

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ВЕСТНИК

СИБИРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ИНДУСТРИАЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА

ПЕРВЫЙ ВУЗ КУЗБАССА

*РАЗВИВАЕМСЯ В НАСТОЯЩЕМ
ГОРДИМСЯ ПРОШЛЫМ
СОЗДАЕМ БУДУЩЕЕ*

16+

№ 2, 2022

Научный журнал

ВЕСТНИК

Сибирского
государственного
индустриального
университета

№ 2 (40), 2022

Основан в 2012 году
Выходит 4 раза в год

Учредитель:

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

Редакционная коллегия

С.В. Коновалов
(главный редактор)
Е.М. Запольская
(отв. секретарь)

Арвинд Сингх
А.С. Водолеев
В.Ф. Горюшкин
В.И. Данилов
А.В. Зимин
Н.А. Козырев
С.М. Кулаков
А.Г. Никитин
И.В. Ноздрин
Е.Г. Оршанская
Т.Н. Осколкова
В.И. Пантелеев
Т.В. Петрова
С.В. Риб
И.А. Рыбенко
М.В. Темлянцев
Ю.С. Серенков
Си Чжан Чен
А.Ю. Столбоушкин
И.А. Султангузин
Л.А. Тресвятский
В.Н. Фрянов
А.Н. Шиплюк
Н.Х. Юлдашев
А.Б. Юрьев

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Гостевская А.Н., Маркидонов А.В.** Молекулярно-динамическое моделирование структурных изменений в ОЦК-кристалле на наноуровне при лазерной абляции.....3
- Шляров В.В., Загуляев Д.В., Аксенова К.В.** Изменение механических характеристик технически чистого алюминия в условиях воздействия магнитного поля.....10
- Осетковский И.В., Козырев Н.А., Будовских Е.А., Михно А.Р., Бащенко Л.П.** Особенности структуры и свойств наплавленных новой порошковой проволокой электродуговых покрытий системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V17
- Никитин А.Г., Пилюкшин Е.О.** Сравнительный анализ конструкций моталок прокатных станов.....23
- Сарычев В.Д.** Разработка теоретических основ формирования микро- и наноразмерных гидродинамических неустойчивостей для создания принципиально новых технологий.....29
- Райков С.В., Шлярова Ю.А.** Практика восстановления зубчатых передач сварочными методами.....39
- Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Шлярова Ю.А., Кондратова О.А., Кириллова А.В.** Структурно-фазовые состояния и свойства высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi после электронно-пучковой обработки.....47

ГОРНОЕ ДЕЛО И ГЕОТЕХНОЛОГИИ

- Риб С.В., Фрянов В.Н., Никитина А.М., Борзых Д.М.** Состояние и перспективы развития подземной геотехнологии на угольных шахтах Кузбасса.....57

АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

- Магель В.И., Осипов Ю.К., Матехина О.В.** С жилища начинается архитектура, с жилища начинается город.....64

**ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ
ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ**

Стерлигов В.В., Дробышев В.К. Оценка теплофизических параметров парникового эффекта.....71

К сведению авторов.....77

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.sibsiu.ru
e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.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@sibsiu.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

30.06.2022 г.

Выход в свет

30.06.2022 г.

Формат бумаги 60×88 1/8.

Бумага писчая.

Печать офсетная.

Усл.печ.л. 4,3.

Уч.-изд.л. 4,6.

Тираж 300 экз.

Заказ № 185.

Цена свободная.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ОЦК-КРИСТАЛЛЕ НА НАНОУРОВНЕ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

А. Н. Гостевская¹, А. В. Маркидонов²

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

²Кузбасский гуманитарно-педагогический институт Кемеровского государственного университета (654041, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Циолковского, 23)

Аннотация. При высокотемпературном воздействии происходит изменение структуры металлов и их сплавов. Исследованы влияния высоких температур на изменение строения структуры твердого тела имеет ряд недостатков (изменение свойств и строения материалов). Изучено строение металлов на наномасштабе с применением реальных экспериментов затруднительно из-за размеров частиц. Методами компьютерного моделирования изучено воздействие высоких температур на атомные механизмы изменения ОЦК-кристалла. Проведение исследования методом компьютерного моделирования является наиболее рациональным. Проведено атомистическое моделирование абляции структуры, происходящей при облучении материалов фемто- и пикосекундными лазерными импульсами. Для исследования был выбран метод молекулярной динамики. Изучено влияние процесса лазерной абляции на изменение внутреннего строения материалов при помощи компьютерного моделирования (метод молекулярной динамики). Построена модель молекулярной динамики, позволяющая изучить процесс абляции. Оценена доля «выброшенных» частиц в результате нагрева. Определено, что в процессе нагрева и охлаждения системы распределение таких частиц близко к распределению Гаусса.

Ключевые слова: молекулярно-динамическое моделирование, модель, ОЦК-кристалл, температура, поверхность

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания № 0809-2021-0013.

Для цитирования: Гостевская А.Н., Маркидонов А.В. Молекулярно-динамическое моделирование структурных изменений в ОЦК-кристалле на наномасштабе при лазерной абляции // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 2 (40). С. 3 – 9.

MOLECULAR DYNAMIC MODELING STRUCTURAL CHANGES IN THE BCC CRYSTAL AT THE NANOSCALE DURING LASER ABLATION

A. N. Gostevskaya¹, A. V. Markidonov²

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

²Kuzbass Humanitarian Pedagogical Institute of Kemerovo State University (654041, Russia, Kemerovo region – Kuzbass, Novokuznetsk, Tsiolkovsky str., 23)

Abstract. When exposed to high temperature, the structure of metals and their alloys changes. The study of the effect of high temperatures on changes in the structure of the structure of a solid has a number of disadvantages (changes in the properties and structure of materials). The study of the structure of metals at the nanoscale using real experiments is difficult because of the particle sizes. The use of computer modeling methods to study and study the effects of high temperatures on the atomic mechanisms of BCC crystal changes allows us to investigate problems that are difficult to solve experimentally. Conducting research by computer modeling is the most rational. Atomistic modeling of structure ablations occurring during

irradiation of materials by femto- and picosecond laser pulses has been carried out. The method of molecular dynamics was chosen as the research method. Using a computer model, the influence of the laser ablation process on the change in the internal structure of materials was studied using computer modeling (molecular dynamics method). A model of molecular dynamics is constructed, which allows to study the process of ablation. The proportion of ejected particles as a result of heating is estimated. It is determined that during the heating and cooling of the system, the distribution of such particles is close to normal.

Keywords: molecular dynamic modeling, model, BCC crystal, temperature, surface

Financing. The work was carried out within the framework of the state task No. 0809-2021-0013.

For citation: Gostevskaya A.N., Markidonov A.V. Molecular dynamic modeling of structural changes in a BCC crystal at the nanoscale with laser ablation. *Bulletin of SibSIU*. 2022, no. 2 (40), pp. 3 – 9. (In Russ.).

Введение

Лазерная абляция имеет много потенциальных технических применений в микрообработке и создании поверхностных наноструктур [1 – 3]. Механизм лазерной абляции металлов остается неясным. На это указывают противоречивость экспериментальных данных. Отсутствует согласованность между экспериментальными и теоретическими данными.

В результате воздействия на металл ультракороткими сверхмощными лазерными импульсами создаются уникальные физические условия (высокая скорость нагрева материала, выделение энергии лазерного излучения). Конденсированная среда нагревается до температур, которые превышают равновесное значение, как температуры плавления, так и температуры испарения. Длительность воздействия лазерных импульсов (пикосекундных) сопоставима со временем термических разделений химических соединений и фазовыми превращениями в материале. При этом тепловое воздействие вне зоны обработки минимально. Процессы неравновесного нагрева вещества при лазерном воздействии представляют практический интерес и служат объектом различных экспериментальных и теоретических исследований [4 – 6].

Облучение материала высокомоощными лазерными импульсами может приводить к отрыву вещества от поверхности (абляции), что находит свое применение в различных областях. Явление лазерной абляции успешно изучается с помощью метода молекулярной динамики [7 – 9], который предполагает целый ряд допущений. Например, в рамках классической молекулярной динамики необходимо рассматривать временные интервалы, соответствующие характеристическому времени электронно-фононной релаксации.

В настоящей работе изучали структурные изменения, происходящие в материале при вы-

сокотемпературном воздействии в рамках молекулярно-динамического моделирования.

Методы и принципы исследования

Расчетная ячейка имела вид прямоугольного параллелепипеда размером $(15 \times 100 \times 10) a_0$ (a_0 – равновесный параметр решетки). Общее число моделируемых частиц 30 000. Вдоль осей X и Z применяли периодические граничные условия, а вдоль оси Y – свободные, имитирующие поверхность кристалла. Ячейку разбивали на десять слоев вдоль оси Y , в каждом из которых задавалось определенное значение температуры, убывающее по мере удаления от поверхности. При установлении теплового равновесия между электронами и фононами для описания распространения тепла можно применять модель теплопроводности. При использовании модели полубесконечного твердого тела аналитически точное решение тепловой задачи можно получить путем интегральных преобразований [10]. Для выполнения расчетов использовали пакет XMD. Визуализацию результатов моделирования осуществляли при помощи программ RasMol. 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 при $t < \tau$:

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

где y – координата; A – поглощательная способность; q – плотность энергии; λ – теплопроводность; a – коэффициент температуропроводности; τ – длительность воздействия.

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

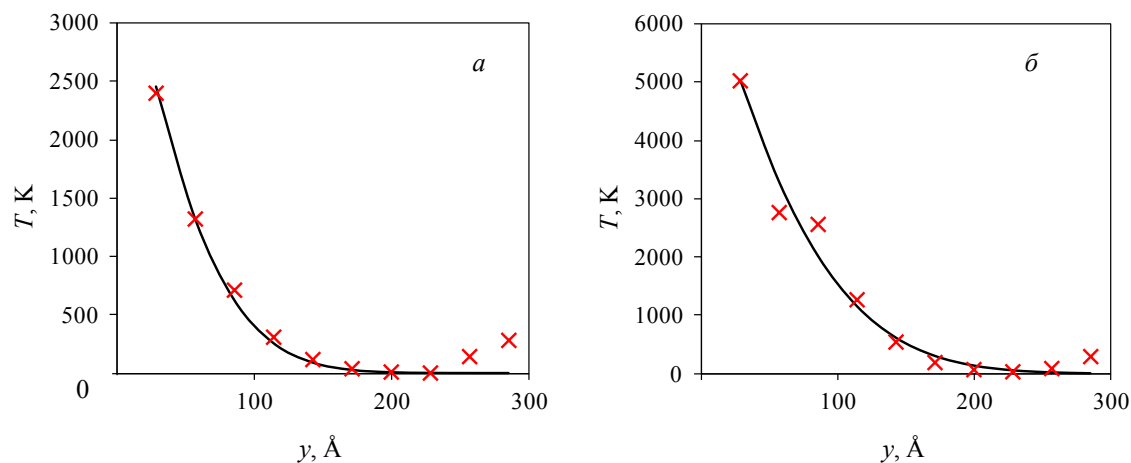


Рис. 1. Расчетное изменение температуры по мере удаления от поверхности кристалла (сплошная линия) и средние значения температуры выделенных слоев расчетной ячейки (×) через 1 пс (а) и 12 пс (б) модельного времени ($q = 5 \text{ МВт/см}^2$)
 Fig. 1. The calculated temperature change as it moves away from the crystal surface (solid line) and the averaged temperature values of the selected layers of the calculated cell (×) after 1 (a) and 12 (б) ps of the model time ($q = 5 \text{ MW/cm}^2$)

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

После окончания лазерного воздействия ($t > \tau$) наступает стадия охлаждения. Распределение температуры определяется по следующему уравнению:

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

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

Неравномерный нагрев моделируемого образца может привести к формированию вблизи поверхности области сжатия, распространяющейся вглубь в виде волны давления, при достижении ею противоположной границы при использовании свободных граничных условий может способствовать эжектированию частиц. Чтобы избежать это, в наиболее удаленном от моделируемой поверхности слое, используя процедуру термостатирования, поддерживали постоянную температуру (300 К), а также накладывали вязкие граничные условия.

Основные результаты

На рис. 1 представлены теоретические кривые распределения температуры по образцу вдоль оси Y , полученные по уравнениям (1), (2), средние значения температуры выделенных слоев расчетной ячейки.

Температура наиболее удаленных от поверхности слоев не соответствует расчетным значениям. Это обусловлено использованием процедуры термостатирования.

Длительность нагрева расчетной ячейки составляет 10 пс, после чего температура начинает понижаться. На рис. 2 представлено изменение средней температуры расчетной ячейки в процессе моделирования.

После того как локальная температура расчетной ячейки начинает превышать температуру плавления, происходит фазовый переход, сопровождающийся распространением по ячейке границы жидкой фазы. Дальнейшее повышение температуры приводит к отрыву частиц и удалению их из основной системы. Пороговая температура поверхностного слоя, при которой происходит отрыв частиц, составляет примерно 4200 К. Изменение структуры расчетной ячейки представлено на рис. 3.

На рис. 4 представлено распределение частиц вблизи поверхности моделируемого образца в различные моменты времени. Частицы, которые располагались за пределами начальных границ расчетной ячейки, считали пребывающими в газообразном состоянии. В момент времени 5 пс доля таких частиц составляет 3,31 %, а к моменту окончания нагрева – 4,91 %. На стадии охлаждения доля частиц, находящихся за пределами начальных границ расчетной ячейки, убывает не значительно, но в рассматриваемом случае они образуют агломерации вблизи поверхности.

Увеличение плотности энергии (в рамках построенной модели равносильно увеличению температуры расчетной ячейки) приводит к отрыву от поверхности большого числа частиц по сравнению с предыдущим экспериментом (рис. 5).

На рис. 6 изображено распределения плотности частиц приповерхностных слоев. При $q = 6,5 \text{ МВт/см}^2$

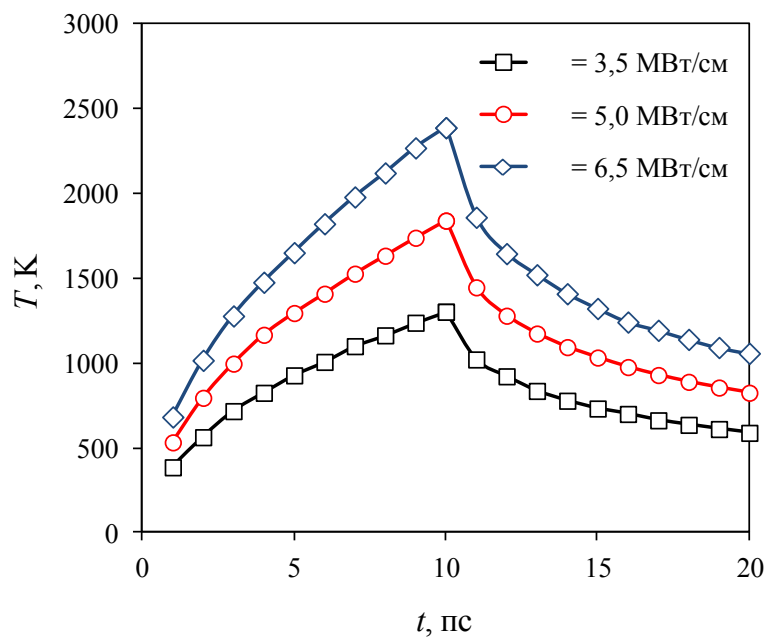


Рис. 2. Изменение средней температуры расчетной ячейки в течение моделирования при плотности энергии лазерного излучения 3,5 (□), 5,0 (○) и 6,5 (◇) МВт/см²

Fig. 2. Change in the average temperature of the calculation cell during the simulation at the energy density of laser radiation 3,5 (□), 5,0 (○) и 6,5 (◇) MW/cm²

структура имеет более неравномерное строение по сравнению с другими рассмотренными значениями q . В рассматриваемом случае доля частиц, пребывающих в газообразном состоянии, составляет 5,68 %. На рис. 7 представлено изменение доли таких частиц в процессе моделирования.

Кривые имеют характерный для кривой Гаусса «колоколообразный» вид. Для величины $q = 3,5$ МВт/см² сравнение численных значений асимметрии ($A \approx 0,91$) и эксцесса ($E \approx -0,55$) со значениями их дисперсий позволяет приближенно считать распределение нормальным.

Выводы

В ходе проведенного исследования была построена молекулярно-динамическая модель, позволяющая исследовать процесс абляции, происходящей под воздействием ультракоротких лазерных импульсов низкой пиковой плотности излучения, а также выполнена оценка доли эжектированных частиц в результате нагрева расчетной ячейки. Установлено, что распределение изменения таких частиц в процессе нагрева и охлаждения системы близко к нормальному. Выполнена оценка пороговой температуры эжектирования частиц.

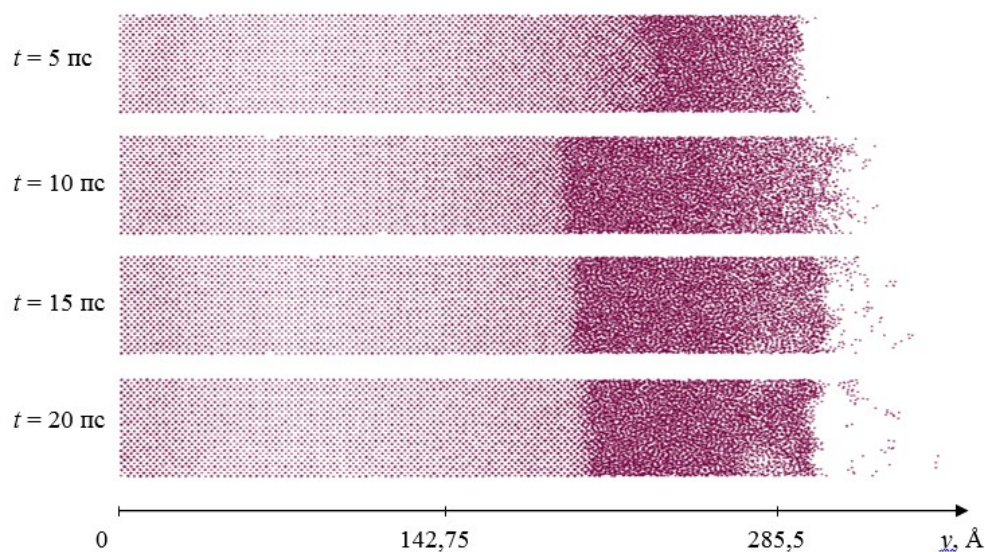


Рис. 3. Визуализация расчетной ячейки в различные моменты времени моделирования ($q = 5$ МВт/см²)

Fig. 3. Visualization of the calculation cell at various points in the simulation time ($q = 5$ MW/cm²)

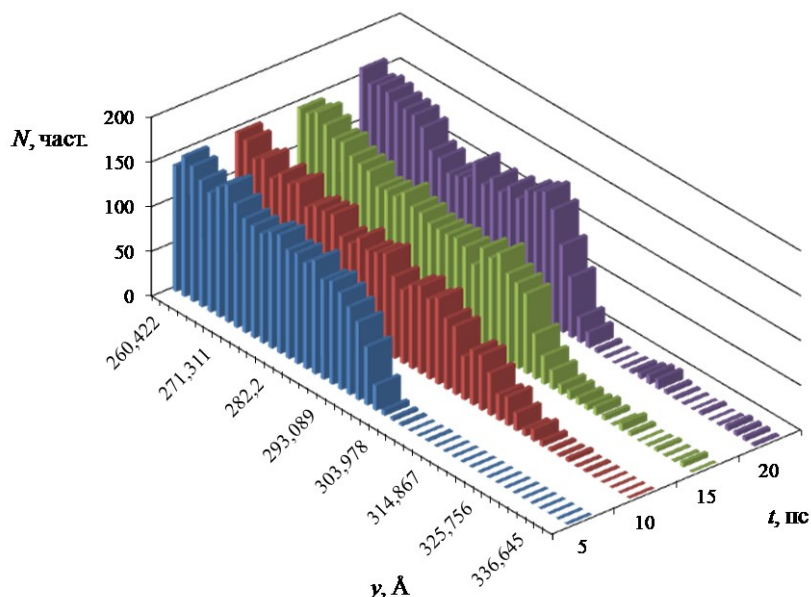


Рис. 4. Распределение частиц вблизи поверхности моделируемой системы в различные моменты времени ($q = 5 \text{ МВт/см}^2$)
 Fig. 4. Particle distribution near the surface of the simulated system at different time points ($q = 5 \text{ MW/cm}^2$)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gamaly E.G. Femtosecond Laser-Matter Interaction: Theory, Experiments and Applications. New York: Jenny Stanford Publishing, 2011. 350 p.
2. Faenov Ya., Kato Y., Tanaka M., Pikuz T.A. Submicrometer-resolution in situ imaging of the focus pattern of a soft x-ray laser by color center formation in LiF crystal // Optics Letters. 2009. Vol. 34. P. 941–943.
3. Гостевская А.Н., Маркионов А.В. Исследование методом молекулярно-динамического моделирования процесса лазерной абляции. В кн.: Материалы XIII школы-конференции молодых ученых “Кому-2021”, Ижевск, 18 – 22 октября 2021 года. Ижевск: изд. Удмуртского федерального исследовательского центра Уральского от-
4. Завьялова М.А. Поверхностная модификация кварцевого стекла импульсами пикосекундного лазера // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 6. С. 863–870.
5. Мажукин В.И., Демин М.М., Шапранов А.В. Эффекты неравновесности при воздействии импульсного лазерного излучения на металлы // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 8. С. 29–37.
6. 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.

