 19. В 2020 году по оценкам издательства Elsevier, владельцем базы Scopus, он вошел в число 2 % самых цитируемых ученых мира.

Виктор Евгеньевич воспитал плеяду талантливых научных сотрудников – 11 докторов и свыше 40 кандидатов наук, плодотворно работающих в высшей школе, на производстве, в бизнесе. Он автор более 3900 научных публикаций, в том числе 35 патентов и свыше 100 монографий, восемь из которых опубликованы в издательстве Cambridge International Science Publi-

cation Ltd, Materials Research Forum, Springer, Taylor and Francis на английском языке.

В.Е. Громов – действительный член Международной академии энерго-информационных наук и Российской академии естественных наук. Его заслуги отмечены медалями «За служение Кузбассу», «За особый вклад в развитие Кузбасса» I, II и III степени, орденом Почета Кузбасса и другими наградами и грамотами администрации Кемеровской области.

Семидесятипятилетний юбилей Виктор Евгеньевич встречает в расцвете творческих сил.

Редакционная коллегия журнала, ученики и друзья сердечно поздравляют Виктора Евгеньевича с юбилеем и желают ему доброго здоровья, счастья и новых научных свершений.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В журнале «Вестник Сибирского государственного индустриального университета» публикуются оригинальные, ранее не публиковавшиеся статьи, содержащие наиболее существенные результаты научно-технических экспериментальных исследований, а также итоги работ проблемного характера по следующим направлениям:

- физика конденсированного состояния;
- информационные технологии;
- металлургия и материаловедение;
- региональная и отраслевая экономика.

К рукописи следует приложить рекомендацию соответствующей кафедры высшего учебного заведения, экспертное заключение, разрешение ректора или проректора высшего учебного заведения (для неучебного предприятия – руководителя или его заместителя) на опубликование результатов работ, выполненных в данном вузе (предприятии).

В редакцию следует направлять материалы статьи в электронном виде и два экземпляра текста статьи на бумажном носителе. Для ускорения процесса рецензирования статей электронный вариант статьи и скан-копии сопроводительных документов рекомендуется направлять по электронной почте по адресу e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru.

Таблицы, библиографический список и подрисуночный текст следует представлять на отдельных страницах. В рукописи необходимо сделать ссылки на таблицы, рисунки и литературные источники, приведенные в статье.

Иллюстрации нужно представлять отдельно от текста на носителе информации. Пояснительные надписи в иллюстрациях должны быть выполнены шрифтом Times New Roman Italic (греческие буквы – шрифтом Symbol Regular) размером 9. Тоновые изображения, размер которых не должен превышать 75x75 мм (фотографии и другие изображения, содержащие оттенки черного цвета), следует направлять в виде растровых графических файлов (форматов *.bmp, *.jpg, *.gif, *.tif) в цветовой шкале «оттенки серого» с разрешением не менее 300 dpi (точек на дюйм). Штриховые рисунки (графики, блок-схемы и т.д.) следует представлять в «черно-белой» шкале с разрешением не менее 600 dpi. На графиках не нужно наносить линии сетки, а экспериментальные или расчетные точки (маркеры) без крайней необходимости не «заливать» черным. Штриховые рисунки, созданные при помощи пространственных программ MS Excel, MS Visio и др., следует представлять в формате исходного приложения (*.xls, *.vsd и др.).

Шрифтовое оформление физических величин: латинские буквы в светлом курсивном начертании, русские и греческие – в светлом прямом. Числа и единицы измерения – в светлом прямом начертании. Особое внимание следует обратить на правильное изображение индексов и показателей степеней. Формулы набираются с помощью редакторов формул Equatn или Math Type, масштаб формул должен быть 100 %. Масштаб устанавливается в диалоговом окне «Формат объекта». В редакторе

формул для латинских и греческих букв использовать стиль «Математический» («Math»), для русских – стиль «Текст» («Text»). Размер задается стилем «Обычный» («Full»), для степеней и индексов – «Крупный индекс / Мелкий индекс» («Subscript / Sub-Subscript»). Недопустимо использовать стиль «Другой» («Other»).

Необходимо избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, графиках и тексте статьи. Объем статьи не должен превышать 18 – 20 страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала.

Рукопись должна быть тщательно выверена, подписана автором (при наличии нескольких авторов, число которых не должно превышать пяти, – всеми авторами); в конце рукописи указывают полное название высшего учебного заведения (предприятия) и кафедры, дату отправки рукописи, а также полные сведения о каждом авторе (Ф.И.О., место работы, должность, ученая степень, звание, служебный и домашний адреса с почтовыми индексами, телефон и e-mail). Необходимо указать, с кем вести переписку.

Цитируемую в статье литературу следует давать общим списком в порядке упоминания в статье с обозначением ссылки в тексте порядковой цифрой. Перечень литературных источников рекомендуется не менее 20.

Библиографический список оформляют в соответствии с ГОСТ 7.0.100 – 2018: а) для книг – фамилии и инициалы авторов, полное название книги, номер тома, место издания, издательство и год издания, общее количество страниц; б) для журнальных статей – фамилии и инициалы авторов, полное название журнала, название статьи, год издания, номер тома, номер выпуска, страницы, занятые статьей; в) для статей из сборников – фамилии и инициалы авторов, название сборника, название статьи, место издания, издательство, год издания, кому принадлежит, номер или выпуск, страницы, занятые статьей.

Иностранные фамилии и термины следует давать в тексте в русской транскрипции, в библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводят в оригинальной транскрипции.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

К статье должны быть приложены аннотация объемом 200 – 250 слов, ключевые слова.

В конце статьи необходимо привести на английском языке: название статьи, Ф.И.О. авторов, место их работы, аннотацию и ключевые слова.

Краткие сообщения должны иметь самостоятельное научное значение и характеризоваться новизной и оригинальностью. Они предназначены для публикации в основном аспирантских работ. Объем кратких сообщений не должен превышать двух страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала, включая таблицы и библиографический список. Под заголовком в скобках следу-

ет указать, что это краткое сообщение. Допускается включение в краткое сообщение одного несложного рисунка, в этом случае текст должен быть уменьшен. Приводить в одном сообщении одновременно таблицу и рисунок не рекомендуется.

Количество авторов в кратком сообщении должно быть не более трех. Требования к оформлению рукописей и необходимой документации те же, что к оформлению статей.

Корректуры статей авторам, как правило, не посылают.

В случае возвращения статьи автору для исправления (или при сокращении) датой представления считается день получения окончательного текста.

Статьи, поступающие в редакцию, проходят гласную рецензию.

Статьи журнала индексируются в РИНЦ, представлены на сайтах <https://vestnik.sibsiu.ru/> и <https://www.sibsiu.ru> в разделе Наука и инновации (Периодические научные издания (Журнал «Вестник СибГИУ»)).

Над номером работали

Коновалов С.В., главный редактор

Запольская Е.М., ответственный секретарь

Бащенко Л.П., ведущий редактор

Темлянцева Е.Н., верстка

Олендаренко Е.В., менеджер по работе с клиентами

Безродная Е.А., администратор сайта