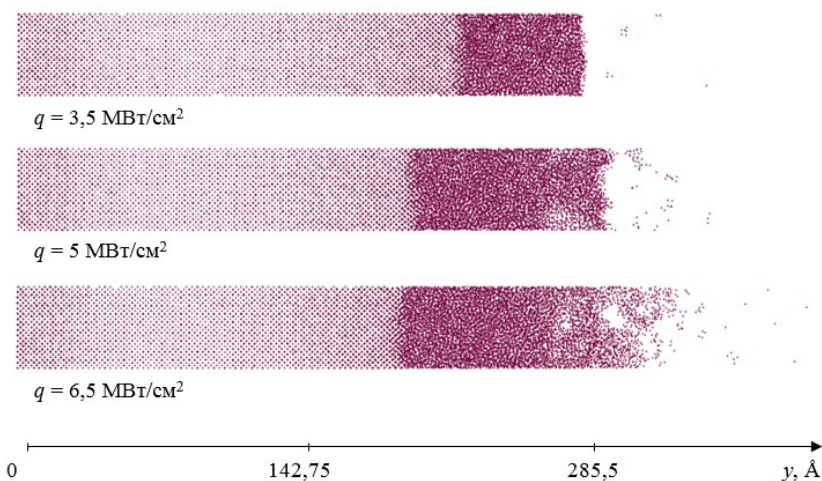


Рис. 5. Визуализация расчетной ячейки в момент времени $t = 20 \text{ пс}$ при различной плотности энергии лазерного излучения
 Fig. 5. Visualization of the calculation cell at time $t = 20 \text{ ps}$ at different energy densities of laser radiation

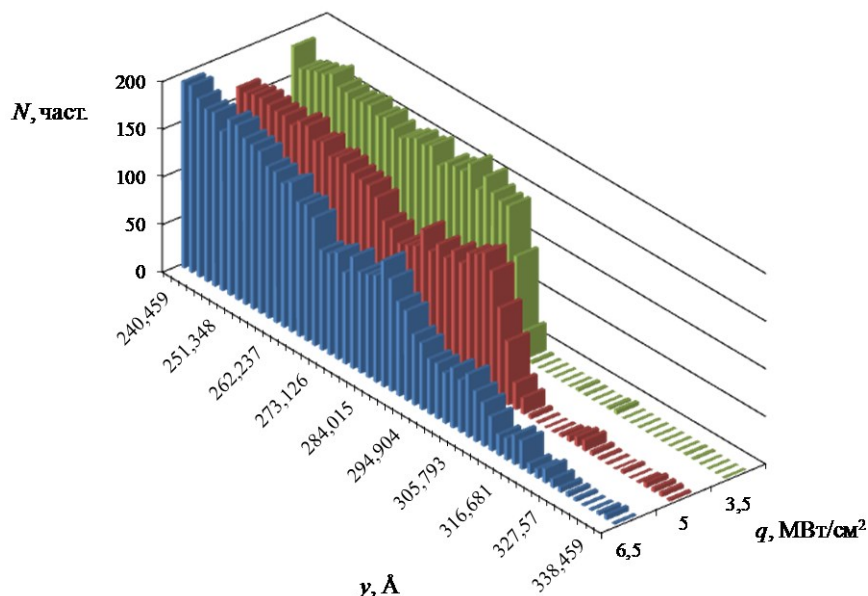


Рис. 6. Распределение частиц вблизи поверхности моделируемой системы в момент времени $t = 20$ пс при различной плотности энергии лазерного излучения
 Fig. 6. Distribution of particles near the surface of the simulated system at time $t = 20$ ps at different energy densities of laser radiation

7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Рыкалкин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.

REFERENCES

1. Gamaly E.G. *Femtosecond Laser-Matter Interaction: Theory, Experiments and Applications*. New York: Jenny Stanford Publishing, 2011, 350 p.
2. Faenov Ya., Kato Y., Tanaka M., Pikuz T.A. Submicrometer-resolution in situ imaging of the focus pattern of a soft x-ray laser by color center formation in LiF crystal. *Optics Letters*. 2009, vol. 34, pp. 941–943.
3. Gostevskaya A.N., Markidonov A.V. Investigation by the method of molecular dynamic modeling of the laser ablation process. In: *Proceedings of the XIII school-conference of young scientists "To Whom-2021"*, Izhevsk, October 18–22, 2021. Izhevsk: izd. Ud-

4. murtskogo federal'nogo issledovatel'skogo tsentra Ural'skogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk, 2021, pp. 131, 132. (In Russ.).
5. Zav'yalova M.A. Surface modification of quartz glass by picosecond laser pulses. *Komp'yuternaya optika*. 2016, vol. 40, no. 6, pp. 863–870. (In Russ.).
6. Mazhukin V.I., Demin M.M., Shapranov A.V. Effects of nonequilibrium under the influence of pulsed laser radiation on metals. *Opticheskii zhurnal*. 2011, vol. 78, no. 8, pp. 29–37. (In Russ.).

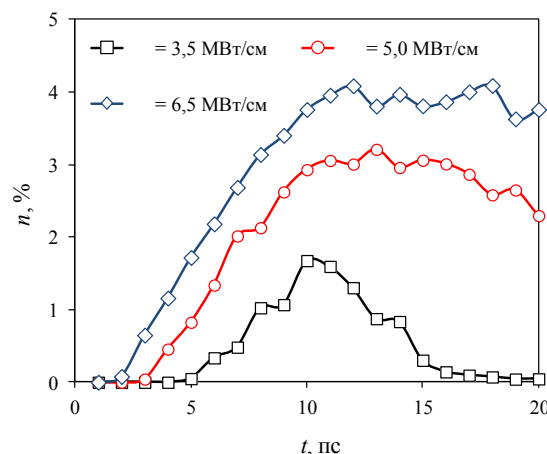


Рис. 7. Изменение доли частиц, располагающихся за пределами первоначальной границы расчетной ячейки в течение моделирования, при плотности энергии лазерного излучения 3,5 (□), 5,0 (○) и 6,5 (◇) МВт/см²
 Fig. 7. The change in the fraction of particles located outside the initial boundary of the computational cell during the simulation at a laser radiation energy density of 3,5 (□), 5,0 (○) and 6,5 (◇) MW/cm²

6. Yavtushenko T.O., Kadochnikov A.S., Novikov S.G., Berintsev A.V., Stolyarov D.A. Experimental study of the process of structuring the 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.).
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Rykalkin N.N., Uglov A.A., Zuev I.V., Kokora A.N. *Laser and electron beam processing of materials*. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 496 p. (In Russ.).

Сведения об авторах

Анастасия Николаевна Гостевская, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: gostevskaya_an@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7328-5444

Артём Владимирович Маркидонов, д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой ИВТ им. Буторина, Кузбасский гуманитарно-педагогический институт Кемеровского государственного университета

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. Finkel, Siberian State Industrial University

E-mail: gostevskaya_an@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7328-5444

Artem V. Markidonov, Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of IVT im. Butorina, Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute of Kemerovo State University

E-mail: markidonov_artem@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4566-528X

© 2022 г. А.Н. Гостевская, А.В. Маркидонов
Поступила в редакцию 1 февраля 2022 г.

УДК 669.2/.8.018.58

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В. В. Шляров, Д. В. Загуляев, К. В. Аксенова

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

Аннотация. Улучшение физических параметров и специальных свойств поверхностей материалов приобретает все большее значение в связи с многоплановыми научно-исследовательскими проблемами, связанными с внедрением высоких технологий в производственные процессы. Для анализа ресурса работы конструкций, механизмов, работающих в условиях механических нагрузок, необходимо изучение поведения металлов в условиях внешних энергетических воздействий. Изучено влияние слабых (до 0,5 Тл) магнитных полей на деформационные характеристики алюминия для возможности пластификации материала. Воздействие постоянными магнитными полями приводит к обратимому снижению микротвердости алюминия. Определено пороговое значение индукции постоянного магнитного поля ($B = 0,1$ Тл), выше которого возможен эффект влияния постоянного магнитного поля на микротвердость алюминия. Дальнейшее повышение индукции магнитного поля приводит к линейному возрастанию эффекта. При исследовании скорости ползучести технически чистого алюминия была выявлена зависимость скорости ползучести алюминия (на установившейся и ускоренной стадиях) от величины индукции магнитного поля. Наложение магнитного поля значительно изменяет скорость ползучести алюминия. Воздействие индукции магнитного поля приводит к существенному снижению скорости ползучести по сравнению с образцом, разрушенным без воздействия магнитного поля. На установившейся и логарифмической стадиях скорость ползучести уменьшается независимо от индукции магнитного поля. Установлено, что эффект влияния магнитного поля не однозначен: происходит как возрастание скорости ползучести с достижением максимального значения ($B = 0,1$ Тл), так и ее замедление с достижением минимального ($B = 0,5$ Тл). Была выявлена зависимость относительного изменения скорости ползучести алюминия от индукции магнитного поля.

Ключевые слова: технически чистый алюминий, ползучесть, микротвердость, парамагнетик, магнитное поле, индукция

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-00118).

Для цитирования: Шляров В.В., Загуляев Д.В., Аксенова К.В. Изменение механических характеристик технически чистого алюминия в условиях воздействия магнитного поля // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 2 (40). С. 10 – 16.

CHANGES IN THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF COMMERCIALY PURE ALUMINUM UNDER THE CONDITIONS OF MAGNETIC FIELD INFLUENCES

V. V. Shlyarov, D. V. Zagulyaev, K. V. Aksenova

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

Abstract. At present, the improvement of the physical parameters and special properties of the surfaces of materials is becoming increasingly important due to the multifaceted research problems associated with the introduction of high technologies into production processes. Since most structures and mechanisms operate under mechanical loads that lead to destruction, to analyze their service life, it is necessary to study the behavior of metals under external energy influences. In the work, the influence of weak magnetic fields up to 0.5 T on the deformation characteristics of aluminum for the possibility of plasticizing the material was

studied. It has been established that exposure to constant magnetic fields leads to a reversible decrease in the microhardness of aluminum. The threshold value of the induction of a constant magnetic field ($B = 0.1$ T) was determined, above which it is possible to observe the effect of the influence of a constant magnetic field on the microhardness of aluminum. A further increase in the magnetic field leads to a linear increase in the effect. In the study of the creep rate of commercially pure aluminum, the dependence of the creep rate of aluminum, at the steady and accelerated stages, on the magnitude of the magnetic field induction was revealed. It has been investigated that the application of a magnetic field significantly changes the creep rate of aluminum. The effect of the induction of the magnetic field leads to a significant decrease in the creep rate compared to the sample that was destroyed without the action of the magnetic field. At the steady and logarithmic stages, the creep rate decreases regardless of the magnetic field induction. It was also found that the effect of the influence of the magnetic field is not unambiguous: there is both an increase in the creep rate, reaching a maximum value at $B = 0.1$ T, and its slowing down, reaching a minimum at $B = 0.5$ T. Thus, the dependence of the relative change in the creep rate of aluminum on the value of the magnetic field induction was revealed.

Keywords: commercially pure aluminum, creep, microhardness, paramagnet, magnetic field, induction

Funding: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Project No. 21-79-00118).

For citation: Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V., Aksenova K.V. Changes in the mechanical characteristics of commercially pure aluminum under the conditions of magnetic field influences. *Bulletin of SibSIU*. 2022, no. 2 (40), pp. 10 – 16. (In Russ.).

Введение

Экономические и экологические требования, предъявляемые к промышленным предприятиям, требуют разработки и использования «легких» материалов, обеспечивающих высокую эффективность использования топлива и низкий коэффициент выбросов в окружающую атмосферу. Спрос на «легкие» металлы и сплавы (алюминий) в различных отраслях промышленности постоянно увеличивается [1, 2]. Алюминий активно применяется в автомобильной и аэрокосмической промышленности, в электротехнике, благодаря его хорошей стойкости к деформации ползучести, термической стабильности и отличной электропроводности [3 – 5]. Но, как и любой материал, алюминий и сплавы на его основе имеют ряд недостатков (слабое сопротивление ползучести). Разрушение при ползучести является неизбежной проблемой для электропроводных устройств при длительной эксплуатации, оказывая значительное влияние на применение алюминиевых сплавов.

Обычно выделяют три вида ползучести в зависимости от температуры: 1 – низкотемпературная ползучесть ($T < 0,3T_{пл}$); 2 – промежуточная ползучесть ($0,3T_{пл} < T < 0,6T_{пл}$); 3 – высокотемпературная ползучесть ($T > 0,6T_{пл}$) ($T_{пл}$ – температура плавления сплавов) [6, 7]. Основное внимание исследователей приковано к изучению ползучести при высокой температуре. В работе [8] сообщается о ползучести чистого алюминия с добавлением 0,026 % Fe при температуре от 200 до 500 °С. Некоторые исследователи сосредоточили свое внимание на ползучести при промежуточной температуре [9, 10].

Существует несколько путей увеличения эксплуатационных характеристик алюминиевых сплавов, одним из которых является воздействие внешними потоками энергии. В последние десятилетия приоритетное развитие получили такие новые высокоэффективные методы обработки, как лазерное облучение, электронно-пучковая обработка, ионно-плазменное воздействие, обработка электрическими и магнитными полями [11 – 13]. Использование таких методов энергетического воздействия приводит к многократному повышению эксплуатационных свойств (твердости, износостойкости, жаростойкости и др.). В связи со сложностью физических процессов, происходящих в металлах и сплавах при рассматриваемых условиях, возможности этих методов продолжают изучаться. Это обуславливает актуальность проведения новых исследований и их практического применения для повышения функциональных свойств в том или ином конкретном случае.

Поскольку алюминий широко применяют в электротехнике, то целесообразно исследовать влияние электрических и магнитных полей, которые образуются при протекании тока в проводнике, на механические свойства материала. В настоящее время на кафедре естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета (СибГИУ) проведен комплекс исследований и установлено, что незначительное изменение поверхностной энергии материала путем подведения электрического потенциала приводит к существенным изменениям деформационных характеристик и дислокационной субструктуры [14 – 16]. Исследования показали,

что обработка короткими мощными импульсами электрического тока, которая, оказывая влияние на дефектную субструктуру, может изменять распределение внутренних напряжений, фазовый состав, зеренную структуру и, в конечном итоге, существенно снижать сопротивление деформированию. Кроме значительного эффекта прямого токового воздействия на процесс деформирования (при ползучести) изменения деформационных характеристик можно достичь при преобразовании электрического потенциала поверхности, величина которого контролирует ход многих практически важных процессов (коррозия, износ и т.д.). Эффект электрического потенциала на пластическое течение металлов и сплавов изучен в меньшей степени. В работе [15] выявлено ускорение ползучести и снижение долговечности при наложении слабого потенциала (1 В) к изолированному образцу алюминия, подвергаемому испытанию на ползучесть.

В настоящей работе предлагается рассмотреть влияние постоянного магнитного поля на микротвердость и ползучесть на установившейся стадии процесса. Для исследований использовали технически чистый поликристаллический алюминий (до 0,08 % (здесь и далее по массе) Fe; до 0,06 % Si; до 0,02 % Mn; до 0,008 % Ti; до 0,01 % Cu; до 0,02 % Mg; до 0,02 % Zn; 0,03 % Ga; остальное Al).

Методы и принципы исследования

В качестве источника магнитного поля использовали электромагнит. Индукцию регулировали подбором силы тока, протекающего в катушке. Индукцию магнитного поля измеряли миллитесламетром ТПУ (точность до 0,01 мТл). Значение индукции магнитного поля варьировалось в интервале от 0 до 0,5 Тл (при этом сила тока изменялась в пределах 0,18 – 6,20 А).

Измерения микротвердости проводили по методу Виккерса в соответствии с требованиями ГОСТ 9450 – 76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» по методу восстановленного отпечатка (основной) с помощью четырехгранной пирамиды с квадратным основанием (микротвердомер HVS-1000). Первоначально измеряли исходную микротвердость образца, после чего помещали

его во внешнее магнитное поле и проводили магнитную обработку. Далее образец вынимали из поля и проводили измерения микротвердости сразу после выдержки в магнитном поле и после определенных интервалов времени. Для измерения микротвердости в работе использовали образцы в виде параллелепипедов размером 0,4×1,0×1,0 см, которые располагали в магнитном поле таким образом, чтобы линии индукции были перпендикулярны стороне образца площадью 1 см² и пронизывали ее. Геометрию магнитного поля не изменяли во всех испытаниях, при этом варьировали значение индукции магнитного поля и время выдержки в нем.

Была проведена оценка скорости ползучести в условиях наложения магнитных полей на образцах, представляющих собой цилиндр длиной 250 и диаметром 2,5 мм. Исследовали процесс ползучести без и с воздействием магнитного поля, при этом индукция магнитного поля измерялась аналогично методике измерения микротвердости. Исследование процесса ползучести проводили с помощью испытательной машины на растяжение, сконструированной в СибГИУ. Она состоит из металлического жесткого каркаса, на который был установлен источник магнитного поля, внутри каркаса располагается блок для проведения экспериментов совместно с измерительной аппаратурой.

Основные результаты

Изучение влияния магнитного поля на микротвердость алюминия показало, что после удаления образца из магнитного поля относительное изменение микротвердости снижается на величину, зависящую от времени выдержки и индукции магнитного поля. После прекращения действия магнитного поля микротвердость возвращается к исходному значению за время порядка 20 – 26 ч. Зависимости относительного изменения микротвердости от времени, прошедшего после обработки магнитным полем 0,3 Тл, приведено в таблице.

Проведены исследования начального эффекта влияния магнитного поля на микротвердость алюминия. Результаты исследований представлены на рис. 1.

Влияние магнитного поля (0,3 Тл) на микротвердость технически чистого алюминия при разном времени обработки

The effect of a 0.3 T magnetic field on the microhardness of technically pure aluminum at different processing times

Время выдержки, ч	Относительное изменение микротвердости, %	Погрешность измерения, %
0,25	-2,60	0,74
0,50	-5,35	1,02
1,00	-8,70	1,20
1,50	-10,30	0,80
2,00	-12,50	0,80

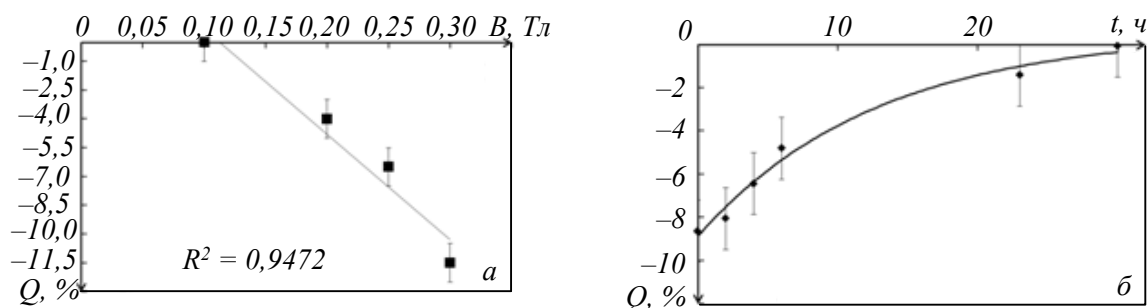


Рис. 1. Относительное изменение микротвердости технически чистого алюминия:

a – зависимость начального эффекта влияния от индукции магнитного поля; *б* – релаксация Q после одного часа выдержки в магнитном поле 0,3 Тл

Fig. 1. Relative change in microhardness of technically pure aluminum:

a – dependence of the initial effect of the influence on the induction of the magnetic field; *б* – relaxation Q after one hour of exposure in a magnetic field of 0,3 T

Влияние магнитного поля (рис. 1, *a*) на микротвердость не наблюдается при индукции менее 0,1 Тл, что говорит о существовании порогового значения B . При дальнейшем увеличении индукции магнитного поля эффект линейно возрастает. Микротвердость алюминия после удаления из магнитного поля (рис. 1, *б*) релаксирует до исходного значения по закону $Q = 0,53 - Q_0 \exp[-t/12,72]$ (где t – время, прошедшее после обработки образца магнитным полем; Q_0 – постоянная, зависящая от величины магнитного поля и времени выдержки в нем, характеризующая начальный эффект влияния магнитного поля).

При изучении влияния магнитного поля на процесс ползучести основное внимание было уделено стадии установившейся ползучести, скорость на которой постоянна. Скорость ползучести определялась численным дифференцированием зависимости $\xi = \xi_0 + \xi' t$, описывающей кинетику процесса. Для количественной оценки эффекта действия магнитного поля использован параметр относительного изменения скорости ползучести на линейной стадии. Относительное

изменение скорости ползучести $\xi \frac{\xi'_{mg} + \xi'}{\xi'}$, где

ξ'_{mg} и ξ' – усредненное значение скорости ползучести при воздействии магнитного поля и без него. Зависимость относительного изменения скорости ползучести от индукции магнитного поля приведена на рис. 2.

Из представленной на рис. 2 зависимости $\xi(B)$ следует, что эффект влияния магнитного поля не однозначен: происходит как возрастание скорости ползучести с достижением максимального значения при $B = 0,1$ Тл, так и ее замедление с достижением минимального при $B = 0,5$ Тл.

Была выявлена зависимость относительного изменения скорости ползучести алюминия от индукции магнитного поля. Установлен знакопеременный характер зависимости относитель-

ного изменения скорости ползучести алюминия ξ от индукции магнитного поля. Показано, что при $B \leq 0,1$ Тл скорость ползучести увеличивается, а время, необходимое для разрушения, – снижается. В интервале $B > 0,1$ Тл скорость ползучести уменьшается, время увеличивается.

Для объяснения зависимостей предположим, что магнитное поле стимулирует движение дислокаций. Это может происходить за счет открепления дислокаций от точечных дефектов под действием постоянного магнитного поля [17].

Результаты, полученные в рамках настоящей работы, согласуются с результатами исследований, в которых было показано, что применение постоянного магнитного поля в процессе ползучести технически чистого титана ВТ1-0 приводят к увеличению скорости процесса на установившейся стадии [18]. Также было установлено, что после магнитной обработки происходит снижение микротвердости на 3 – 8 % в зависимости от индукции поля [19].

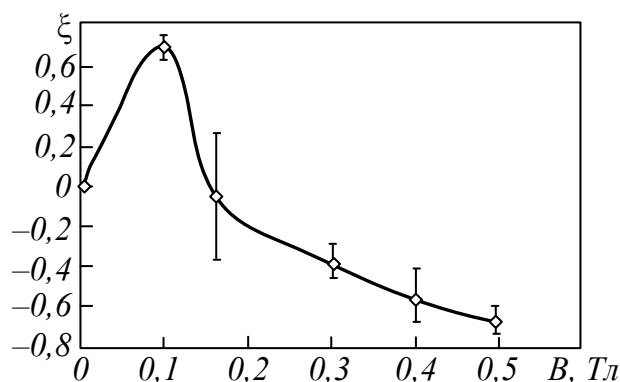


Рис. 2. Зависимость относительного изменения скорости ползучести ξ от индукции магнитного поля B

Fig. 2. The dependence of the relative change in the creep velocity ξ on the induction of the magnetic field B

Выводы

При помещении образцов технически чистого алюминия в постоянное магнитное поле наблюдается обратимое снижение микротвердости. Микротвердость возвращается к исходному состоянию по экспоненциальному закону.

Показано, что эффект магнитного влияния на процесс ползучести алюминия является знакопеременным, происходит как возрастание скорости ползучести, так и ее замедление, в зависимости от индукции магнитного поля.

Схожие полученные экспериментальные результаты на разных материалах позволяют утверждать, что магнитное поле может применяться для пластификации парамагнитных металлов и имеет перспективу промышленного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Jeong C. High temperature mechanical properties of AlSiMg(Cu) alloys for automotive cylinder heads // *Materials Transactions*. 2013. Vol. 54 (4). P. 588–594.
- Joyce M.R., Styles C.M., Reed P.A.S. Elevated temperature short crack fatigue behaviour in near eutectic Al – Si alloys // *International Journal of Fatigue*. 2003. Vol. 25 (9-11). P. 863–869.
- Zhao Q., Qian Z., Cui X., Wu Y., Liu X. Optimizing microstructures of dilute Al–Fe–Si alloys designed with enhanced electrical conductivity and tensile strength // *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Vol. 650. P. 768–776.
- Zhang X., Zhang H., Kong X., Fu D. Microstructure and properties of Al–0.70Fe–0.24Cu alloy conductor prepared by horizontal continuous casting and subsequent continuous extrusion forming // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. 2015. Vol. 25 (6). P. 1763–1769.
- Jiang X., Zhang Y., Yi D., Wang H., Deng X., Wang B. Low-temperature creep behavior and microstructural evolution of 8030 aluminum cables // *Materials Characterization*. 2017. Vol. 130. P. 181–187.
- Pan L., Mirza F.A., Liu K., Chen X.G. Effect of Fe-rich particles and solutes on the creep behaviour of 8xxx alloys // *Materials Science and Technology*. 2016. Vol. 33. P. 1130–1137.
- Kassner M.E., Smith K. Low temperature creep plasticity // *Journal of Materials Research and Technology*. 2014. Vol. 3 (3). P. 280–288.
- Sherby O.D., Goldberg A., Ruano O.A. Solute-diffusion-controlled dislocation creep in pure aluminium containing 0.026 at.% Fe // *Philosophical Magazine*. 2007. Vol. 84. P. 2417–2434.
- Kim H. Low-temperature creep behavior of ultrafine-grained 5083 al alloy processed by equal-channel angular pressing // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2010. Vol. 24 (10). P. 2075–2081.
- Marquis E.A., Seidman D.N., Dunand, D.C. Effect of mg addition on the creep and yield behavior of an Al–Sc alloy // *Acta Materialia*. 2003. Vol. 51 (16). P. 4751–4760.
- Моргунов Р.Б., Валева Р.А., Скворцов А.А., Королев Д.В., Пискорский В.П., Куницына Е.И., Кучеряев В.В., Коплак О.В. Магнито-пластический и магнитомеханический эффекты в алюминиевых сплавах с магнито-стрикционными микровключениями // *Труды ВИАМ*. 2019. № 10. С. 3–13.
- Ener S., Skokov K.P., Karpenkov D.Yu., Kuzmin M.D., Gutfleisch O. Magnet properties of Mn70Ga30 prepared by cold rolling and magnetic field annealing // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015. Vol. 382. P. 265–270.
- Li J., Zhou J., Liu L., Feng A., Huang S., Meng X. High-cycle bending fatigue behavior of TC6 titanium alloy subjected to laser shock peening assisted by cryogenic temperature // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 409. P. 126848.
- Комиссарова И.А., Ярополова Н.Г., Коновалов С.В., Загуляев Д.В., Громов В.Е. Влияние контактных воздействий на нанотвердость металлов // *Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии*. 2014. № 33. С. 125–131.
- Коновалов С.В., Данилов В.И., Зуев Л.Б., Филиппев Р.А., Громов В.Е. О влиянии электрического потенциала на скорость ползучести алюминия // *Физика твердого тела*. 2007. Т. 49 (8). С. 1389–1391.
- Жмакин Ю.Д., Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Кузнецов В.А., Громов В.Е. Совершенствование аппаратного обеспечения электростимулированных процессов обработки металлов давлением // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2009. Т. 6. № 2. С. 92–98.
- Альшиц В.И. Магнитопластический эффект: основные свойства и физические механизмы // *Кристаллография*. 2003. № 5. С. 826–854.
- Шляров В.В., Загуляев Д.В. Влияние магнитных полей на процесс пластической деформации цветных металлов // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2019. Т. 16. № 3. С. 394–398.
- Шляров В.В., Анучина Е.А., Загуляев Д.В., Коновалов С.В. Изменение микротвердости

титана VT1-0 при воздействии магнитным полем // Вестник Тамбовского университета. Серия естественные и технические науки. 2016. С. 1444–1446.

REFERENCES

- Jeong C. High temperature mechanical properties of AlSiMg(Cu) alloys for automotive cylinder heads. *Materials Transactions*. 2013, vol. 54 (4), pp. 588–594.
- Joyce M.R., Styles C.M., Reed P.A.S. Elevated temperature short crack fatigue behaviour in near eutectic Al–Si alloys. *International Journal of Fatigue*. 2003, vol. 25 (9-11), pp. 863–869.
- Zhao Q., Qian Z., Cui X., Wu Y., Liu X. Optimizing microstructures of dilute al-fe-si alloys designed with enhanced electrical conductivity and tensile strength. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015, vol. 650, pp. 768–776.
- Zhang X., Zhang H., Kong X., Fu D. Microstructure and properties of al-0.70Fe-0.24Cu alloy conductor prepared by horizontal continuous casting and subsequent continuous extrusion forming. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. 2015, vol. 25 (6), pp. 1763–1769.
- Jiang X., Zhang Y., Yi D., Wang H., Deng X., Wang B. Low-temperature creep behavior and microstructural evolution of 8030 aluminum cables. *Materials Characterization*. 2017, vol. 130, pp. 181–187.
- Pan L., Mirza F.A., Liu K., Chen X.G. Effect of Fe-rich particles and solutes on the creep behaviour of 8xxx alloys. *Materials Science and Technology*. 2016, vol. 33, pp. 1130–1137.
- Kassner M.E., Smith K. Low temperature creep plasticity. *Journal of Materials Research and Technology*. 2014, vol. 3 (3), pp. 280–288.
- Sherby O.D., Goldberg A., Ruano O.A. Solute-diffusion-controlled dislocation creep in pure aluminium containing 0.026 at.% Fe. *Philosophical Magazine*. 2007, vol. 84, pp. 2417–2434.
- Kim H. Low-temperature creep behavior of ultrafine-grained 5083 al alloy processed by equal-channel angular pressing. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2010, vol. 24(10), pp. 2075–2081.
- Marquis E.A., Seidman D.N., Dunand, D.C. Effect of mg addition on the creep and yield behavior of an Al–Sc alloy. *Acta Materialia*. 2003, vol. 51 (16), pp. 4751–4760.
- Morgunov R.B., Valeev R.A., Skvortsov A.A., Korolev D.V., Piskorskii V.P., Kunitsyna E.I., Kucheryaev V.V., Koplak O.V. Magnetoplastic and magnetomechanical effects in aluminum alloys with magnetostric-
- ive microinclusions. *Trudy VIAM*. 2019, no. 10, pp. 3–13. (In Russ.).
- Ener S., Skokov K.P., Karpenkov D.Yu., Kuz'min M.D., Gutfleisch O. Magnet properties of Mn70Ga30 prepared by cold rolling and magnetic field annealing. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015, vol. 382, pp. 265–270.
- Li J., Zhou J., Liu L., Feng A., Huang S., Meng X. High-cycle bending fatigue behavior of TC6 titanium alloy subjected to laser shock peening assisted by cryogenic temperature. *Surface and Coatings Technology*. 2021, vol. 409, pp. 126848.
- Komissarova I.A., Yaropolova N.G., Konovalov S.V., Zagulyaev D.V., Gromov V.E. Influence of Contact Actions on the Nanohardness of Metals. *Vestnik gornometallurgicheskoi sektsii Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*. 2014, no. 33, pp. 125–131. (In Russ.).
- Konovalov S.V., Danilov V.I., Zuev L.B., Filip'ev R.A., Gromov V.E. On the effect of electric potential on the creep rate of aluminum. *Fizika tverdogo tela*. 2007, vol. 49 (8), pp. 1389–1391. (In Russ.).
- Zhmakin Yu.D., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Kuznetsov V.A., Gromov V.E. Improvement of hardware support for electrically stimulated metal forming processes. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2009, vol. 6, no. 2, pp. 92–98. (In Russ.).
- Al'shits V.I. Magnetoplastic effect: main properties and physical mechanisms. *Kristallografiya*. 2003, no. 5, pp. 826–854. (In Russ.).
- Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V. Influence of magnetic fields on the process of plastic deformation of non-ferrous metals. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2019, vol. 16, no. 3, pp. 394–398. (In Russ.).
- Shlyarov V.V., Anuchina E.A., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V. Change in the microhardness of titanium VT1-0 when exposed to a magnetic field. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2016, pp. 1444–1446. (In Russ.).

Сведения об авторах

Виталий Владиславович Шляров, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0001-8130-648X
E-mail: shlyarov@mail.ru

Дмитрий Валерьевич Загуляев, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-9859-8949

E-mail: zagulyaev_dv@bk.ru

Кристина Владимировна Аксенова, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-4908-6776

E-mail: 19krestik91@mail.ru

Information about the authors

Vitaly V. Shlyarov, Postgraduate student of the Department of Natural Sciences named after Prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0001-8130-648X

E-mail: shlyarov@mail.ru

Dmitry V. Zagulyaev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Natural Sciences named after Prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-9859-8949

E-mail: zagulyaev_dv@bk.ru

Kristina V. Aksenova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Natural Sciences named after Prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-4908-6776

E-mail: 19krestik91@mail.ru

© 2022 г. В.В. Шляров, Д.В. Загуляев,

К.В. Аксенова

Поступила в редакцию 3 февраля 2022 г.

УДК 621.791.92

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НАПЛАВЛЕННЫХ НОВОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V

И. В. Осетковский, Н. А. Козырев, Е. А. Будовских, А. Р. Михно, Л. П. Башенко

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

Аннотация. Методами световой и растровой электронной микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа, определения микротвердости выявлены особенности микроструктуры электродуговых покрытий, наплавленных порошковой проволокой (состав проволоки 0,40 % C, 0,78 % Si, 1,04 % Mn, 1,61 % Cr, 0,49 % Ni, 0,51 % Mo, 0,65 % V, 0,001 % Co, 0,001 % W, 0,07 % Cu, 0,059 % S, 0,02 % P). Показано, что по структуре металлическая основа покрытий имеет столбчатое строение и представляет собой грубоигльчатый мартенсит. В структуре слоев выявлены неметаллические включения глобулярного вида двух размерных групп со средними размерами 12 и 27 мкм, образованные оксидами алюминия, марганца и кремния. На шлифах наблюдаются многочисленные мелкие включения сульфидов неправильной глобулярной формы диаметром 3 – 4 мкм. Толщина покрытий 3 мм, глубина зоны термического влияния, сформированной при смешивании наплавочного материала с материалом подложки, – 5 мм. Распределение микротвердости отражает двуслойное строение модифицированной поверхности, в наплавленном слое микротвердость достигает 500 HV (50 HRC), в зоне термического влияния – 300 HV (35 HRC).

Ключевые слова: порошковая проволока, электродуговая наплавка, структура, мартенсит, оксиды, сульфиды, микротвердость

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания (шифр темы 0809-2021-0013).

Для цитирования: Осетковский И.В., Козырев Н.А., Будовских Е.А., Михно А.Р., Башенко Л.П. Особенности структуры и свойств наплавленных новой порошковой проволокой электродуговых покрытий системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 2 (40). С. 17 – 22.

FEATURES OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF ELECTRIC ARC COATING SYSTEMS Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V DEPOSITED BY NEW FLUX-CORED WIRE

I. V. Osetkovskii, N. A. Kozyrev, E. A. Budovskikh, A. R. Mikhno, L. P. Bashchenko

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

Abstract. Using the methods of light and scanning electron microscopy, X-ray spectral microanalysis, determination of microhardness, the microstructure features of electric arc coatings deposited with flux-cored wire are revealed (wire composition 0.40 % C, 0.78 % Si, 1.04 % Mn, 1.61% Cr, 0.49% Ni, 0.51 % Mo, 0.65 % V, 0.001 % Co, 0.001 % W, 0.07 % Cu, 0.059 % S, 0.02 % P). It is shown that the structure of coatings metal base has a columnar structure of a coarse-needle martensite. In the structure of the layers, nonmetallic inclusions of a globular type of two dimensional groups with average sizes of 12 and 27 μm formed by aluminum, manganese and silicon oxides were revealed. Numerous small inclusions of sulfides of irregular globular shape with a diameter of 3 – 4 μm were observed on the sections. The thickness of the coatings is 3 mm, the depth of the thermal influence zone formed by mixing the surfacing material with the substrate material is 5 mm. The

microhardness distribution reflects the two-layer structure of the modified surface, in the deposited layer the microhardness reaches 500 HV (50 HRC), in the zone of thermal influence – 300 HV (35 HRC).

Keywords: flux-cored wire, electric arc coating, structure, properties, martensite, oxides, sulfides, microhardness

Funding: The research was supported within the framework of the state assignment (subject code 0809-2021-0013).

For citation: Osetkovskii I.V., Kozyrev N.A., Budovskikh E.A., Mikhno A.R., Bashchenko L.P. Features of the structure and properties of electric arc coating systems Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V deposited by new flux-cored wire // Bulletin of SibSIU. 2022, no. 2, pp. 17 – 22 (In Russ.).

Введение

Электродуговая наплавка широко применяется для защиты от абразивного износа технологического оборудования в металлургической, горнодобывающей, строительной и других отраслях промышленности [1, 2]. Как правило, пэтом используются дорогостоящие зарубежные наплавочные материалы, которые не всегда соответствуют предъявляемым требованиям. Это обуславливает актуальность разработки новых наплавочных материалов, обеспечивающих оптимальные структуру и свойства защитных покрытий в конкретных условиях эксплуатации.

Универсальным сварочным материалом является порошковая проволока, которая пригодна для наплавки слоев с особыми свойствами, в частности для защиты от абразивного изнашивания [3 – 5]. В ряде исследований в этом направлении разрабатываются новые составы порошковых проволок для защиты поверхности горно-шахтного оборудования [6 – 10].

Целью настоящей работы является исследование структуры кристаллизации и неметаллических включений, а также изучение распределения твердости по глубине покрытий системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V, наплавленных новой порошковой проволокой электродуговым методом.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные исследования включали изготовление порошковой проволоки, автоматическую наплавку покрытий под флюсом, механическую обработку, подготовку образцов для исследований.

Состав порошковой проволоки для наплавки подбирали, исходя из необходимости защиты поверхности от абразивного изнашивания. В настоящей работе для обеспечения повышения срока службы деталей (шнека угольного комбайна) горно-шахтного оборудования использовали следующий новый состав порошковой проволоки и электродуговых покрытий системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V: 0,40 % C, 0,78 % Si, 1,04 % Mn, 1,61 % Cr, 0,49 % Ni, 0,51

% Mo, 0,65 % V, 0,001 % Co, 0,001 % W, 0,07 % Cu, 0,059 % S, 0,02 % P (по массе). Использовали углеродфторсодержащий материал, изготовленный из техногенных отходов (пыли газоочистки производства алюминия).

Наплавку пластин из стали 09Г2С размерами 200×150×10 мм проводили сварочным трактором ASAW-1250 в два слоя. Для наплавки использовали флюс АН-26С. Для проволоки диаметром 6 мм приемлемое качество наплавляемого валика с минимальным содержанием газовых пор получено при режиме: сила тока – 450 А, напряжение – 30 В, скорость сварки – 10 м/мин.

Изучение микроструктуры наплавленных покрытий проводили на поперечных шлифах после полировки до и после травления 4 %-ым спиртовым раствором азотной кислоты.

Распределение химического состава по элементам структуры изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 LMN. Количественный анализ химического состава включений проводили по двум спектрам в каждом из двух выявленных размерных типов включений.

Микротвердость по Виккерсу HV под нагрузкой 49 Н измеряли с помощью микротвердомера Qness 60 M EVO, оснащенного объективами для структурного анализа. Измерения проводили от поверхности покрытия вглубь с интервалом 1,0 мм. Полученные значения переводили в единицы HRC.

Обсуждение результатов

Особенности структуры кристаллизации. При исследовании микроструктуры наплавленного металла образцов после химического травления установлено, что она имеет дендритное (столбчатое) строение, характерное для литого металла, и представляет собой грубоигольчатый мартенсит (рис. 1).

Анализ размеров и химического состава включений. При исследовании загрязненности наплавленных слоев на шлифах выявлены однотипные включения глобулярного вида трех размерных групп со средними размерами 3 – 4, 12 и 27 мкм.

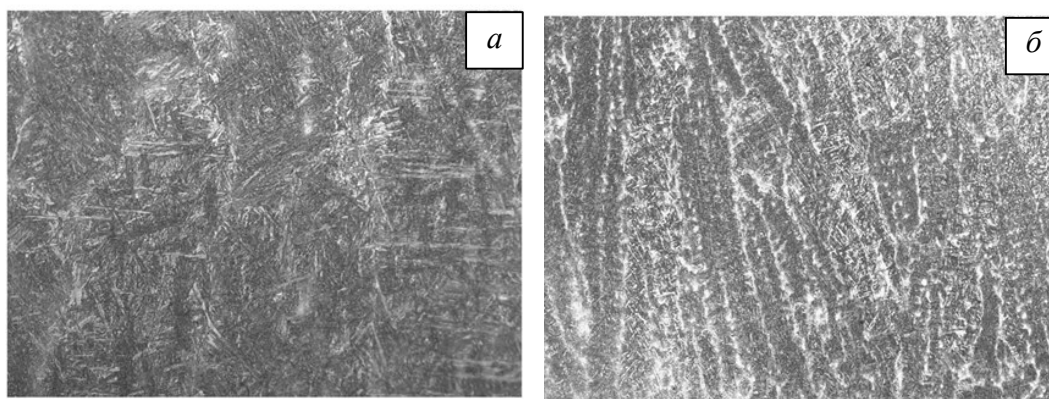


Рис. 1. Микроструктура наплавленного слоя при увеличении 500 (а) и 100 (б)
Fig. 1. Microstructure of the deposited layer at magnification of 500 (a) and 100 (b)

Мелкие включения неправильной глобулярной формы обогащены серой и включают марганец (рис. 2). В составе включений второй группы обнаружены кремний, алюминий и марганец, входящие, по-видимому, в состав оксидов.

Крупные включения неоднородны по составу (рис. 3). Они содержат области с размерами до 4 – 6 мкм, в составе которых кислород (42,7 %), магний (12,6 %), алюминий (39,5 %), марганец (4,0 %). В «основе» включений кислород (36,9 %), фтор (14,9 %), натрий (6,6 %), магний (4,61 %), алюминий (15,9 %), кремний (15,7 %), кальций (1,7 %), марганец (2,8 %) (по массе). Таким образом, основными составляющими крупных включений являются оксиды алюминия и кремния.

Распределение микротвердости по глубине покрытий. Результаты определения микротвердости наплавленного металла показаны на рис. 4 и приведены в таблице. Видно, что до глубины примерно 3 мм микротвердость достигает 500 HV, а затем резко падает и до глубины 9 мм держит-

ся на уровне 300 HV, после чего еще раз падает до уровня 160 HV. Такое распределение микротвердости отражает то, что, с одной стороны, наплавку проводили в два слоя, а с другой – смешивание наплавочного материала с материалом подложки.

Выводы

Микроструктура наплавленного металла образцов имеет дендритное (столбчатое) строение, характерное для литого металла, и представляет собой грубоигольчатый мартенсит. В металле наплавки исследуемых образцов выявлены неметаллические включения трех размерных групп 3 – 4, 12 и 27 мкм. Основными составляющими включений в наплавленном покрытии являются оксиды кремния, алюминия, фтора, натрия, магния и марганца. Максимальная твердость наплавленного покрытия в слое толщиной 3 мм составила 501 HV (49,5 HRC).

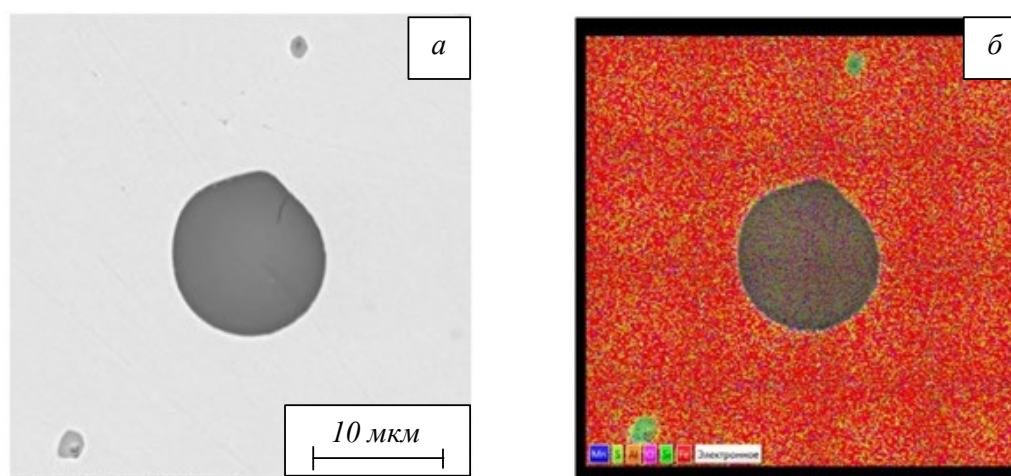


Рис. 2. Рентгеноспектральный микроанализ элементного состава неметаллических включений наплавленного покрытия: а – электронно-микроскопический снимок; б – карта распределения химических элементов, входящих в состав включений (красный – железо; синий – марганец; салатовый – сера; оранжевый – алюминий; зеленый – кремний)

Fig. 2. X-ray spectral microanalysis of the elemental composition of nonmetallic inclusions of the deposited coating: а – electron microscopical image; б – distribution map of the chemical elements included in the inclusions (red – iron; blue – manganese; light green – sulfur; orange – aluminum; green – silicon)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин). М.: Издательство МСХА, 2002. 632 с.
2. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
3. Рябцев И.А., Сенченков И.К. Теория и практика наплавочных работ. Киев: Екотехнологія, 2013. 400 с.
4. Восстановление деталей машин: справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов; под ред. В.П. Иванова. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.
5. Михайлицын С.В., Зверева И.Н., Шекшеев М.А. Сварочные и наплавочные материалы. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 228 с.
6. Пат. 2726230 РФ. МПК⁸ В23 К35/368 Порошковая проволока / Уманский А.А., Козырев Н.А., Михно А.Р., Думова Л.В., Усольцев А.А., Козырева О.А., Осетковский И.В., Комаров А.А. Заявл. 09.01.2020, опубл. 10.07.2020. Бюл. № 19.
7. Осетковский И.В., Козырев Н.А., Кибко Н.В., Попова М.В., Гусев А.И. Разработка износостойкой порошковой проволоки системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V

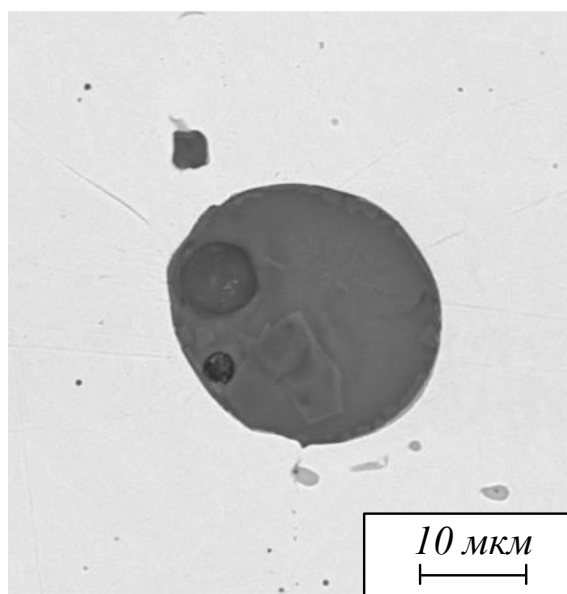


Рис. 3. Неоднородная структура крупных неметаллических включений

Fig. 3. Heterogeneous structure of large nonmetallic inclusions

для наплавки деталей горношахтного оборудования // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. № 3. С. 131–135.

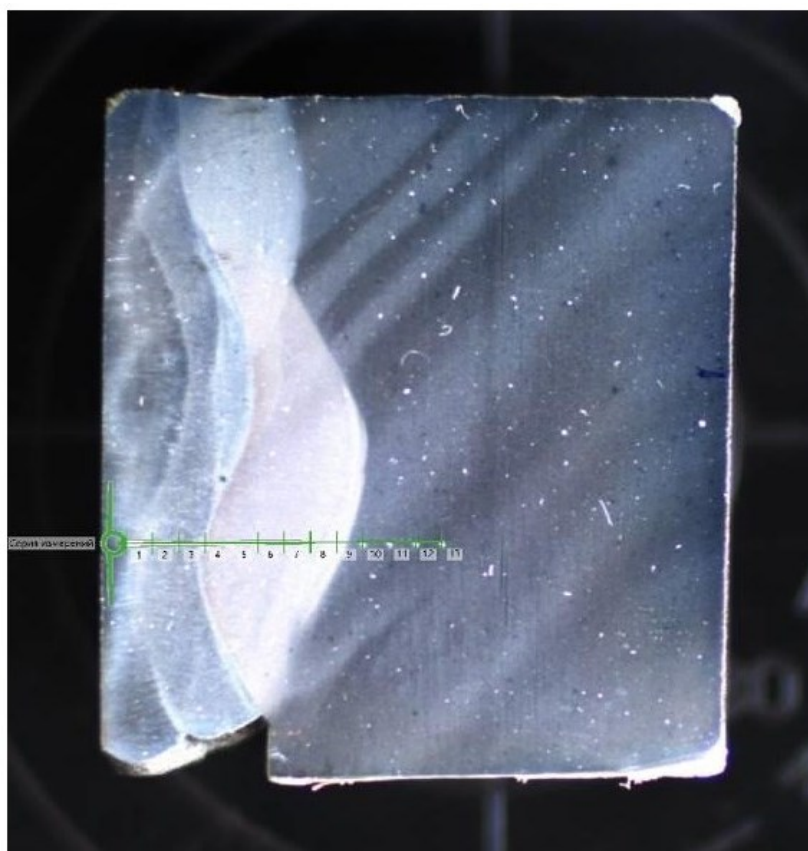


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине модифицированного поверхностного слоя

Fig. 4. Microhardness distribution over the depth of modified surface layer

Распределение микротвердости по глубине x модифицированного слоя
Microhardness distribution over the depth x of the modified layer

x , мм	0,5	1,5	2,6	3,6	4,7	5,7	6,7	7,8	8,8	9,9	10,9	12,0	13,0
HV	501	478	523	287	296	300	296	302	310	164	160	159	162
HRC	49,5	47,5	50,5	32,0	34,0	34,0	34,0	34,0	35,0				

8. Осетковский И.В., Козырев Н.А., Гусев А.И., Крюков Р.Е., Попова М.В. Свойства металла, наплавленного порошковыми проволоками систем Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W и Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2017. Вып. 38. С. 155–162.
9. Osetkovskiy I.V., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Usoltsev A.A., Gusev A.I. Development of a wear-resistant flux cored wire of Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V system for deposit welding of mining equipment parts. In: International scientific and research conference on knowledge-based technologies in development and utilization of mineral resources (KTD-MUR 2017), 6–9 June 2017. Novokuznetsk, 2017. Vol. 84. P. 1–7.
10. Осетковский И.В., Козырев Н.А., Гусев А.И. и др. Сравнительный анализ абразивной износостойкости металла, наплавленного порошковыми проволоками систем Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W – V и Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V // Заготовительные производства в машиностроении. 2019. Т. 17. № 5. С. 198–202.
- A.A., Kozyreva O.A., Osetkovskii I.V., Komarov A.A. Byul. no. 19. (In Russ.).
7. Osetkovskii I.V., Kozyrev N.A., Kibko N.V., Popova M.V., Gusev A.I. Development of wear-resistant flux-cored wire of the Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V system for surfacing parts of mining equipment. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*. 2017, no. 3, pp. 131–135. (In Russ.).
8. Osetkovskii I.V., Kozyrev N.A., Gusev A.I., Kryukov R.E., Popova M.V. Properties of metal deposited with flux-cored wires of Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W and Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V systems. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*. 2017, vol. 38, pp. 155–162. (In Russ.).
9. Osetkovskiy I.V., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Usoltsev A.A., Gusev A.I. Development of a wear-resistant flux cored wire of Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V system for deposit welding of mining equipment parts. In: *International Scientific and Research Conference on Knowledge-based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources (KTD-MUR 2017)*, 6–9 June 2017. Novokuznetsk, 2017, vol. 84, pp. 1–7.
10. Osetkovskii I.V., Kozyrev N.A., Gusev A.I. etc. Comparative analysis of abrasive wear resistance of metal deposited with flux-cored wires of Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W – V and Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V systems. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2019, vol. 17, no. 5, pp. 198–202. (In Russ.).

REFERENCES

1. Garkunov D.N. Tribotechnics (design, manufacture and operation of machines). Moscow: Izdatel'stvo MSKhA, 2002, 632 p. (In Russ.).
2. Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokol'nikov M.G. Abrasive wear. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 224 p. (In Russ.).
3. Ryabtsev I.A., Senchenkov I.K. Theory and practice of surfacing works. Kiev: Ekotekhnologiya, 2013, 400 p. (In Russ.).
4. Panteleenko F.I., Lyalyakin V.P., Ivanov V.P., Konstantinov V.M. Handbook on restoration of machine parts. Ivanov V.P. ed. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 672 p. (In Russ.).
5. Mikhailitsyn S.V., Zvereva I.N., Sheksheev M.A. Welding and surfacing materials. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriya, 2020, 228 p. (In Russ.).
6. Patent RF 2726230. МПК8 В23 К35/368. Flux-cored wire / Umanskii A.A., Kozyrev N.A., Mikhno A.R., Dumova L.V., Usol'tsev

Сведения об авторах

Осетковский Иван Васильевич, аспирант кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства, Сибирский государственный индустриальный университет

Николай Анатольевич Козырев, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-7391-6816
E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Евгений Александрович Будовских, д.т.н., доцент, старший научный сотрудник, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: budovskikh@mail.ru
ORCID: ORCID 0000-0002-3795-0726

Алексей Романович Михно, аспирант кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-7305-6692
E-mail: mikno-mm131@mail.ru

Людмила Петровна Бащенко, к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-1878-909X
E-mail: luda.baschenko@gmail.com

Information about the authors

Ivan V. Osetkovskii, Postgraduate of the Chair “Materials, Foundry and Welding Production”, Siberian State Industrial University

Nikolai A. Kozyrev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-7391-6816
E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Evgeny A. Budovskikh, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher, Siberian State Industrial University
Email: budovskikh@mail.ru
ORCID: ORCID 0000-0002-3795-0726

Aleksei R. Mikhno, Postgraduate of the Chair “Materials, Foundry and Welding Production”, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-7305-6692
E-mail: mikno-mm131@mail.ru

Lyudmila P. Bashchenko, Cand. Sci (Eng.), Associate Professor of the Department of Heat Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0003-1878-909X
Email: Luda.baschenko@gmail.com

© 2022 г. И.В. Осетковский, Н.А. Козырев, Е.А. Будовских, А.Р. Михно, Л.П. Бащенко
Поступила в редакцию 11 февраля 2022 г.

УДК 621.771.068

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ МОТАЛОК ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

А. Г. Никитин, Е. О. Пилюкшин

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

Аннотация. Описано назначение моталок, применяемых на металлургических прокатных станах. Рассмотрены конструкции различных типов моталок: с подвижным и с неподвижным накопителем готового продукта (катанки в бухты). Показано, что развитие конструкций моталок рассматриваемых типов происходит параллельно, при этом на мелкосортных станах предпочтительно устанавливать моталки с подвижным накопителем, а на непрерывных проволочных станах, имеющих более высокие скорости прокатки, моталки с неподвижным накопителем.

Ключевые слова: прокатный стан, моталка, катанка, бунт

Для цитирования: Никитин А.Г., Пилюкшин Е.О. Сравнительный анализ конструкций моталок прокатных станов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 2 (40). С. 23 – 28.

COMPARATIVE ANALYSIS OF COILER DESIGNS OF ROLLING MILLS

A. G. Nikitin, E. O. Piliukshin

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

Abstract. The paper describes the purpose of coilers used in metallurgical rolling mills. The coiler designs of various types are considered: with a movable and fixed storage of the finished product – bull rods. It is shown that the development of the coiler designs of the considered types occurs in parallel, while it is preferable to install coilers with a movable storage, and in continuous wire mills having higher rolling velocities – coilers with a fixed storage.

Keywords: rolling mill, coiler, rod, coil

For citation: Nikitin A.G., Pilyukshin E.O. Comparative analysis of coiler designs of rolling mills. *Bulletin of SibSIU*. 2022, no. 2 (40), pp. 23 – 28 (In Russ.).

Моталки проволочных станов применяют для сматывания в бунты катанку и мелкосортные профили, которые располагаются за последними клетями проволочных и мелкосортных станов. Принципиально моталки бывают двух типов: с подвижным и с неподвижным накопителем готового продукта (катанки в бухты) [1 – 6].

Моталка с подвижным накопителем мелкосортного стана 250 предназначена для сматывания катанки в бунты наружным диам. 750 мм, внутренним диам. 500 мм (рис. 1).

В состав моталки, имеющей станину 8, входит барабан 9, являющийся элементом накопителя катанки и формирующий бунт. К барабану шарнирно крепятся рычаги 2. Барабан приво-

дится во вращение двигателем 7 через полый вал 5. Накопитель представляет собой полый цилиндр, внутренней стенкой которого является барабан, а внешней – кожух 3, который вращается совместно с барабаном, а нижней частью опирается на рычаги [7].

Катанка подается в цилиндрический накопитель по трубке 10 и происходит наматывание бунта.

После окончания наматывания двигатель 7 отключается и включается двигатель 6 подъема вала 4. Этот двигатель через цилиндрический редуктор и кривошипную передачу приподнимает внутренний вал 4, который, поднимаясь, поворачивает рычаги 2 вокруг своих шарниров.

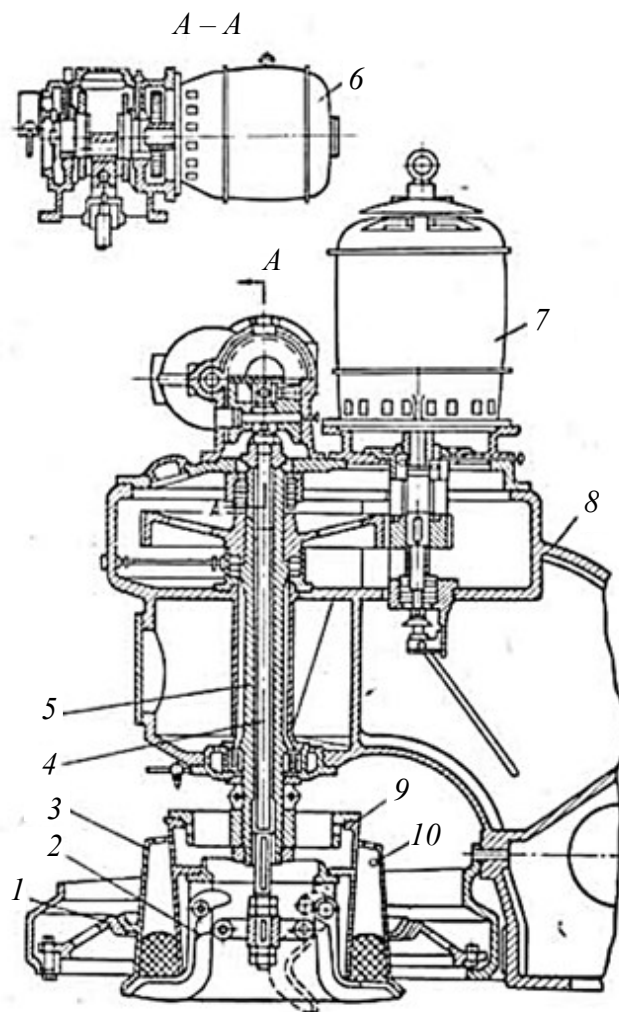


Рис. 1. Конструкция моталки с вращающимся барабаном и выдачей бунта вниз
Fig. 1. Coiler design with a rotating drum and the release of coil down

При этом рычаги убираются внутрь барабана 9, наружный кожух 3 опускается вниз, скользя по коническому фланцу 1, закрепленному на станине 8. За счет трения фланца по наружному конусу достигается торможение вращающегося барабана.

Из намоточного пространства бунт сбрасывается вниз на люльку передаточного механизма, осуществляющего навешивание бунтов на крюковый конвейер.

Также применяется подпольная моталка с вращающимся поддоном и выбросом бунта в сторону (рис. 2). Привод моталки расположен ниже уровня пола цеха [8]. Моталка предназначена для сматывания тяжелых бунтов внутренним диам. 850 мм, наружным диам. 1250 мм.

В накопительном пространстве моталки находятся два ряда концентрично расположенных штифтов 4, проходящих через отверстия в поддоне 5 и закрепленных в торцовом диске 9, вращающемся на валу 2.

Поддон приводится во вращение электродвигателем 10 посредством конического редуктора, при этом штифты вращаются совместно с под-

доном. Катанка подается в накопитель по подающей трубке 7 и вращении поддона происходит наматывание бунта на штифты.

После окончания сматывания двигатель 10 затормаживается и моталка останавливается. В это время подающая трубка перемещается вверх (на рис. 2 это положение указано штриховыми линиями), после чего поддон с находящимся на нем полученным бунтом поднимается вверх до уровня отводящей решетки рычажным механизмом 1, который приводится в движение электродвигателем 11. Находящийся на поддоне бунт сталкивателем 6, имеющим привод от двигателя 8, перемещается на отводящую решетку. В дальнейшем бунт с отводящей решетки рычажным механизмом 3 навешивается на крюковой конвейер.

Недостатками моталок с подвижным накопителем являются следующие:

- из-за больших центробежных и внецентренных неуравновешенных сил моталки этого типа применяют для сматывания проволоки при скоростях только до 10 м/с;

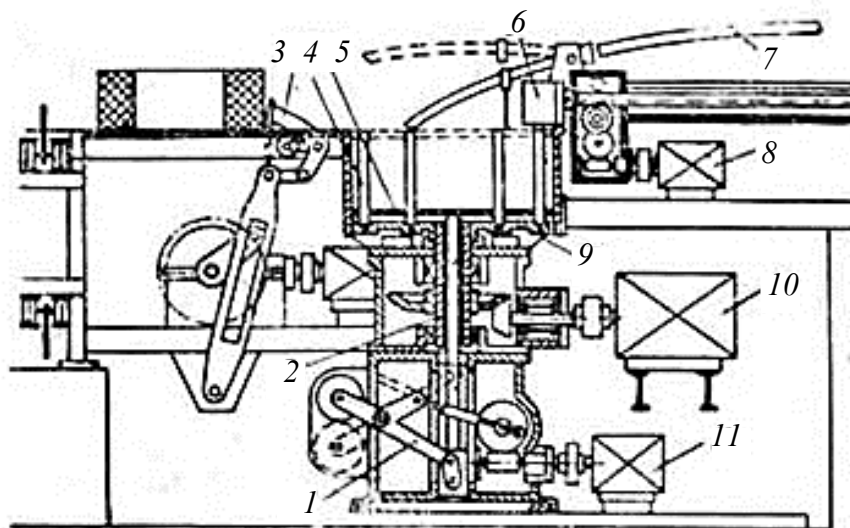


Рис. 2. Конструкция моталки с вращающимся поддоном и выдачей бунта в сторону
Fig. 2. Coiler design with a rotating pallet and the release of coil to the side

– сбрасывание готового бунта осуществляется после остановки накопителя, что требует увеличения времени для запуска намотки следующего бунта, а также мощности привода, так как моталка перед сбросом бунта должна остановиться.

Моталка с неподвижным барабаном и боковой выдачей бунта предназначена для сматывания проволоки диам. 5 – 10 мм (рис. 3).

Пустотелый вал моталки 4 приводится через зубчатую передачу; к концу этого вала прикреплен конус 2, вращающийся вместе с валом (на некоторых моталках вместо конической применена цилиндрическая зубчатая передача) [9].

Проволока через трубку 3, находящуюся в направляющем валу 4, по вращающемуся конусу 2 попадает в накопитель, образованный корпусом моталки и вертикальными штырями 1, проходящими сквозь плиту 5. При попадании проволоки на вращающийся конус, она свивается и кольцами укладывается на плиту, формируя бунт.

После того, как бунт полностью сформировался, вертикальные штыри рычажным механизмом, находящемся ниже плиты, опускаются, а бунт через окно в корпусе моталки сталкивается на крюковой конвейер.

Опыт эксплуатации моталок с вращающимся конусом показал, что наличие в конструкции конуса, потребляющего большое количество мощности привода его вращения, является избыточным. Поэтому рассматриваемую конструкцию изменили следующим образом: сам конус, с закрепленным на нем приводным валом, убрали, а к направляющему полному валу прикрепили трубку, которая на рис. 3 показана штриховыми линиями.

В результате такой модернизации качество укладки витков проволоки не ухудшилось. Значительно уменьшились маховой момент вращающихся масс, динамические показатели привода моталки, улучшились условия работы подшипниковых опор приводного вала.

Также применяются моталки с выбросом бунта вниз (рис. 4). Проволочная моталка предназначена для сматывания бунтов наружным диам. до 1150 мм. Она состоит из станины 7 и полового вала 3, внутри которого закреплена подводящая трубка 4. Снизу к полному валу прикреплена трубка 6, осуществляющая укладку подаваемой трайб-аппаратом катанки в намоточное пространство, образованное неподвижным барабаном 2 и открывающимися вниз створками 1. Вращение трубки 6 проводится от фланцевого электродвигателя 5 через цилиндрическую зубчатую передачу [10].

Открытие и закрытие обеих створок осуществляется от электродвигателя через червячно-цилиндрический редуктор и четырехзвенный рычажный механизм. При открывании створок бунт сбрасывается вниз из намоточного пространства на пластинчатый транспортер.

Моталки системы с раскрывающимися створками имеют существенный недостаток – при одновременном открывании створок (например, у моталки (рис. 4), при износе шарниров передаточного четырехзвенного механизма) бунт катанки падает на пластинчатый транспортер не плашмя, а под углом, в результате чего витки бунта сдвигаются друг относительно друга, при этом бунт деформируется. Такие бунты трудно обвязывать и передавать на крюковой конвейер для последующего охлаждения.

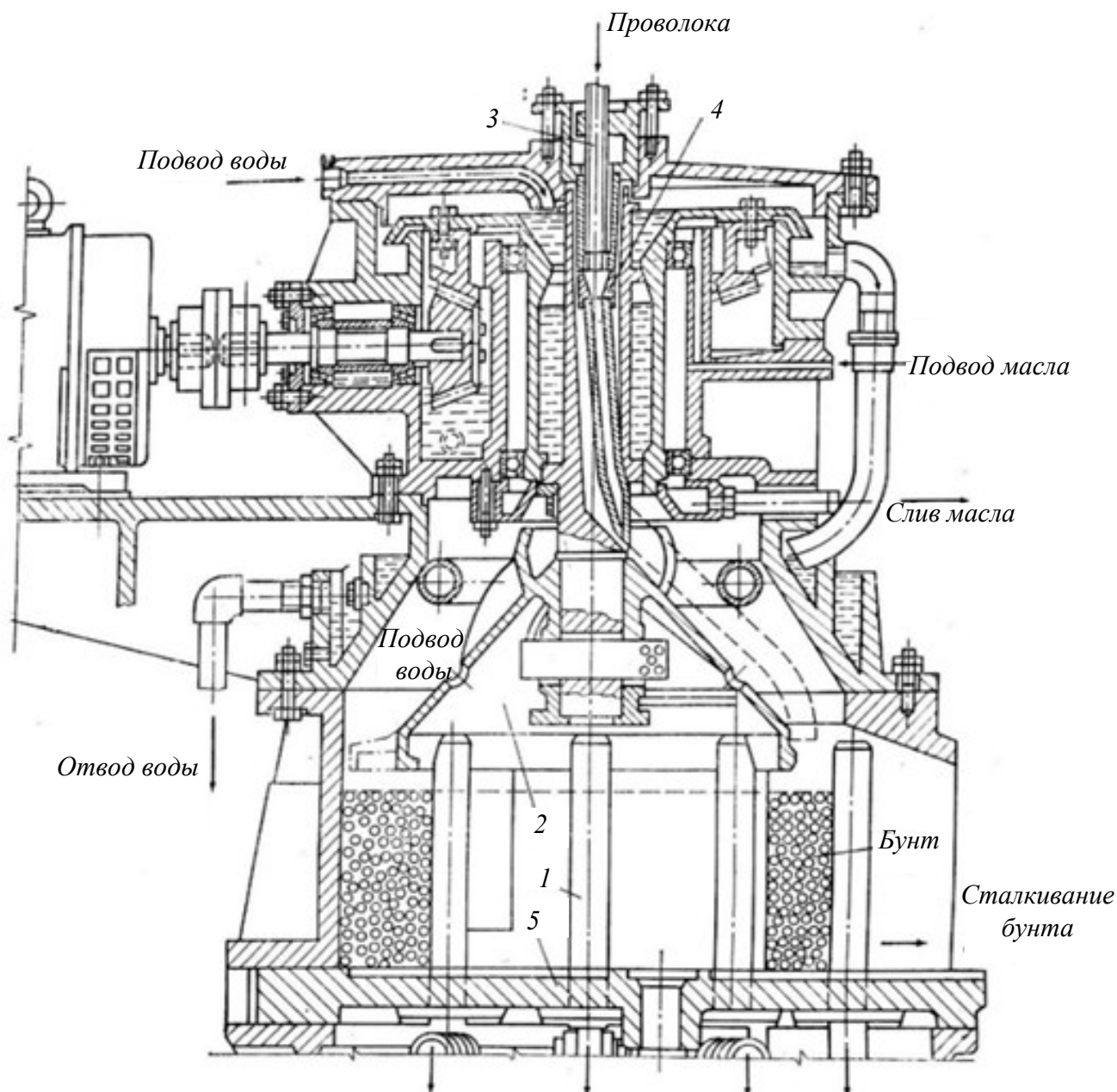


Рис. 3. Конструкция моталки с неподвижным барабаном и выдачей бунта в сторону:
 1 – вертикальные штыри; 2 – конус; 3 – трубка; 4 – направляющий полый вал; 5 – плата

Fig. 3. Coiler design with a fixed drum and the release of coil sideways:
 1 – vertical pins; 2 – cone; 3 – tube; 4 – guide hollow shaft; 5 – plate

Также недостатком моталок с неподвижным накопителем являются следующее обстоятельство: при сматывании в бунт профиля происходит его скручивание на 360° за каждый оборот приводного вала, поэтому эти моталки пригодны только для сматывания катанки круглого сечения диам. до 10 мм. На них нельзя сматывать простые мелкосортные профили не круглого сечения (например, овальную или квадратную катанку), так как при скручивании на 360° профиль их будет искажен.

Достоинство моталок с подвижным накопителем состоит в том, что, кроме проволоки и

круглого профиля, на них можно сматывать и мелкие профили квадратного сечения.

Преимуществом моталки с неподвижным накопителем является то, что бунт не вращается и сматывание проволоки может происходить при скорости ее подачи до 50 м/с. Кроме того, сбрасывание готового бунта осуществляется на ходу без остановки привода моталки, что позволяет через несколько секунд подавать в моталку новую проволоку.

Критерии, по которым проводится сравнительный анализ различных типов конструкций моталок, приведены в таблице.

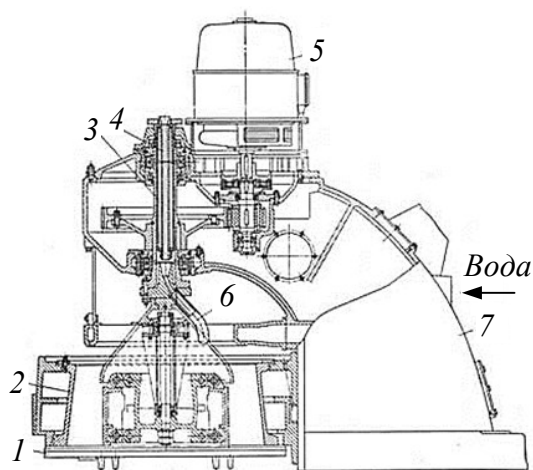


Рис. 4. Конструкция моталки с выдачей бунта вниз через створки
 Fig. 4. Coiler design with the release of the coil down through the doors

Вывод

Развитие конструкций моталок рассматриваемых типов происходит параллельно, при этом на мелкосортных станах предпочтительно устанавливать моталки с подвижным накопителем, а на непрерывных проволочных станах, имеющих более высокие скорости прокатки – моталки с неподвижным накопителем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машины и агрегаты металлургических заводов. Т. 2. / Под ред. А.И. Целикова. М.: Металлургия, 1988. 426 с.

2. Григорьев В.П., Нечкин Ю.М., Егоров А.В., Никольский Л.Н. Конструкции и проектирование агрегатов сталеплавильного производства. М.: МИСиС, 1995. 512 с.
 3. Салганик В.М., Гун И.Г., Руденков В.В., Одинцов К.Э., Радионов А.А. Двухвходовая моталка для совмещения разноскоростных технологических операций // Электротехнические системы и комплексы. 1998. № 3. С. 31–37.
 4. Некипелов В.С., Шикин А.В. Основы расчета процессов формирования витков проката и промышленные испытания инновационных процессов намотки // Механическое оборудование металлургических заводов. 2019. № 1 (12). С. 4–14.
 5. А.с. 1199336 СССР. Моталка / Богданов С.И., Гладуш В.Д., Дерий И.А., Зубко Н.С., Кукушкин О.Н., Литвин А.В.; заявл. 23.12.1985.
 6. А.с. 1733154 СССР. Моталка для непрерывной смотки проволоки / Серебренников А.М., Котерев А.А.; заявл. 15.05.1992.
 7. Пат. 2359771 РФ. Моталка для проволоки и металлических прутков / Кастеллани Ф.; заявл. 27.06.2009.
 8. А.с. 1803218 СССР. Моталка для намотки проволоки / Походня И.К., Каплиенко И.П., Чашихин Э.Г., Альтер В.Ф., Косенко П.А.; заявл. 23.03.1993.
 9. А.с. 547251 СССР. Моталка с неподвижным барабаном / Колесов В.М., Манаенков В.П., Чернов Ю.А.; заявл. 25.02.1977.

**Анализ существующих конструкций моталок
 Analysis of the existing coiler designs**

Критерии	Моталка			
	с вращающимся барабаном и выдачей бунта вниз	с вращающимся барабаном и выдачей бунта в сторону	с неподвижным барабаном и выдачей бунта в сторону	с неподвижным барабаном и выдачей бунта вниз
Большая скорость намотки	–	+	+	+
Отсутствие необходимости остановки и разгона двигателя перед сбросом бунта	–	–	+	+
Целостность бунта при снятии с рамы	+	+	+	–
Возможность сматывания разного профиля	+	+	–	–
Отсутствие центробежных и вращающихся неуравновешенных сил	–	+	+	+
Благоприятная динамика привода	–	–	+	+

10. Николаенко А.Н., Трегулова И.П. О формировании бунтов в моталках с осевой подачей катанки // *Металлургия*. 2019. № 2 (40). С. 111–114.

REFERENCES

1. Tselikov A.I. ed. *Machines and units of metallurgical plants*. Vol. 2. Moscow: Metallurgiya, 1988, 426 p. (In Russ.).
2. Grigor'ev V.P., Nechkin Yu.M., Egorov A.V., Nikol'skii L.N. *Construction and design of steel production units*. Moscow: MISiS, 1995, 512 p. (In Russ.).
3. Salganik V.M., Gun I.G., Rudenkov V.V., Odintsov K.E., Radionov A.A. Two-input coiler for combining different-speed technological operations. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы*. 1998, no. 3, pp. 31–37. (In Russ.).
4. Nekipelov V.S., Shikin A.V. Coiling process design basics and pilot testing of innovative coiling processes. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov*. 2019, no. 1 (12), pp. 4–14. (In Russ.).
5. Bogdanov S.I., Gladush V.D., Derii I.A., Zubko N.S., Kukushkin O.N., Litvin A.V. Coiler. A.s. 1199336 SSSR.; zayavl. 23.12.1985. (In Russ.).
6. Serebrennikov A.M., Koterev A.A. Coiler for a continuous wire coiling. A.s. 1733154 SSSR; zayavl. 15.05.1992. (In Russ.).
7. Kastellani F. Coiler for wire and metal bars. Pat. no. 2359771 RF; zayavl. 27.06.2009. *Byulleten' izobretenii*. (In Russ.).
8. Pokhodnya I.K., Kaplienko I.P., Chashchikhin E.G., Al'ter V.F., Kosenko P.A. Coiler for wire

coiling. A.s. 1803218 SSSR; zayavl. 23.03.1993. (In Russ.).

9. Kolesov V.M., Manaenkov V.P., Chernov Yu.A. Coiler with a stationary drum. A.s. 547251 SSSR.; zayavl. 25.02.1977. (In Russ.).
10. Nikolaenko A.N., Tregulova I.P. On the formation of rods in coilers with axial wire rod feed. *Metallurgiya*. 2019, no. 2 (40), pp. 111–114. (In Russ.).

Сведения об авторах

Александр Григорьевич Никитин, д.т.н., профессор кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: nikitin1601@yandex.ru

Егор Олегович Пиллюкшин, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: plego1@mail.ru

Information about the authors

Alexander Grigoryevich Nikitin, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanics and Mechanical Engineering, Siberian State Industrial University

E-mail: nikitin1601@yandex.ru

Egor Olegovich Pilyukshin, Siberian State Industrial University

E-mail: plego1@mail.ru

© 2022 г. А.Г. Никитин, Е.О. Пиллюкшин
Поступила в редакцию 3 февраля 2022 г.

УДК 539.4:548.4:621.77:669.539.382:669.17

РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В. Д. Сарычев

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

Аннотация. В работе приводится анализ теоретических основ формирования микро- и наноразмерных гидродинамических неустойчивостей. В традиционных и современных технологиях встречаются развивающиеся на микро- и нанорасстояниях процессы, на которые раньше не могли обратить внимание. Выявление новых закономерностей и определение диапазона параметров, при которых они реализуются, определяет научную значимость и фундаментальность исследований. Рассмотрены конкретные физические ситуации, где реализуются или могут проявиться неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Практическая значимость поставленных задач заключается в создании принципиально новых технологий на базе полученных знаний. Описаны решенные задачи.

Ключевые слова: скорость роста, неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, микрофлюидика

Для цитирования: Сарычев В.Д. Разработка теоретических основ формирования микро- и наноразмерных гидродинамических неустойчивостей для создания принципиально новых технологий // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 2 (40). С. 29 – 38.

DEVELOPMENT OF THEORETICAL FOUNDATIONS FOR THE FORMATION OF MICRO- AND NANOSCALE HYDRODYNAMIC INSTABILITIES FOR THE CREATION OF BREAKTHROUGH TECHNOLOGY

V. D. Sarychev

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

Abstract. The paper analyses the theoretical foundations of micro- and nanoscale hydrodynamic instabilities formation. In traditional and modern technologies, there are processes developing at micro and nano distances that previously could not be paid attention to. Identification of new patterns and determination of the range of parameters under which they are implemented determines the scientific significance and fundamental nature of research. Specific physical situations where Kelvin-Helmholtz instabilities are realized or can manifest themselves are considered. The practical significance of the tasks is to create fundamentally new technologies based on the gained knowledge. The solved tasks are described.

Keywords: growth rate, Kelvin-Helmholtz instability, microfluidics

For citation: Sarychev V.D. Development of theoretical foundations for the formation of micro- and nanoscale hydrodynamic instabilities for the creation of breakthrough technologies. *Bulletin of the SibSIU*. 2022, no. 2 (40), pp. 29 – 38 (In Russ.).

Введение

Впервые связать формирование локальных структур (капель) из движущейся струи жидкости с развитием неустойчивости поверхности удалось в конце XIX века Релею. Он предложил использовать анализ линейной устойчивости к

предсказанию размеров капель: среди всех неустойчивых длин волн выбирается такая, которая имеет самую высокую скорость роста. Другими словами, размер капель определяется такой длиной волны, при которой достигается максимум в зависимости инкремента или скорости

роста (growth rate) от длины волны. Использование идеи Релея продолжается в настоящее время и связано с фундаментальностью проблемы поиска выражения для наиболее неустойчивой длины волны для различных сред от масштабов вселенной до субатомных длин.

Целью настоящей работы является обзор исследований, в которых рассматриваются микро- и наноразмерные гидродинамические неустойчивости границы раздела, вызванные скольжением слоев относительно друг друга, так называемые неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (НКГ).

В работе исследуется разбиение области параметров на характерные зоны со специфическими режимами. Рассмотрены конкретные физические ситуации, где реализуются или могут проявиться НКГ. Предложены подходы для создания принципиально новых технологий.

Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца

Обширные исследования неустойчивости Кельвина-Гельмгольца обусловлены практическим использованием при оптимизации и улучшении работы жидкостного реактивного и дизельного двигателей, устройств для получения порошков, струйной печати, микро- и нанокпель в медицине [1]. Для нахождения наиболее неустойчивой длины волны НКГ выводится и анализируется дисперсионное уравнение, которое связывает скорость роста и длину волны (или волновое число). Это зависимость от некоторого количества параметров. Как правило, это уравнение решается численно (или проводится приближенный аналитический анализ при определенных предположениях). Первый, кто взялся за поиск аналитического выражения для наиболее неустойчивой длины волны НКГ, был Д. Тейлор. В своей работе [2] он рассматривал НКГ в плоской постановке двух полубесконечных несжимаемых слоев жидкости различной плотности, одна из которых идеальная и движется относительно другой вязкой жидкости с определенной скоростью. В этой работе выведено трансцендентное дисперсионное уравнение от трех безразмерных параметров (в общем случае зависимость длины волны от трех безразмерных параметров). В приближении малости отношения плотностей идеальной жидкости к вязкой дисперсионное уравнение было сведено к алгебраическому уравнению от одного безразмерного параметра (зависимость длины волны от одного безразмерного параметра). Это позволило получить важный результат: универсальную зависимость наиболее неустойчивой длины волны от безразмерного параметра. В таком приближении зависимость скорости роста от длины волны имеет один максимум.

В работе [3] при численном решении трансцендентного дисперсионного уравнения впервые получены зависимости скорости роста от волнового числа. Эти зависимости при некоторых параметрах имеют два максимума (или два режима неустойчивости): первый режим – аэродинамический, который слабо зависит от вязкости; второй режим обусловлен вязкостью. В этой работе был проведен трехпараметрический анализ (отношение плотностей, число Вебера и число Онезорге) определения существования двух режимов, при этом выводы носят качественный характер. Двойственная роль вязкости НКГ анализируется в настоящее время, например в работе [4], где приведен трехпараметрический анализ (отношение плотностей, число Вебера и число Рейнольдса) режимов. При постоянном значении отношения плотностей получено разбиение плоскости параметров (число Вебера и число Рейнольдса) на области аэродинамической и вязко обусловленной неустойчивости. Четких границ этих областей не выявлено, так как дисперсионные уравнения брались в самом общем виде, а размерность пространства параметров равнялась трем.

Для более четкого выделения границ режимов необходимо провести аналитическое исследование выявления режимов, а для этого должно быть использовано упрощенное дисперсионное уравнение, которое справедливо при определенных предположениях.

В настоящей работе предполагается приближение коротких волн, для которого дисперсионное уравнение совпадает с дисперсионным уравнением вязко-потенциальной модели НКГ [5, 6]. В настоящее время вязко-потенциальная модель активно используется: М.К. Awasthi при исследовании различных гидродинамических неустойчивостей [7 – 12], НКГ для наножидкого слоя [13], взаимодействия НКГ с акустическими волнами [14]; для предсказания наноразмерных длин волн при развитии НКГ с умеренными скоростями скольжения [15]; в модели перемешивания слоев при электровзрывной обработке [16], формирования белого слоя в рельсах [17]; в модели формирования нано- и микрочастиц [18]. В работах [19, 20], используя разработанный графоаналитический подход, найдены параметры из трех областей, при которых в зависимости скорости роста от волнового числа реализуются один гидродинамический максимум, один вязко обусловленный максимум, одновременно два максимума.

Отметим работы, в которых приводятся результаты анализа дисперсионного уравнения НКГ с учетом вязкости и кусочно-постоянным профилем скорости [21 – 26]: не было обнару-

жено двух максимумов в зависимости скорости роста от длины волны, то есть вязкость играет роль только диссипации энергии.

Важна работа [15], где показана принципиальная роль вязкости. Сам факт того, что максимум обусловлен вязкостью, является примером формирования диссипативных структур и подобен известным явлениям: возникновению неустойчивости течения Пуазейля, пограничному слою Блазиуса, ячейкам Бенара, вихрям Толмина-Шлихтинга. Вязкость в этих примерах не приводит к затуханию движения, а, наоборот, ведет к появлению определенной динамической структуры. Двойственная роль вязкости при НКГ анализировалась в работах [27, 28].

Таким образом, задача о разбиении пространства параметров на характерные области при НКГ ставилась, но корректного решения не получила. Решение тесно связано с разработкой подходов создания принципиально новых технологий формирования микро- и наноструктур.

Severe plastic deformation (SPD)

При мегапластических деформациях (Severe Plastic Deformation (SPD)) реализуются наноструктурные состояния [29, 30]. При кручении под высоким давлением биметаллических слоев обнаружено формирование вихрей, подобных неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в жидкостях [31]. Авторы утверждают, что сходство только кажущееся, физические причины неустойчивостей принципиально отличаются от таковых в жидкостях. При этом использовано моделирование пластического течения и показано, что завихрения металлических слоев обусловлены пластической неустойчивостью из-за локального блокирования сдвиговой деформации. Такого сложного объяснения можно избежать, если заметить, что уравнения пластического течения сводятся к уравнениям Навье-Стокса с переменной вязкостью, тогда обнаруженные вихри при SPD объясняются НКГ с вязкостью. Выяснение справедливости двух разных точек зрения на природу формирования вихрей при SPD имеет важное практическое значение в определении механизма формирования наноразмерных структурно-фазовых состояний с размером зерна в несколько десятков нанометров («белый» слой), обнаруженных, например в рельсах [32]. Анализу формирования белого слоя в рельсах уделяется самое пристальное внимание [33 – 41]. Известно, что в процессе качения колеса по рельсу в зоне пятна контакта имеются участки скольжения [42], поэтому важно понимать, как ведет себя материал при скольжении. В работах [43 – 45] показано, что при скольжении материалы деформируются по механизму зернограничного про-

скольжения и ведут себя так, как если бы обладали ньютоновской вязкостью. Поэтому развивать теорию НКГ с вязкостью необходимо для понимания процессов эволюции рельсов в процессе длительной эксплуатации [46] и фрагментации материала при SPD [47].

Отметим, что рассматриваемая модель НКГ с вязкостью при скоростях скольжения порядка 1 м/с может давать максимум в наноразмерном диапазоне длин волн [48]. Следовательно, требуется дальнейшее развитие в направлении разбиения области параметров.

Микро- и нанокapли

Распад струи жидкости на капли в микро- и нанодиапазоне становится все более привлекательным благодаря их различным применениям в химии, медицине и других областях [49, 50]. Основная задача заключается в разработке фундаментальных научных принципов, которые объясняют возникновение различных режимов неустойчивости, вызванных микрофлюидным переносом. В обзоре [49] рассматриваются капиллярные потоки, способные растягивать границы раздела жидкостей до микрометрических размеров и меньше. Растяжение струи или сужение ее диаметра может происходить гидродинамическими (микрокапли) или электрическими (нанокapли) силами. Первый способ заключается в фокусировке жидкости из толстой струи в тонкую при совместном течении газа (co-flow focusing (CFF)), предложен в 1998 г. Gañán-Calvo [51]. Первые попытки моделирования CFF, основанные на исследовании неустойчивости границы раздела основного течения и газа с прямоугольными профилями скорости, не привели к параметризации экспериментальных данных. Поэтому в работе [52] для нахождения распределения скорости основного течения решали численно уравнения пограничного слоя для жидкости и газа. Для анализа устойчивости основного течения решали краевую задачу на собственные значения. В результате получены пять различных типов течений, которые в общих чертах объясняют общие особенности, наблюдаемые в экспериментах при распаде струи.

В серии работ [53 – 57] под руководством Ting Si экспериментально и теоретически изучалось течение CFF. В работе [53] анализ экспериментальных данных позволил в плоскости параметров число Рейнольдса – число Вебера выделить шесть областей, где режимы дробления струи на капли различаются. Линейная краевая задача на собственные значения решалась с базовыми профилями скорости в виде гиперболического тангенса. Совпадение теории и эксперимента было частичным. В работе [54] проведено ис-

следование неустойчивости поверхностей раздела коаксиальных струй жидкости при СФФ экспериментальными и численными методами. В работе [55] выбиралось основное течение: в центральной струе в виде параболического профиля, а для внешнего движущегося потока – в виде функции ошибок. Анализировалось численно дисперсионное уравнение. Теоретическая граница неустойчивости хорошо согласуется с экспериментальными и численными результатами. В работе [56] проведены исследования межфазной неустойчивости и струйно-капельный переход в процессе СФФ с помощью экспериментов, прямого численного моделирования уравнений Навье-Стокса и численного теоретического анализа дисперсионного уравнения. Построена фазовая диаграмма режимов струи и капания. В работе [57] при численном моделировании при некоторых параметрах обнаружена вихревая зона при взаимодействии газа с жидким конусом, исследуются ее размеры в зависимости от параметров задачи.

В работе [58] экспериментально и численно изучается устойчивость гидродинамической фокусировки конуса для случая, когда вторая среда находится в покое и является поверхностно-активным веществом. Показано, что значительно уменьшился диаметр капли.

Таким образом, теоретические результаты этих работ являются руководством при изготовлении микрокапель для практического применения, а экспериментальные данные по распаду коаксиальных струй могут быть использованы для верификации новых моделей.

Микроструи

По сравнению с микроструями исследованию свободных макроструй уделяется большее внимание из-за их широкого использования в различных областях науки и техники. Однако в последнее время интерес к изучению микроструй значительно возрос, что связано, в частности, с развитием МЭМС-технологий (микроэлектромеханические системы). Появилась возможность потенциального использования микроструй в различных процессах, например таких, как микроохлаждение, струйное горение, производство нанопорошков и другие. В последнее время появились результаты по исследованию дозвуковых ламинарных микроструй [59 – 67]. В работе [60] сформулированы основные свойства микроструй, некоторые из них следующие:

- механизм неустойчивости Кельвина-Гельмгольца для круглой струи с «ударным» профилем скорости на срезе сопла сохраняется до диаметра струи, равного примерно 5 мм, при меньших диаметрах не наблюдается;

- механизм развития микроструи как с ударным, так и с параболическим профилем скорости на срезе сопла кардинально меняется;

- обнаружены новые явления, связанные с трансформацией круглой микроструи в плоскую под воздействием поперечного акустического поля и с раздвоением микроструи на две развивающиеся независимо друг от друга струи.

Одним из важных приложений микроструй является охлаждение [68 – 72]. В работе [68] впервые обсуждалось охлаждение нагретой поверхности газовыми микроструями. Структура течения, образованного натеканием газовой микроструи на нагретую поверхность, принципиально отличается от структуры течения, образованного макроструей. Когда сопло находится очень близко к стене, выходящая из сопла струя может плавно и горизонтально перемещаться вдоль стены подобно потоку в канале. По мере увеличения расстояния между соплом и пластиной вблизи пластины формируются вихревые ячейки, которые значительно увеличивают теплоотдачу.

Своеобразный характер струйного течения вызывает большой интерес и требует дальнейшего изучения теплопередачи вдоль стенки. Численное моделирование расщепления круглой микроструи приводится в работе [73]. Полученные детальные экспериментальные данные [65] позволяют верифицировать разрабатываемые в проекте модели.

Охлаждение рельсов

В Японии широкое распространение получил способ термической обработки воздухом (газовыми струями) [74]. В настоящее время этот способ используется на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» для закалки рельсов. Охлаждение образцов рельсов осуществлялось на опытной установке, разработанной на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» [75], основным элементом которой является пластина с перфорированными соплами, через которые подается воздух под избыточным давлением $(0,10 - 0,22) \cdot 10^5$ Па. Закалку рельсовых проб длиной до 400 мм проводили в течение 90 – 280 с после нагрева до температуры 900 °С. Диаметр сопел составлял 5 мм. Температуру замеряли с помощью термопар, которые запаивались в высверленные отверстия на глубине 5, 10 и 20 мм. По зависимости температуры от времени можно определить коэффициент теплообмена [76], по которому можно определить характер охлаждения. Является открытым вопрос, как влияет диаметр сопла на характер теплообмена, особенно в режиме микроструи.

Выводы

Показано важное значение разбиения области параметров на характерные зоны со специфиче-

скими режимами. Рассмотрены конкретные физические ситуации, где реализуются или могут проявиться НКГ. Предложены подходы для создания принципиально новых технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eggers J., Villermaux J. Physics of liquid jets // Report on Progress in Physics. 2008. Vol. 71. Article 036601.
2. Taylor G.I. Generation of ripples by wind blowing over a viscous liquid. In: The Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor. Bachelor G.K. ed. 1940. Vol. III. P. 244–254. Cambridge University Press, 1963.
3. Li X.И., Tankin R.S. On the temporal instability of a two-dimensional viscous liquid sheet // Journal of Fluid Mechanics. 1991. Vol. 226. P. 425–443.
4. Dasgupta D., Nath S., Bhanja D. A study on dual role of viscosity on the stability of a viscous planar liquid sheet surrounded by inviscid gas streams of equal velocities, and prediction of resulting droplet distribution using maximum entropy formulation // Physics of Fluids. 2019. Vol. 31 (7). Article 074103.
5. Joseph D.D., Funada T., Wang J. Potential Flows of Viscous and Viscoelastic Fluids. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 497 p.
6. Padrino J.C., Joseph D.D., Kim H. Viscous effects on Kelvin-Helmholtz instability in a channel // J. Fluid Mech. 2011. Vol. 680. P. 398–416.
7. Awasthi M.K., Asthana R., Agrawal G.S. Pressure Corrections for the Potential Flow Analysis of Kelvin-Helmholtz Instability with Heat and Mass Transfer // Int. J. Heat Mass Transf. 2012. Vol. 55. No. 9-10. P. 2345–2352.
8. Awasthi M.K. Kelvin-Helmholtz instability of viscoelastic liquid-viscous gas interface with heat and mass transfer // International Journal of Thermal Sciences. 2021. Vol. 161. No. 2. Article 106710.
9. Awasthi M.K., Agarwal S. Rayleigh-Taylor instability in a spherical configuration: A viscous potential flow approach // Chinese Journal of Physics. 2020. Vol. 68. P. 866–873.
10. Awasthi M.K., Agarwal S. Instability of a radially moving cylindrical surface: a viscous potential flow approach // Journal of Fluids Engineering. 2020. Vol. 142. No. 9. Article 09450.
11. Awasthi M.K. Rayleigh-Taylor instability of swirling annular layer with mass transfer // Journal of Fluids Engineering. 2019. Vol. 141 (7). Article 071202.
12. Awasthi M.K., Sarychev V.D., Nevskii S.A., Kuznetsov M.A., Solodsky S.A. Kelvin-Helmholtz instability of swirling annular layer with heat and mass transfer // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2019. Vol. 11 (5). P. 86–96.
13. Han Y. Kelvin-Helmholtz instability of a confined nano-liquid sheet with the effects of heat and mass transfer and Marangoni convection // Atomization and Sprays. 2022. Vol. 32. No. 1. P. 73–89.
14. Bilgili S., Ugarte O., Akkerman V. Interplay of Kelvin-Helmholtz instability with acoustics in a viscous potential flow // Phys. Fluids. 2020. Vol. 32. Article 084108.
15. Грановский А.Ю., Сарычев В.Д., Громов В.Е. Модель формирования внутренних нанослоев при сдвиговых течениях материалов // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. № 10. С. 155–158.
16. Сарычев В.Д., Грановский А.Ю., Черемушкина Е.В., Громов В.Е. Модель перемешивания слоев, созданных при электровзрывной обработке // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т. 10. № 4. С. 558–562.
17. Сарычев В.Д., Невский С.А., Коновалов С.В., Грановский А.Ю. Модель образования наноструктур в рельсовой стали при длительной эксплуатации // Математическое моделирование в естественных науках. 2015. Т. 1. С. 394–398.
18. Sarychev V., Nevskii S., Granovskii A., Chinkhov D. Simulation of Nanoparticles Formation by Mechanism of Kelvin-Helmholtz Instability // Int. J. Nanoparticles Nanotech. 2017. Vol. 3. No. 012. P. 2–10.
19. Сарычев В.Д., Невский С.А., Кормышев В.Е., Юрьев А.А., Громов В.Е. Модель формирования наноструктурных слоев при длительной эксплуатации рельсов // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 9. С. 699–706.
20. Sarychev V.D., Nevskii S. A., Kuznetsov M. A. et al. Kelvin-Helmholtz Instability of Cylindrical Geometry for Micro-Dimensional Range of Wavelengths // Jordan Journal of Physics. 2022. No. 3. P. 33–47.
21. Куликовский А.Г., Шикина И.С. О влиянии вязкости на устойчивость тангенциального разрыва в несжимаемой жидкости // Вестник Московского университета. 1997. № 6. С. 29–32.
22. Разуменко Л.С., Ткаченко В.И. Неустойчивость границы раздела вязких течений // Вестник Харьковского университета. 2005. № 710. С. 72–80.
23. Алиев И.Н., Юрченко С.О., Назарова Е.В. Особенности комбинированной неустойчивости заряженной границы раздела движущихся сред // Инженерно-физический журнал. 2007. Т. 80. № 5. С. 64–69.
24. Алиев И.Н., Юрченко С.О. К вопросу о неустойчивости границы раздела двух сред конечной толщины // Инженерно-физический журнал. 2007. Т. 80. № 6. С. 127–133.
25. Ширяева С.О., Григорьев А.И., Суханов С.А. О роли вязкости жидкости в реализации не-

- устойчивости Кельвина-Гельмгольца // Электронная обработка материалов. 2013. Т. 49. С. 56–61.
26. Григорьев А.И., Ширяева С.О. О нахождении аналитических выражений для декрементов в асимптотике маловязкой жидкости // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. № 10. С. 18–25.
27. Senecal P.K., Schmidt D.P., Nouar I., Rutland C.J., Reitz R.D., Corradini M.L. Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization // International Journal of Multiphase Flow. 1999. Vol. 25. P. 1073–1097.
28. Sirignano W.A., Edwards C.F. Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays. Cambridge University Press, 2010. 462 p.
29. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурированные материалы, полученные сильной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.
30. Glezer A.M., Kozlov E.V., Koneva N.A., Popova N.A., Kurzina I.A. Plastic deformation of nanostructured materials. N.Y.: Taylor and Francis Group, 2017. 323 p.
31. Kulagin R., Beygelzimer Y., Ivanisenko Y., Mazilkin A., Straumal B., Hahn H. Instabilities of interfaces between dissimilar metals induced by high pressure torsion // Materials Letters. 2018. Vol. 222. No. 1. P. 172–175.
32. Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure modification in the Surface Layers of Railway Rails and Wheels // Steel tech. 2008. Vol. 3. No. 1. P. 19–23.
33. Baumann G., Fecht H.J., Liebelt S. Formation of white-etching layers on rail treads // Wear. 1996. Vol. 191. P. 133–140.
34. Österle Rooch H., Pyzalla A., Wang L.W., Oesterle W., Rooch H., Pyzalla A., et al. Investigation of white etching layers on rails by optical microscopy, electronmicroscopy // X-ray and synchrotron X-ray diffraction. Mater. Sci. Eng. A. 2001. Vol. 303. P. 150–157.
35. Wild Wang L., Hasse B., Wroblewski T., Goe-rigk G., Pyzalla A.E. Microstructure alterations at the surface of a heavily corrugated rail with strong ripple formation // Wear. 2003. Vol. 254. P. 876–883.
36. Zhang H.W., Ohsaki S., Mitao S., Ohnuma M., Hono K. Microstructural investigation of white etching layer on pearlite steel rail // Mater. Sci. Eng. A. 2006. Vol. 421. P. 191–199.
37. Takahashi J., Kawakami K., Ueda M. Atom probe tomography analysis of the white etching layer in a rail track surface // Acta Mater. 2010. Vol. 58. P. 3602–3612.
38. Lojkowski W., Djahanbakhsh M., Bürkle G., Gierlotka S., Zielinski W., Fecht H.J. Nanostructure formation on the surface of railway tracks // Mater. Sci. Eng. A. 2001. Vol. 303. P. 197–208.
39. Ishida M. Rolling contact fatigue (RCF) defects of rails in Japanese railways and its mitigation strategies // Electron. J. Struct. Eng. 2013. Vol. 13. P. 67–74.
40. Steenbergen M., Dollevoet R. On the mechanism of squat formation on train rails. Part I: Origination // Int. J. Fatigue. 2013. Vol. 47. P. 361–372.
41. Pal S., Valente C., Daniel W., Farjoo M. Metallurgical and physical understanding of rail squat initiation and propagation // Wear. 2012. Vol. 284–285. P. 30–42.
42. Johnson K.L. Contact mechanics. Cambridge University Press, 1987. 510 p.
43. Рубцов В.Е., Тарасов С.Ю., Колубаев А.В. Одномерная модель неоднородного сдвига при трении скольжения // Физическая мезомеханика. 2012. Т. 15. № 4. С. 103–103.
44. Тарасов С.Ю., Рубцов В.Е., Колубаев А.В., Горбатенко В.В. Анализ микроскопических полей деформации при трении скольжении // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 7-2. С. 350–355.
45. Рубцов В.Е., Тарасов С.Ю., Колубаев А.В. Неоднородность деформации и сдвиговая неустойчивость материала при трении // Известия вузов. Физика. 2011. № 11-3. P. 215–220.
46. Ivanov Y.F., Glezer A.M., Sundeev R.V., Kuznetsov R.V., Gromov V.E., Shliarova Y.A., Semin A.P. Fine structure formation in rails under ultra long-term operation // Materials Letters. 2022. Vol. 309. Article 131378.
47. Straumal B.B., Kulagin R., Klinger L., Rabkin E., Straumal P.B., Kogtenkova O.A., Baretzky B. Structure refinement and fragmentation of precipitates under severe plastic deformation // A Review. Materials. 2022. Vol. 15. Article 601.
48. Сарычев В.Д., Невский С.А., Кормышев В.Е., Юрьев А.А., Громов В.Е. Модель формирования наноструктурных слоев при длительной эксплуатации рельсов // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 9. С. 699 – 706.
49. Barrero A., Loscertales I. Micro- and nanoparticles via capillary flows // Annual Review of Fluid Mechanics. 2007. Vol. 39. No. 1. P. 89–106.
50. Anna S.L. Droplets and bubbles in microfluidic devices // Annu. Rev. Fluid Mech. 2016. Vol. 48. P. 285–309.
51. Gañán-Calvo A.M. Generation of steady liquid micro threads and micron-sized monodisperse sprays in gas streams // Phys. Rev. Lett. 1998. Vol. 80. P. 285–288.
52. Gordillo J.M., Pérez-Saborid M., Gañán-Calvo A.M. Linear stability of co-flowing liquid – gas jets // Journal of Fluid Mechanics. 2001. Vol. 448. P. 23–51.
53. Si T., Li F.A., Yin X.I.Y., Yin X.Z. Modes in flow focusing and instability of coaxial liquid-gas jets // J. Fluid Mech. 2009. Vol. 629. P. 1–23.

54. Mu K., Ding H., Si T. Experimental and numerical investigations on interface coupling of coaxial liquid jets in co-flow focusing // *Phys. Fluids*. 2020. Vol. 32. Article 042103.
55. Mu K., Li G.B., Si T. Instability and interface coupling of coaxial liquid jets in a driving stream // *Phys. Fluids*. 2020. Vol. 32. Article 092107.
56. Mu K., Qiao R., Si T., X Cheng X., Ding H. Interfacial instability and transition of jetting and dripping modes in a co-flow focusing process // *Phys. Fluids*. 2021. Vol. 33. Article 052118.
57. Mu K., Qiao R., Guo J., Yang C., Wu Y., Si T. Parametric study on stability and morphology of liquid cone in flow focusing // *International Journal of Multiphase Flow*. 2021. Vol. 135. Article 103507.
58. López M., Cabezas M.G., Montanero J.M., Herada M.A. On the hydrodynamic focusing for producing microemulsions via tip streaming // *J. Fluid Mech*. 2022. Vol. 934. A47.
59. Gau C., Shen C.H., Wang Z.B. Peculiar Phenomenon of Micro-Free Jet Flow // *Physics of Fluids*. 2009. Vol. 21. No. 9. Article 092001.
60. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко Ю.А., Козлов Г.В., Литвиненко М.В. Дозвуковые круглая и плоская макро- и микроструи в поперечном акустическом поле // *Вестник НГУ. Серия: Физика*. 2010. Т. 5. № 2. С. 28–42.
61. Kozlov V.V., Grek G.R., Dovgal A.V., Litvinenko Y.A. Stability of Subsonic Jet Flows // *Journal of Flow Control, Measurement and Visualization*. 2013. Vol. 1. P. 94–101.
62. Kozlov V.V., Grek G.R., Litvinenko Yu.A. Visualization of conventional and combusting subsonic jet instabilities. Dordrecht: Springer International Publishing, 2016. 126 p.
63. Aniskin V.M., Bountin D.A., Maslov A.A., Mironov S.G., Tsyryulnikov I.S. Investigation of stability of a subsonic gas microjet // *Zh. Tekh. Fiz.* 2012. Vol. 82. No. 2. P. 17–23.
64. Aniskin V.M., Lemanov V.V., Maslov N.A., Mukhin K.A., Terekhov V.I., Sharov K.A. Experimental study of subsonic flow plane mini- and microjets of air // *Tech. Phys. Lett.* 2015. Vol. 41. P. 26–31.
65. Aniskin V.M., Maslov A.A., Mukhin K.A. Structure of subsonic plane microjets // *Microfluidics and Nanofluidics*. 2019. Vol. 23 (4). P. 57.
66. Krivokorytov M.S., Golub V.V., Moralev I.A. Development of instability in gas microjets under an acoustic action // *Pisma Zh. Tekh. Fiz.* 2013. Vol. 39 (18). P. 38–44.
67. Lemanov V.V., Terekhov V.I., Sharov K.A., Shumeiko A.A. Experimental study of submerged jets at low Reynolds numbers // *Pisma Zh. Tekh. Fiz.* 2013. Vol. 39 (9). P. 34–40.
68. Chang C.J., Shen C.H., Gau C. Flow and heat transfer of a micro jet impinging on a heated chip. part i. micro free and impinging jet flow // *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*. 2013. Vol. 17 (1). P. 50–68.
69. Xiaobing L., Wei C., Renxia S., Sheng L. Experimental and numerical investigation of a microjet-based cooling system for high power LEDs // *Heat Transf. Eng.* 2008. Vol. 29 (9). P. 774–781.
70. Hadrys D., Piwnikb J. Welding with microjet cooling as a method of improving, the plastic properties of welds // *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2014. Vol. 87 (5). P. 1170–1176.
71. Rusowicza A., Leszczynski M.J., Grzebieleca A., Laskowski R. Experimental investigation of single-phase microjet cooling of microelectronics // *Arch. Thermodyn.* 2015. Vol. 36 (3). P. 139–147.
72. Carpenter J.-B., Baillot F., Blaisot J.-B., Dumouchel C. Behavior of cylindrical liquid jets evolving in a transverse acoustic field // *Physics of Fluids*. 2009. Vol. 21. Article 023601.
73. Шевченко А.К., Яковенко С.Н. Численное исследование методов управления потоком и эффектов расщепления в круглой затопленной струе // *Теплофизика и аэромеханика*. 2021. Т. 28. № 3. С. 379–395.

REFERENCES

1. Eggers J., Villermaux J. Physics of liquid jets. *Report on Progress in Physics*. 2008, vol. 71, article 036601.
2. Taylor G.I. Generation of ripples by wind blowing over a viscous liquid. In: *The Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor*. Bachelor G.K. ed., 1940, vol. III, pp. 244–254. Cambridge University Press, 1963.
3. Li X.H., Tankin R.S. On the temporal instability of a two-dimensional viscous liquid sheet. *Journal of Fluid Mechanics*. 1991, vol. 226, pp. 425–443.
4. Dasgupta D., Nath S., Bhanja D. A study on dual role of viscosity on the stability of a viscous planar liquid sheet surrounded by inviscid gas streams of equal velocities, and prediction of resulting droplet distribution using maximum entropy formulation. *Physics of Fluids*. 2019, vol. 31 (7), article 074103.
5. Joseph D.D., Funada T., Wang J. Potential flows of viscous and viscoelastic fluids. Cambridge: Cambridge University Press, 2007, 497 p.
6. Padrino J.C., Joseph D.D., Kim H. Viscous effects on Kelvin-Helmholtz instability in a channel. *J. Fluid Mech*. 2011, vol. 680, pp. 398–416.
7. Awasthi M.K., Asthana R., Agrawal G.S. pressure corrections for the potential flow analysis of Kelvin-Helmholtz instability with heat and mass transfer. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2012, vol. 55, no. 9-10, pp. 2345–2352.
8. Awasthi M.K. Kelvin-Helmholtz instability of viscoelastic liquid-viscous gas interface with heat and mass transfer. *International Journal of Thermal Sciences*. 2021, vol. 161, no. 2, article 106710.

9. Awasthi M.K., Agarwal S. Rayleigh-Taylor instability in a spherical configuration: A viscous potential flow approach. *Chinese Journal of Physics*. 2020, vol. 68, pp. 866–873.
10. Awasthi M.K., Agarwal S. Instability of a radially moving cylindrical surface: a viscous potential flow approach. *Journal of Fluids Engineering*. 2020, vol. 142, no. 9, article 09450.
11. Awasthi M.K. Rayleigh-Taylor instability of swirling annular layer with mass transfer. *Journal of Fluids Engineering*. 2019, vol. 141 (7), article 0701202.
12. Awasthi M.K., Sarychev V.D., Nevskii S.A., Kuznetsov M.A., Solodsky S.A. Kelvin-Helmholtz instability of swirling annular layer with heat and mass transfer. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2019, vol. 11 (5), pp. 86–96.
13. Han Y. Kelvin-Helmholtz instability of a confined nano-liquid sheet with the effects of heat and mass transfer and Marangoni convection. *Atomization and Sprays*. 2022, vol. 32, no. 1, pp. 73–89.
14. Bilgili S., Ugarte O., Akkerman V. Interplay of Kelvin-Helmholtz instability with acoustics in a viscous potential flow. *Phys. Fluids*. 2020, vol. 32, article 084108.
15. Granovskij A.Ju., Sarychev V.D., Gromov V.E. Model of internal nanolayers formation under shear flows of materials. *Zhurnal tehnickej fiziki*. 2013, vol. 83, no. 10, pp. 155–158.
16. Sarychev V.D., Granovskij A.Ju., Cheremushkina E.V., Gromov V.E. Model of mixing of layers created during electro-explosive treatment. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenija*. 2013, vol. 10, no. 4, pp. 558–562.
17. Sarychev V.D., Nevskij S.A., Kononov S.V., Granovskij A.Ju. Model of the formation of nanostructures in rail steel during long-term operation. *Matematicheskoe modelirovanie v estestvennyh naukah*. 2015, vol. 1, pp. 394–398.
18. Sarychev V., Nevskii S., Granovskii A., Chinkov D. Simulation of Nanoparticles Formation by Mechanism of Kelvin-Helmholtz Instability. *Int. J. Nanoparticles Nanotech*. 2017, vol. 3, no. 012, pp. 2–10.
19. Sarychev V.D., Nevskij S.A., Kormyshev V.E., Jur'ev A.A., Gromov V.E. Model of formation of nanostructured layers during long-term operation of rails. *Izvestija. Chernaja metallurgija*. 2020, vol. 63, no. 9, pp. 699–706.
20. Sarychev V.D., Nevskii S. A., Kuznetsov M. A. et al. Kelvin-Helmholtz Instability of Cylindrical Geometry for Micro-Dimensional Range of Wavelengths. *Jordan Journal of Physics*. 2022, no. 3, pp. 33–47.
21. Kulikovskij A.G., Shikina I.S. On the effect of viscosity on the stability of tangential rupture in an incompressible fluid. *Vestnik Moskovskogo universiteta*. 1997, no. 6, pp. 29–32.
22. Razumenko L.S., Tkachenko V.I. Instability of the interface of viscous flows. *Vestnik Har'kovskogo universiteta*. 2005, no. 710, pp. 72–80.
23. Aliev I.N., Jurchenko S.O., Nazarova E.V. Features of the combined instability of the charged interface of moving media. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 2007, vol. 80, no. 5, pp. 64–69.
24. Aliev I.N., Jurchenko S.O. On the issue of instability of the interface between two media of finite thickness. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 2007, vol. 80, no. 6, pp. 127–133.
25. Shirjaeva S.O., Grigor'ev A.I., Suhanov S.A. On the role of fluid viscosity in the realization of Kelvin-Helmholtz instability. *Jelektronnaja obrabotka materialov*. 2013, vol. 49, pp. 56–61.
26. Grigor'ev A.I., Shirjaeva S.O. On finding analytical expressions for decrements in the asymptotics of a low-viscosity fluid. *Zhurnal tehnickej fiziki*. 2013, vol. 83, no. 10, pp. 18–25.
27. Senecal P.K., Schmidt D.P., Nouar I., Rutland C.J., Reitz R.D., Corradini M.L. Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization. *International Journal of Multiphase Flow*. 1999, vol. 25, pp. 1073–1097.
28. Sirignano W.A., Edwards C.F. Fluid dynamics and transport of droplets and sprays. Cambridge University Press, 2010, 462 p.
29. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. *Nanostrukturirovannye materialy, poluchennye sil'noj plasticheskoj deformaciej*. Moscow: Logos, 2000, 272 p.
30. Glezer A.M., Kozlov E.V., Koneva N.A., Popova N.A., Kurzina I.A. Plastic deformation of nanostructured materials. N.-Y.: Taylor & Francis Group, 2017, 323 p.
31. Kulagin R., Beygelzimer Y., Ivanisenko Y., Mazilkin A., Straumal B., Hahn H. Instabilities of interfaces between dissimilar metals induced by high pressure torsion. *Materials Letters*. 2018, vol. 222, no. 1, pp. 172–175.
32. Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure modification in the surface layers of railway rails and wheels. *Steel tech*. 2008, vol. 3, no. 1, pp. 19–23.
33. Baumann G., Fecht H.J., Liebelt S. Formation of white-etching layers on rail treads. *Wear*. 1996, vol. 191, pp. 133–140.
34. Österle R., Pyzalla A., Wang L.W., Oesterle W., Rook H., Pyzalla A., Wang L., Österle W., Rook H., Pyzalla A., et al. Investigation of white etching layers on rails by optical microscopy, electronmicroscopy. *X-ray and synchrotron X-ray diffraction. Mater. Sci. Eng. A*. 2001, vol. 303, pp. 150–157.
35. Wild Wang L., Hasse B., Wroblewski T., Goerigk G., Pyzalla A.E. Microstructure alterations at the surface of a heavily corrugated rail with

- strong ripple formation. *Wear*. 2003, vol. 254, pp. 876–883.
36. Zhang H.W., Ohsaki S., Mitao S., Ohnuma M., Hono K. Microstructural investigation of white etching layer on pearlite steel rail. *Mater. Sci. Eng. A*. 2006, vol. 421, pp. 191–199.
 37. Takahashi J., Kawakami K., Ueda M. Atom probe tomography analysis of the white etching layer in a rail track surface. *Acta Mater*. 2010, vol. 58, pp. 3602–3612.
 38. Lojkowski W., Djahanbakhsh M., Bürkle G., Gierlotka S., Zielinski W., Fecht H.J. Nanostructure formation on the surface of railway tracks. *Mater. Sci. Eng. A*. 2001, vol. 303, pp. 197–208.
 39. Ishida M. Rolling contact fatigue (RCF) defects of rails in Japanese railways and its mitigation strategies. *Electron. J. Struct. Eng.* 2013, vol. 13, pp. 67–74.
 40. Steenbergen M., Dollevoet R. On the mechanism of squat formation on train rails. Part I: Origination. *Int. J. Fatigue*. 2013, vol. 47, pp. 361–372.
 41. Pal S., Valente C., Daniel W., Farjoo M. Metallurgical and physical understanding of rail squat initiation and propagation. *Wear*. 2012, vol. 284–285, pp. 30–42.
 42. Johnson K.L. Contact mechanics. Cambridge University Press, 1987, 510 p.
 43. Rubcov V.E., Tarasov S.Ju., Kolubaev A.V. One-dimensional model of inhomogeneous shear under sliding friction. *Fizicheskaja mezhmehanika*. 2012, vol. 15, no. 4, pp. 103–103.
 44. Tarasov S.Ju., Rubcov V.E., Kolubaev A.V., Gorbatenko V.V. Analysis of microscopic deformation fields during sliding friction. *Izvestija vuzov. Fizika*. 2013, vol. 56, no. 7-2, pp. 350–355.
 45. Rubcov V.E., Tarasov S.Ju., Kolubaev A.V. Inhomogeneity of deformation and shear instability of the material under friction. *Izvestija vuzov. Fizika*. 2011, no. 11-3, pp. 215–220.
 46. Ivanov Y.F., Glezer A.M., Sundeev R.V., Kuznetsov R.V., Gromov V.E., Shliarova Y.A., Semin A.P. Fine structure formation in rails under ultra long-term operation. *Materials Letters*. 2022, vol. 309, article 131378.
 47. Straumal B.B., Kulagin R., Klinger L., Rabkin E., Straumal P.B., Kogtenkova O.A., Baretzky B. Structure refinement and fragmentation of precipitates under severe plastic deformation. A Review. *Materials*. 2022, vol. 15, article 601.
 48. Sarychev V.D., Nevskii S.A., Kormyshev V.E., Yur'ev A.A., Gromov V.E. Model of nanostructural layer formation during long-term operation of rails. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 9, pp. 699–706.
 49. Barrero A., Loscertales I. Micro- and Nanoparticles via Capillary Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2007, vol. 39, no. 1, pp. 89–106.
 50. Anna S.L. Droplets and bubbles in microfluidic devices. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2016, vol. 48, pp. 285–309.
 51. Gañán-Calvo A.M. Generation of steady liquid micro threads and micron-sized monodisperse sprays in gas streams. *Phys. Rev. Lett.* 1998, vol. 80, pp. 285–288.
 52. Gordillo J.M., Pérez-Saborid M., Gañán-Calvo A.M. Linear stability of co-flowing liquid – gas jets. *Journal of Fluid Mechanics*. 2001, vol. 448, pp. 23–51.
 53. Si T., Li F.A., Yin X.I.Y., Yin X.Z. Modes in flow focusing and instability of coaxial liquid-gas jets. *J. Fluid Mech.* 2009, vol. 629, pp. 1–23.
 54. Mu K., Ding H., Si T. Experimental and numerical investigations on interface coupling of coaxial liquid jets in co-flow focusing. *Phys. Fluids*. 2020, vol. 32, article 042103.
 55. Mu K., Li G.B., Si T. Instability and interface coupling of coaxial liquid jets in a driving stream. *Phys. Fluids*. 2020, vol. 32, article 092107.
 56. Mu K., Qiao R., Si T., X Cheng X., Ding H. Interfacial instability and transition of jetting and dripping modes in a co-flow focusing process. *Phys. Fluids*. 2021, vol. 33, article 052118.
 57. Mu K., Qiao R., Guo J., Yang C., Wu Y., Si T. Parametric study on stability and morphology of liquid cone in flow focusing. *International Journal of Multiphase Flow*. 2021, vol. 135, article 103507.
 58. López M., Cabezas M.G., Montanero J.M., Herada M.A. On the hydrodynamic focusing for producing microemulsions via tip streaming. *J. Fluid Mech.* 2022, vol. 934, A47.
 59. Gau C., Shen C.H., Wang Z.B. Peculiar phenomenon of micro-free jet flow. *Physics of Fluids*. 2009, vol. 21, no. 9, article 092001.
 60. Kozlov V.V., Grek G.R., Litvinenko Yu.A., Kozlov G.V., Litvinenko M.V. Subsonic round and plain macro and micro jets in a transverse acoustic field. *Vestnik NGU. Seriya: Fizika*. 2010, vol. 5, no. 2, pp. 28–42.
 61. Kozlov V.V., Grek G.R., Dovgal A.V., Litvinenko Y.A. Stability of Subsonic Jet Flows. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*. 2013, vol. 1, pp. 94–101.
 62. Kozlov V.V., Grek G.R., Litvinenko Yu.A. *Visualization of conventional and combusting subsonic jet instabilities*. Dordrecht: Springer International Publishing, 2016, 126 p.
 63. Aniskin V.M., Bountin D.A., Maslov A.A., Mironov S.G., Tsyryulnikov I.S. Investigation of stability of a subsonic gas microjet. *Zh. Tekh. Fiz.* 2012, vol. 82 (2), pp. 17–23.
 64. Aniskin V.M., Lemanov V.V., Maslov N.A., Mukhin K.A., Terekhov V.I., Sharov K.A. Experimental study of subsonic flow plane mini- and microjets of air. *Tech. Phys. Lett.* 2015, vol. 41, pp. 26–31.

65. Aniskin V.M., Maslov A.A., Mukhin K.A. Structure of subsonic plane microjets. *Microfluidics and Nanofluidics*. 2019, vol. 23 (4), pp. 57.
66. Krivokorytov M.S., Golub V.V., Moralev I.A. Development of instability in gas microjets under an acoustic action. *Pisma Zh. Tekh. Fiz.* 2013, vol. 39 (18), pp. 38–44.
67. Lemanov V.V., Terekhov V.I., Sharov K.A., Shumeiko A.A. Experimental study of submerged jets at low Reynolds numbers. *Pisma Zh. Tekh. Fiz.* 2013, vol. 39 (9), pp. 34–40.
68. Chang C.J., Shen C.H., Gau C. Flow and heat transfer of a micro jet impinging on a heated chip. Part I. Micro free and impinging jet flow. *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*. 2013, vol. 17 (1), pp. 50–68.
69. Xiaobing L., Wei C., Renxia S., Sheng L. Experimental and numerical investigation of a microjet-based cooling system for high power LEDs. *Heat Transf. Eng.* 2008, vol. 29 (9), pp. 774–781.
70. Hadrys D., Piwnikb J. Welding with microjet cooling as a method of improving, the plastic properties of welds. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2014, vol. 87 (5), pp. 1170–1176.
71. Rusowicza A., Leszczynski M.J., Grzebieleca A., Laskowski R. Experimental investigation of single-phase microjet cooling of microelectronics. *Arch. Thermodyn.* 2015, vol. 36 (3), pp. 139–147.
72. Carpenter J.-B., Baillot F., Blaisot J.-B., Dumouchel C. Behavior of cylindrical liquid jets evolving in a transverse acoustic field. *Physics of Fluids*. 2009, vol. 21, no. 023601.
73. Shevchenko A.K., Yakovenko S.N. Numerical investigation of flow control methods and splitting effects in a round submerged jet. *Teplofizika i aeromekhanika*. 2021, vol. 28, no. 3, pp. 379–395.

Сведения об авторах

Владимир Дмитриевич Сарычев, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: sarychev_vd@mail.ru

Information about the authors:

Vladimir D. Sarychev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: sarychev_vd@mail.ru

© 2022 г. В.Д. Сарычев

Поступила в редакцию 21 февраля 2022 г.

УДК 620.17:621.791

ПРАКТИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ СВАРОЧНЫМИ МЕТОДАМИ

С. В. Райков¹, Ю. А. Шлярова²

¹ООО «Вест 2002» (Россия, 654041, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Бардина, 21)

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

Аннотация. Описана технология восстановления и защиты зубчатых передач, изношенных шестеренок сварочным методом. Приведены сведения о сварочных материалах, применяемых для восстановления зубчатых передач. Показаны примеры восстановленных зубьев и шестеренок.

Ключевые слова: зубчатые передачи, шестеренки, сварочный метод, восстановление, защита

Для цитирования: Райков С.В., Шлярова Ю.А. Практика восстановления зубчатых передач сварочными методами // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 2 (40). С. 39 – 46.

PRACTICE OF RECOVERY OF GEARS BY WELDING METHODS

S. V. Raikov¹, Yu. A. Shlyarova²

¹ООО "Vest 2002" (42 Bardina Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

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

Abstract. The technology of restoration and protection of gears, worn gears by welding is described. Provides information about the welding materials used in the restoration of gears. Examples of restored teeth and gears are shown.

Keywords: gears, gears, welding method, restoration, protection

For citation: Raikov S. V., Shlyarova Yu. A. Practice of recovery of gears by welding methods. *Bulletin of SibSIU*. 2022, no. 2 (40), pp.. 39 – 46 (In Russ.).

Введение

Направление сварочного производства, связанное с разработкой и применением технологий ремонта, восстановления и создания покрытий со специальными свойствами на поверхностях деталей машин, приобрело особую актуальность в России за последние десятилетия. Это связано с поступлением на горнодобывающие и горно-шахтные предприятия значительного количества импортной техники (экскаваторы, бульдозеры, грейферы, дробилки и т.д.). Приобретаемое оборудование не имеет ремонтного фонда, а изменившийся налоговый кодекс ограничивает складские ресурсы. В этих случаях наличие мобильных технологий ремонта поврежденных деталей машин, позволяющих про-

водить ремонт непосредственно рядом с техникой (даже в полевых условиях), имеет актуальное значение. Такие технологии начали поставляться в Россию в начале 90-х годов. Они основаны на использовании мобильных инверторных сварочных источников питания и применения сварочных и наплавочных материалов как российского, так и импортного производства. Некоторые производители материалов осуществляли сопровождение технологии ремонта с обучением персонала приемам подготовки поверхности и тактике нанесения покрытий.

Практика показала, что одним из эффективных направлений ремонта деталей машин стало использование технологических приемов восстановления

геометрии зубчатых передач сварочными методами. Зачастую незначительное разрушение профиля зубьев шестерен (попадание инородных предметов, нарушение соосности, отсутствие смазки и т.д.) при значительных габаритах агрегата приводит к аварийной остановке машины и необходимости полной замены поврежденного агрегата. Убеждение технического персонала, обслуживающего машины, что невозможно осуществлять ремонта выломанных зубьев и создавать работоспособный профиль шестерни, связано с отсутствием практики использования современных технологий и материалов.

По сути процесс восстановления профиля выломанных или изношенных зубьев разделяется на следующие этапы:

- удаление дефектной области металла (наклеп, деформация и др.) специальными методами (например, воздушно-дуговая резка (ВДР), плазменная строжка, использование разделочных электродов);

- восстановление («лечение») опорной платформы под зуб материалами с повышенной пластичностью (относительное удлинение более 30 %);

- формирование профиля зуба материалами, обеспечивающими свойства поверхности в соответствии с условиями эксплуатации;

- окончательная обработка поверхности зуба по шаблону с небольшим припуском на обкатку;

- обкатка профиля зуба на холостом ходу.

В таблице приведены марки сварочных материалов, используемых для проведения ремонта зубчатых передач [1 – 4].

Вид и марка применяемых сварочных материалов определяются размерами восстанавливаемого изделия, сложностью профиля зуба и условиями эксплуатации создаваемой поверхности.

Технико-экономические показатели. Наплавка и последующее упрочнение изношенных зубьев позволяют продлить срок эксплуатации и сократить расходы, связанные с покупкой новых деталей.

При заключении договора на выполнение ремонта дается гарантийное обязательство (конкретно для каждого узла), определяемое условиями эксплуатации и степенью изношенности оборудования. Рассмотрим некоторые примеры выполненных ремонтов.

Ниже приведены параметры и на рис. 1 показаны изношенная и восстановленная шестеренка.

Предприятие / Цех	Шахта Юбилейная-Н г. Новокузнецк
Агрегат	Редуктор транспортирующего конвейера
Деталь	Передачный вал
Масса детали	50 кг
Материал детали	
Контртело	Шестерня-колесо
Основной вид износа	Откол зубьев (усталость металла)
Срок службы	3 года
Рабочая среда	Масло ($T = 10 \div 30 \text{ }^\circ\text{C}$)

Технология восстановления. Зуб восстанавливается по шаблону с припуском под упрочнение 0,5 – 1,0 мм. Твердость после наплавки 200 НВ. Твердость после холодного упрочнения в процессе работы до 450 – 500 НВ. Прикатка зуба производится на холостом ходу. В случае необходимости проводится восстановление профиля соседних зубьев по шаблону с повышением твердости рабочей поверхности.

Ниже приведены параметры и на рис. 2 показаны изношенная шестеренка и восстановление профиля.

Предприятие / Цех	Шахта Юбилейная-Н г. Новокузнецк
Агрегат	скрепковый конвейер СПЦ-271
Деталь	звездочки
Масса детали	160 кг
Материал детали	
Контртело	Цепь
Основной вид износа	Откол зубьев (усталость металла)
Срок службы	2 года

Технология восстановления. Перед восстановительными работами необходимо провести механическую обработку места откола зуба на глубину не менее 5 мм.

Выточенный по чертежу зуб (с припуском под наплавку рабочего слоя), приваривается к звездочке. Затем проводится наплавка рабочего слоя зуба с помощью шаблона до окончательных размеров. Прикатка зубьев осуществляется на холостом ходу агрегата. Максимальная твердость рабочей поверхности составляет 40 – 45 HRC.

Ниже приведены параметры и на рис. 3 показаны трещины на отдельных частях экскаватора ЭШ-15/90 (эксплуатация на ОАО «Южный Кузбасс» – «Сибиргинский разрез»).

Цех (участок)	Сибиргинский разрез
Агрегат (Сооружение)	Экскаватор ЭШ 15/90 Зав.№ 88
Деталь	Венец механизма поворота
Материал детали	
Дефектность	Трещины между зубьями
Рабочая среда (контртело)	Большие динамические нагрузки

Технология ремонта. Работу проводили в полевых условиях без снятия дефектных зубчатых обойм. Расположение трещин определяли с помощью ультразвукового и цветового контроля. Выполнена полная разделка образовавшихся трещин с помощью воздушно-дуговой и плазменной резки. Все сварные швы образованы материалами аустенитного класса с повышенным содержанием никеля (что способствует большей пластичности сварных швов). В процессе сварки проводился предварительный и последующий подогрев.

Сведения о сварочных материалах, используемых для восстановления зубчатых передач
Information about welding materials used to restore gears

№	Марка, описание	Классификация	Технология сварка	Содержание элементов, %, в наплавленном металле	Механические свойства наплавленного металла
1	<p>EnDotec DO*02 (Castolin&Eutectic) Порошковая проволока для сварки мартенситных, аустенитных, аустенитных нержавеющей сталей. Наплавленный металл коррозионноустойчивый, склонен к самоупрочнению (наклеп) в процессе работы.</p> <p>Окалиностойкость до 600 °С. Температура эксплуатации до -80 °С. Подходит для упрочняющей наплавки и наплавки подслоев на закаливаемые стали.</p>	<p>DIN 8556: ~SG X15 CrNiMn 18 8 DIN 8555: MF8 – 200 – KNPZ W-N°: 1,4370 AWS A522: ~E370T1-4</p>	<p>Предварительный подогрев зависит от эквивалента углерода (C) и размера свариваемых деталей. Стали, содержащие 12 – 14 % Mn, не требуют подогрева, температура детали во время сварки не должна превышать 250 °С. Сваривать короткой, струйной или импульсной дугой, предпочтительно Puls-Arc техникой. Контролировать температуру промежуточных слоев – 150 °С.</p> <p>Сварочные позиции: все кроме PG(f). Вид тока: =(+) Защитный газ: EN 439-M21 (5 – 25 % CO₂ – ост % Ar)</p>	<p>C – 0,05 Si < 0,8 Mn – 2,5 Cr – 18,0 Ni – 8,2</p>	<p>σ_T – 390 МПа σ_B – 650 МПа δ – 35 % KCV(20 °С) – 70 Дж HB – 310</p>
2	<p>EnDotec DO*05 (Castolin&Eutectic) Порошковая проволока на основе сплава FeMnCr. Наплавленный металл коррозионноустойчивый, самоупрочняется в процессе работы, устойчив против ударных нагрузок и высокого давления. Возможна многослойная наплавка без образования трещин. Высокая вязкость сплава. Обрабатывается режущим инструментом.</p>	<p>DIN 8555: MF7 – 400 – GKP</p>	<p>Предварительный подогрев зависит от эквивалента углерода (C) и размера свариваемых деталей. Стали, содержащие 12 – 14 % Mn, не требуют подогрева, температура детали во время сварки не должна превышать 250 °С. Контролировать температуру промежуточных слоев – 150 °С.</p> <p>Сварочные позиции: PA. PB. PC. Вид тока: =(+) Защитный газ: EN 439-M21 (5 – 25 % CO₂ – ост % Ar)</p>		<p>σ_T – 420 МПа σ_B – 650 МПа δ – 35 % KCV(20 °С) – 75 Дж HB – 400</p>
3	<p>Castolin XHD 646 (Castolin&Eutectic) Высокопроизводительный электрод с высоколегированным стержнем на основе сплава CrNiMn. Наплавленный металл окалиностойкий до 900 °С, не склонен к образованию горячих трещин и самонаклепывается в процессе работы. Имеет высокую ударную вязкость и пластичность.</p>	<p>DIN 8555: E8 – UM - 200 – CKZ</p>	<p>Предварительный подогрев зависит от эквивалента углерода (C) и размера свариваемых деталей. Аустенитные марганцовистые стали сваривать без предварительного подогрева в холодном состоянии.</p> <p>Сварочные позиции: PA. PB. PC. Вид тока: =(+)или~</p>	<p>C – 0,08 Si < 1,0 Mn – 7,2 Cr – 18,5 Ni – 8,5</p>	<p>σ_T – 500 МПа σ_B – 650 МПа δ – 30 % KCV(20 °С) – 55 Дж HB – 430</p>

4	OK Autrod 16.95 (ESAB) Проволока сплошного сечения коррозионностойкая на основе сплава CrNiMn. Самоупрочняется в процессе работы, устойчив против ударных нагрузок и высокого давления. Возможна многослойная наплавка без образования трещин.	G 18 8 Mn/ EN 12072	Аналог проволоки Св-08Х20Н9Г7Т Сварочные позиции: РА. РВ. РС. Вид тока: =(+) EN 439-М12 (5 % CO ₂ – ост % Ar)	C – 0,1 Si < 1,2 Mn – 6,5 Cr – 18,5 Ni – 8,5	σ _т – 450 МПа σ _в – 640 МПа δ – 41 % КCV(20 °С) –130 Дж НВ – 380
5	OK 67.60 (ESAB) Электрод предназначен для сварки низкоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей перлитного класса с высоколегированными сталями аустенитного класса, а также для наплавки переходных слоев при сварке изделий из двухслойных сталей, плакированных высоколегированным слоем типа 12Х18Н10Т.	ISO 3581-A: E22 12 L R 3 2 AWS A5.4: E309L-17 EN 12072: G18 8 Mn	Покрытие: кисло-рутиловое Содержание ферритной фазы в металле шва 5,5 – 13 % Вид тока: =(+)или ` Пространственное положение: 1, 2, 3, 4, 6.	C – 0,03 Si < 0,8 Mn – 0,9 Cr – 23,7 Ni – 12,4 P < 0,025 S < 0,020	σ _т – 470 МПа σ _в – 580 МПа δ – 32 % КCV(20 °С) –63 Дж НВ – 400
6	LNM 307 (LINCOLN ELECTRIC) Проволока сплошного сечения для аргонодуговой и полуавтоматической сварки трудносвариваемых сталей. Используется для формирования буферных слоев при наплавке.	AWS A5.9: ER309 EN 12072: G18 8 Mn	Аналог проволоки Св-08Х20Н9Г7Т Сварочные позиции: РА. РВ. РС. Вид тока: =(+) EN 439-М12 (5 % CO ₂ – ост. % Ar)	C – 0,05 Si < 0,5 Mn – 1,8 Cr – 24,0 Ni – 13,5 Mo – 0,2	σ _т – 400 МПа σ _в – 630 МПа δ – 40 % КCV(20 °С) –80 Дж НВ – 410
7	OK GPC (OK 21.03) (ESAB) Электрод предназначен для строжки, резки и прошивки отверстий в нелегированных и легированных сталях, чугунах, а также материалах, не содержащих в своем составе железо (за исключением чистой меди) от стандартных источников питания РДС.		Вид тока: ~/ =(-) Пространственное положение: 1, 2, 3, 5, 6. Напряжение холостого хода: 70 В.		
8	OK Carbon (ESAB) Омедненный графитовый электрод, предназначенный для ВДР и строжки металла. В отличие от ОК GPC данный процесс обладает значительно более высокой производительностью, так как расплавленный металл удаляется потоком сжатого воздуха, подаваемого в специальный держатель для ВДР.		Вид тока: ~/ =(-) Пространственное положение: 1, 2, 3, 5, 6 Напряжение холостого хода: 70 В		

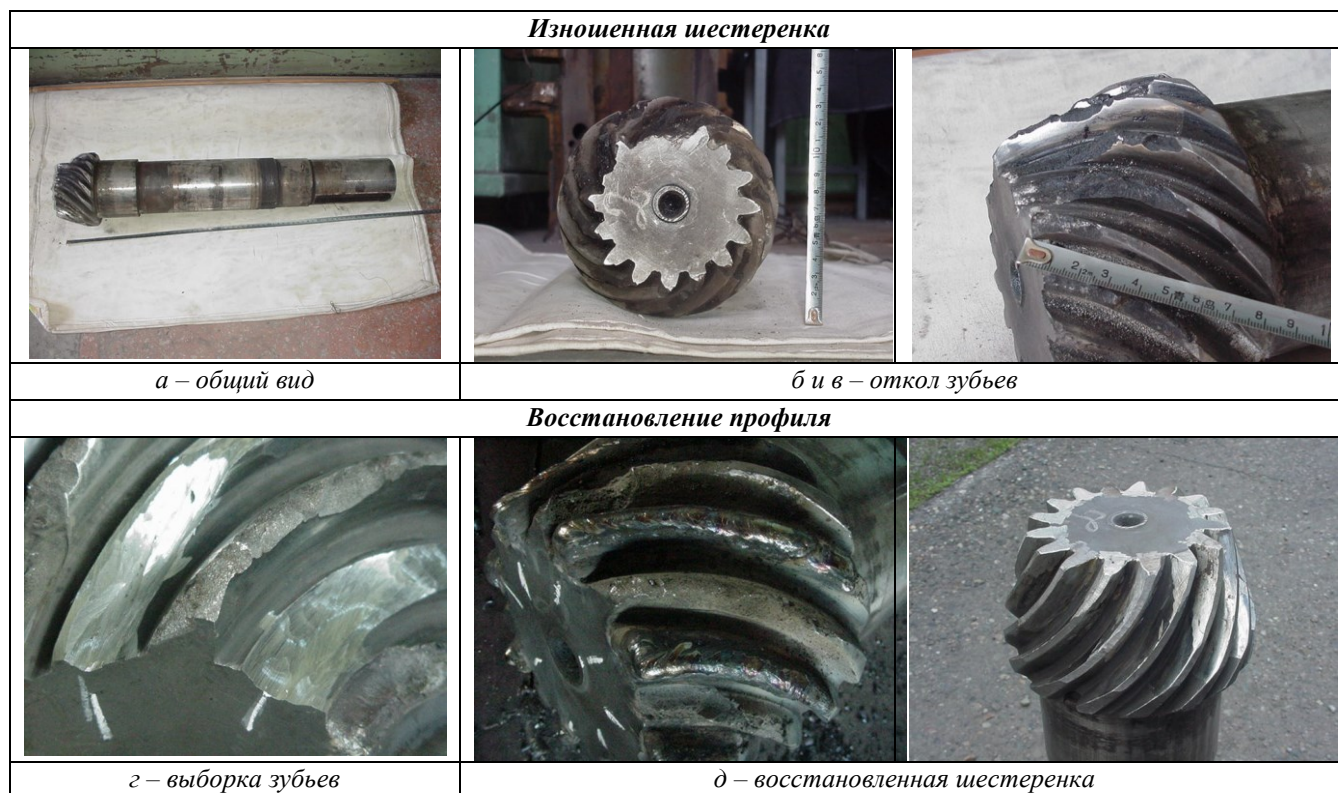


Рис. 1. Общий вид (а) и откол зубьев (б, в) изношенной шестеренки, выборка зубьев (г), восстановленная шестеренка (д, е)
 Fig. 1. General view (a) and tooth breakage (б, в) of a worn gear, tooth sampling (г), restored gear (д, е)

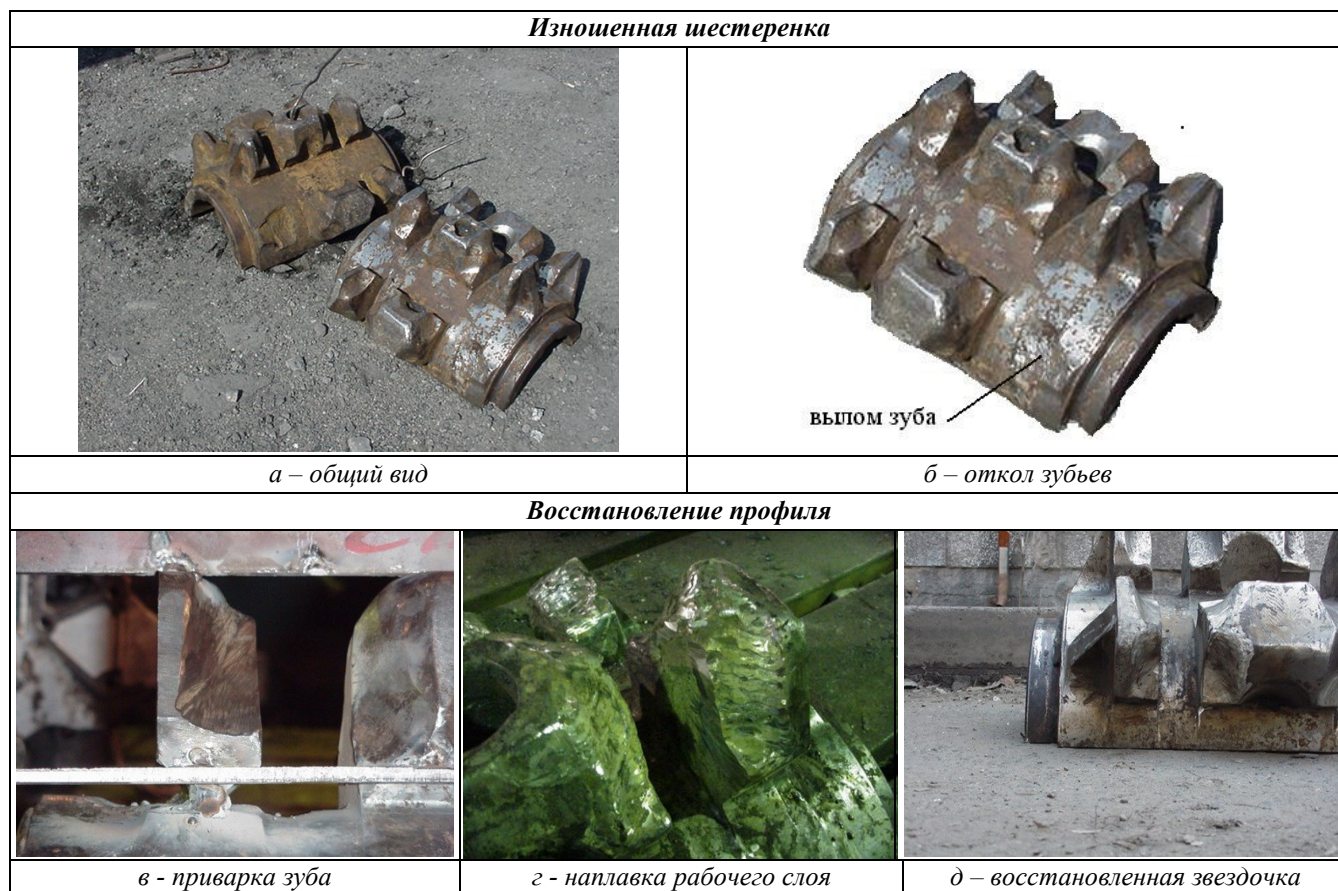


Рис. 2. Общий вид (а), откол зубьев (б) изношенной шестеренки и восстановление профиля (приварка зуба (в), наплавка рабочего слоя (г), восстановленная звездочка (д))
 Fig. 2. General view (a), tooth breakage (б) of a worn gear and restoration of the profile (welding of the tooth (в), surfacing of the working layer (г), restored sprocket (д))



Рис. 3. Общий вид экскаватора ЭШ-15/90 (а) и виды трещин (б – г)
 Fig. 3. General view of the excavator ESH-15/90 (a) and types of cracks (б – г)

На рис. 4 показан общий вид и отдельные части шестерни (малая) сборки редуктора напора экскаватора ЭКГ 5.

Выводы

Рассмотрена технология восстановления шестеренок и зубьев шестеренки сварным методом. Приведена технология ремонта отдельных частей экскаватора ЭШ-15-90. Показано восстановление зубьев шестерен сборки редуктора напора экскаватора ЭКГ 5. Представлены сведения о сварных материалах, используемых для восстановления зубчатых передач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каталог наплавочных материалов Castolin&Eutectic. Швейцария. 2000. 115 с.
2. Каталог продукции ESAB. Сварочные материалы. М.: 2016. 268 с.

3. Каталог сварочного оборудования и материалов Lincoln Electric. Апекс. М.: 2012. 172 с.
4. Каталог. Электроды для ручной дуговой сварки. Лосиноостровский электродный завод. М.: 118 с.

REFERENCES

1. Catalog of Castolin&Eutectic surfacing materials. Switzerland. 2000, 115 p.
2. ESAB product catalog. Welding materials. Moscow: 2016, 268 p.
3. Catalog of welding equipment and materials of Lincoln Electric. Apex. Moscow: 2012, 172 p.
4. Catalog. Electrodes for manual arc welding. Losinoostrovsky electrode plant. Moscow: 118 p.



Рис. 4. Восстановление зубьев шестерен сборки редуктора напора экскаватора ЭКГ 5:
а – общий вид шестерни; *б* – выров из тела шестерни 40 мм; *в*, *г* – длина и ширина зуба шестерни;
д, *е* – высота зуба шестерни
Fig. 3. Restoration of gear teeth of the EKG 5 excavator pressure reducer assembly:
а – general view of the gear; *б* – 40 mm out of the gear body; *в*, *г* – the length and width of the gear tooth;
д, *е* – the height of the gear tooth

Сведения об авторах

Сергей Валентинович Райков, д.т.н., доцент,
генеральный директор, ООО «Вест 2002»

E-mail: raykov_s_v@mail.ru

Юлия Андреевна Шлярова, аспирантка кафедры
естественнонаучных дисциплин им. проф.
В.М. Финкеля, Сибирский государственный ин-
дустриальный университет

ORCID: 0000-0001-5677-1427

E-mail: rubannikova96@mail.ru

Information about the authors

Sergei V. Raikov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Profes-
sor, General Director, West 2002 LLC

E-mail: raykov_s_v@mail.ru

Yuliya A. Shlyarova, postgraduate student of the
Department of Natural Sciences n.a. Professor V.M.
Finkel, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0001-5677-1427

E-mail: rubannikova96@mail.ru

© 2022 г. С.В. Райков, Ю.А. Шлярова
Поступила в редакцию 21 декабря 2021 г.

УДК 536.42:539.25:538.331

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА CrMnFeCoNi ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОННО- ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ

С. В. Коновалов¹, Ю. Ф. Иванов², В. Е. Громов³, Ю. А. Шлярова³,
О. А. Кондратова³, А. В. Кириллова¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34)

²Институт сильноточной электроники СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический 2/3)

³Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Для высокоэнтропийного сплава (ВЭС) CoCrFeMnNi неэквивалентного состава, полученного методом проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM), сняты и проанализированы кривые деформации при растяжении образцов после изготовления и электронно-пучковой обработки (ЭПО). Установлены зависимости предела прочности и относительного удлинения, микротвердости от плотности энергии пучка электронов. Обнаружено, что уменьшение предела прочности и относительного удлинения усиливается с ростом плотности энергии пучка электронов. Выявлены ямочный характер излома и наличие микропор, микрорасслоений. Показаны области с полосовой (пластинчатой) структурой, площадь которой увеличивается с ростом плотности пучка электронов от 25 % при 10 Дж/см² до 65 % при 30 Дж/см². С ростом плотности энергии пучка электронов изменяется толщина расплавленного слоя в пределах 0,8 – 5,0 мкм, а средний размер ячеек кристаллизации увеличивается от 310 нм при 15 Дж/см² до 800 нм при 30 Дж/см². Установлено немонотонное изменение скалярной плотности дислокаций, достигающее максимального значения (примерно $5,5 \cdot 10^{10}$ см⁻²) на расстоянии 25 мкм от поверхности облучения. Показано, что в поверхностном слое формируется неразориентированная ячеистая дислокационная субструктура с размерами ячеек от 400 до 600 нм. При удалении от поверхности дислокационная субструктура меняется с ячеистой к ячеисто-сетчатой и на расстоянии 120 – 130 мкм к субструктуре исходного сплава с хаотическим распределением дислокаций. Высказано предположение, что дефекты, образующиеся в поверхностных слоях при ЭПО, могут быть одной из причин снижения предельных значений прочности и пластичности ВЭС.

Ключевые слова: импульсный электронный пучок, ВЭС, элементный состав, фазовый состав, дефектная субструктура, свойства

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 20-19-00452.

Для цитирования: Кириллова А.В., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Шлярова Ю.А., Кондратова О.А. Структурно-фазовые состояния и свойства высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi после электронно-пучковой обработки // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 2 (40). С. 47 – 56.

STRUCTURAL-PHASE STATES AND PROPERTIES OF HIGH-ENTROPY CrMnFeCoNi ALLOY AFTER ELECTRON BEAM TREATMENT

S. V. Konovalov¹, Y. F. Ivanov², V. E. Gromov³, Y. A. Shlyarova³,
O. A. Kondratova³, A. V. Kirillova¹

¹Samara National Research University (34 Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation)

²Institute of High Current Electronics SB RAS (2/3 Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation)

³Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. For CoCrFeMnNi high-entropy alloy (HEA) of non-equiatomic composition, obtained by means of wire-arc additive manufacturing (WAAM), tensile strain curves of the samples after manufacturing and after electron beam processing (EBP) have been recorded and analyzed. Dependences of tensile strength and elongation, microhardness on electron beam energy density have been established. It has been found that decrease in ultimate strength and relative elongation increases with an increase in electron beam energy density. The dimple rupture and presence of micropores and microstratifications are revealed. Regions with a stripe (plate) structure are shown, the area of which increases with an increase in electron beam density from 25% at 10 J/cm² to 65% at 30 J/cm². With an increase in electron beam energy density, thickness of molten layer changes within (0.8 – 5.0) μm, and the average size of crystallization cells increases from 310 nm at 15 J/cm² to 800 nm at 30 J/cm². Nonmonotonic change in scalar density of dislocations has been established, reaching the maximum value (of ~5.5·10¹⁰ cm⁻²) at a distance of 25 μm from the irradiation surface. It is shown that non-misoriented cellular dislocation substructure with cell sizes from 400 nm to 600 nm is formed in the surface layer. Moving away from the surface, dislocation substructure changes from cellular to cellular-reticular and, at distance of 120 – 130 μm, to the original alloy substructure with chaotic distribution of dislocations. It has been suggested that the defects formed in the surface layers during EBT may be one of the reasons for decreasing extreme values of strength and ductility of HEA.

Keywords: Pulsed electron beam, HEA, elemental composition, phase composition, defective substructure, properties

Funding. The work was supported by a grant of the Russian Science Foundation, project no. 20-19-00452.

For citation: Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Grmov V.E., Shlyarova Yu.A., Kondratova O.A., Kirillova A.V. Structural-phase states and properties of high-entropy CrMnFeCoNi alloy after electron-beam processing. *Bulletin of SibSIU*. 2022, no. 2 (40), pp. 47 – 56 (In Russ.).

Введение

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС), привлекающие внимание ученых в последние годы, в отличие от традиционных сплавов состоят из пяти и более основных элементов с процентным содержанием от 5 до 35 % (атом.) [1 – 5]. Атомы всех элементов считаются атомами растворенного вещества, вызывают деформацию кристаллической структуры и улучшают термодинамическую стабильность свойств, связанных с различиями в атомных радиусах компонентов [6 – 8].

В работах [1, 9 – 12] описаны микроструктура, свойства, термодинамика ВЭС, рассмотрены результаты моделирования их структуры и обсуждены новые варианты методов получения многокомпонентных сплавов. Выявлено, что в ВЭС возможно формирование наноразмерных структур и даже аморфных фаз вследствие значительных искажений решетки, обусловленных различием атомных радиусов элементов замещения [1, 11].

Результаты исследования высокоэнтропийного сплава CoCrFeMnNi показали его способность сохранять гранецентрированную кубическую структуру в широком диапазоне температур, а также обладание хорошим балансом прочности и пластичности [13]. В работе [14] продемонстрировано, что рассматриваемый сплав одновременно демонстрирует увеличение прочности при комнатной температуре и вязкости при криогенной температуре (77 К) в результате доминирования двойникового в качестве механизма деформации. Однако недостатком сплавов системы

CoCrFeMnNi является относительно низкий предел текучести при комнатной температуре.

Электронно-пучковая обработка является одним из перспективных методов поверхностной модификации металлических материалов, приводящая к значительному увеличению механических свойств всего материала [15]. Характеристики металлов и сплавов могут вырасти в 20 раз, что значительно превышает эффективность традиционных видов обработки [16]. В процессе облучения пучки электронов высокой плотности за чрезвычайно короткий промежуток времени вызывают различные явления в поверхностном слое, такие как высокоскоростная рекристаллизация, сглаживание поверхности и отжиг, пластическая деформация приповерхностного слоя [17, 18].

В работе [19] показано, что износостойкость, микротвердость, нанотвердость и коррозионные свойства сплава CoCrFeNiMo_{0.2} претерпели значительное увеличение в результате воздействия электронным пучком. Облучение высокоточным электронным пучком сплава NiCoCrAlYSi в работе [20] привело к формированию плотного переплавленного поверхностного слоя и удалению исходных дефектов, возникших при лазерной наплавке. Ранее было показано, что электронно-пучковая обработка приводит к гомогенизации химического состава высокоэнтропийного сплава системы CoCrFeMnNi [21]. Целью настоящей работы является исследование структурно-фазового состояния, дефектной субструктуры, поверхности разрушения и свойств

Элементный состав участка образца ВЭС
Elemental composition of the zone of HEA sample

Элемент	Содержание элемента	
	до облучения	после облучения $E_s = 30 \text{ Дж/см}^2$
Cr K	14,3/15,5	14,3/15,5
Mn K	3,0/3,1	3,0/3,1
Fe K	38,4/38,9	37,8/37,9
Co K	25,7/24,6	27,0/26,0
Ni K	18,6/17,9	17,9/17,5

Пр и м е ч а н и е. В числителе и знаменателе указаны значения в весовых и атомных процентах

высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi, облученного импульсным электронным пучком.

Материал и методы исследования

Материал исследования – высокоэнтропийный сплав (ВЭС) элементного состава CrMnFeCoNi, изготовленный методом электродуговой аддитивной технологии (WAAM) [11]. Полученный ВЭС с размерами 140×20×30 мм представлял собой параллелепипед, состоящий из семи наплавленных слоев в высоту и четырех слоев в толщину. Испытания на растяжение осуществляли на плоских пропорциональных образцах в виде двухсторонних лопаток в соответствии с ГОСТ 1497 – 84 [22]. Образцы вырезали из массивной заготовки методами электроэрозионной резки. Начальные размеры образцов следующие: толщина 1,05 мм; ширина 4,4 мм; длина рабочей части 8,0 мм. Часть образцов облучали в среде аргона при остаточном давлении 0,02 Па с двух сторон (рабочая часть) на установке СОЛО, разработанной и изготовленной в Институте сильноточной электроники СО РАН [23]. Режимы облучения следующие: плотность энергии пучка электронов 10, 15, 20, 25, 30 Дж/см²; длительность импульса пучка 50 мкс; количество импульсов 3; частота следования импульсов 0,3 с⁻¹. Деформацию образцов осуществляли путем одноосного растяжения на установке Instron 3369 (скорость испытаний 1,2 мм/мин; температура 22 °С) с автоматической записью кривой растяжения.

Структурно-фазовое состояние исходных и облученных образцов, а также образцов, разрушенных в результате испытаний на растяжение, изучали методами сканирующей электронной микроскопии (прибор LEO EVO 50 (Carl Zeiss), оснащенный энергодисперсионным анализатором INCA – energy), просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор JEOL JEM-2100, Japan), рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD-6000). Микротвердость поверхности облученных образцов определяли методом Виккерса на приборе ПМТ-3.

Результаты и их обсуждение

Элементный состав ВЭС определяли методами микрорентгеноспектрального анализа (см. таблицу).

Выявлено, что в поверхностном слое формируется неразориентированная ячеистая дислокационная субструктура (рис. 1, а, з) с размерами ячеек в пределах от 400 до 600 нм.

В объеме ячеек выявляются хаотически распределенные дислокации. Аналогичную ячеистую дислокационную субструктуру наблюдали в сплаве NiCoCrAlYSi после обработки электронным пучком [11].

На глубине 25 мкм формируется неразориентированная ячеисто-сетчатая дислокационная субструктура (рис. 1, б, д). При увеличении расстояния от поверхности облучения на 45 мкм наряду с ячеисто-сетчатой дислокационной субструктурой присутствует субструктура, сформированная дислокациями, распределенными хаотически (рис. 1, в, е). На расстоянии 120 – 130 мкм от поверхности облучения дислокационная структура соответствует исходному состоянию и представляет собой хаотически распределенные дислокации (рис. 1, а) с плотностью дислокаций примерно $2,7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

В исходном состоянии сплав обладает высоким уровнем пластичности (относительное удлинение превышает 70 %) и прочности (предел прочности достигает 500 МПа). Облучение сплава и последующая высокоскоростная кристаллизация поверхностного слоя приводит к снижению прочности и пластичности материала.

Образующиеся зерна размером 1,5 – 3,0 мкм располагаются вдоль границ зерен исходной структуры ВЭС. В объеме зерен, не подвергнутых рекристаллизации, фиксируется большое количество микродвойников, что, вероятно, является следствием высокоскоростной термической обработки.

При большей плотности энергии (15 – 30 Дж/см²) пучка электронов в поверхностном слое ВЭС развивается процесс собирательной рекристаллизации с увеличением размеров зерен в среднем от 35 до 120 мкм.

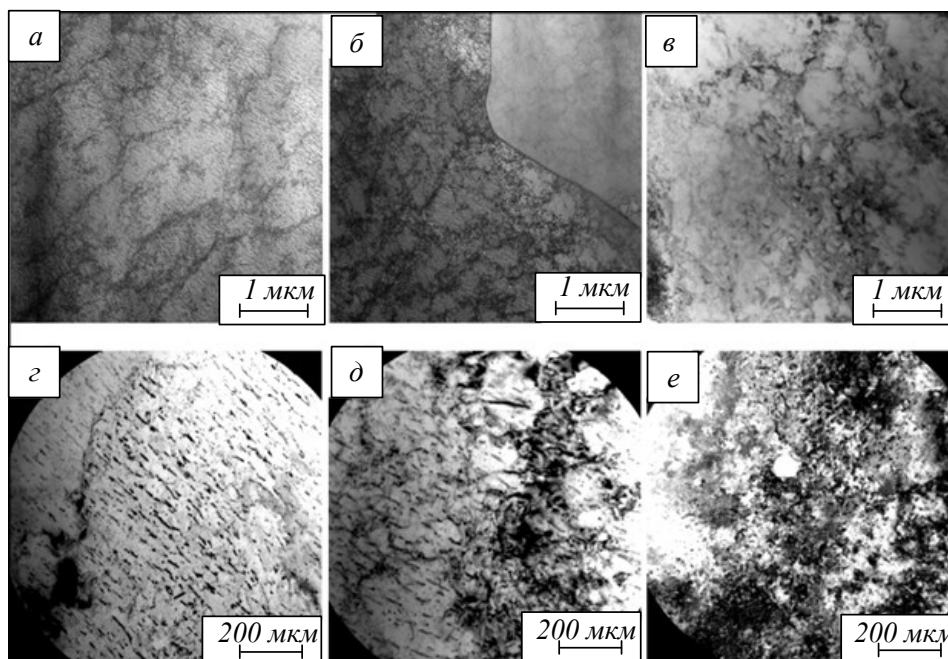


Рис. 1. Дислокационная субструктура поверхности (а, з), а также на расстояниях 25 мкм (б, д) и 45 мкм (в, е) высокоэнтропийного сплава системы Co – Cr – Fe – Mn – Ni, облученного импульсным электронным пучком
 Fig. 1. Dislocation substructure of the surface (а, з), at distances of 25 (б, д) and 45 μm (в, е) of a high-entropy alloy of the Co – Cr – Fe – Mn – Ni system irradiated with a pulsed electron beam

Высокоскоростное термическое воздействие приводит к формированию в поверхностном слое структуры ячеистой кристаллизации. Ячейки имеют малоугловую разориентацию (рис. 2, б). Средний размер ячеек кристаллизации зависит от плотности энергии пучка электронов и увеличивается от 310 нм при $E_S = 15$ Дж/см² до 800 нм при $E_S = 30$ Дж/см².

Толщина поверхностного слоя примерно 5 мкм. Ячейки имеют форму близкую к равноосной и формируют столбчатую структуру.

Вдоль границы раздела модифицированного слоя и основного объема материала формируются прослойки микропор, фиксируются микротрещины.

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии путем индирования микроэлектроннограмм и применения методики

темнопольного анализа [24 – 27] изучали фазовый состав облученных образцов (рис. 3, а).

Анализ микроэлектроннограммы (рис. 3, б) выявил присутствие рефлексов, принадлежащих различным фазам. Яркие рефлексы формируют набор межплоскостных расстояний, соответствующих ГЦК кристаллической решетке (плоскость типа {110}).

Индирование микроэлектроннограммы позволяет предположить, что фаза, имеющая ГЦК кристаллическую решетку и отвечающая данным межплоскостным расстояниям, может иметь следующий элементный состав: FeNi или Ni_{2,9}Cr_{0,7}Fe_{0,36}. Рефлексы слабой интенсивности (рис. 3, б) могут принадлежать фазе FeCr. Темнопольный анализ фольги выявил присутствие в материале наноразмерных (1 – 3 нм) частиц (рис. 3, в, з), имеющих округлую форму и располагающихся на дислокациях.

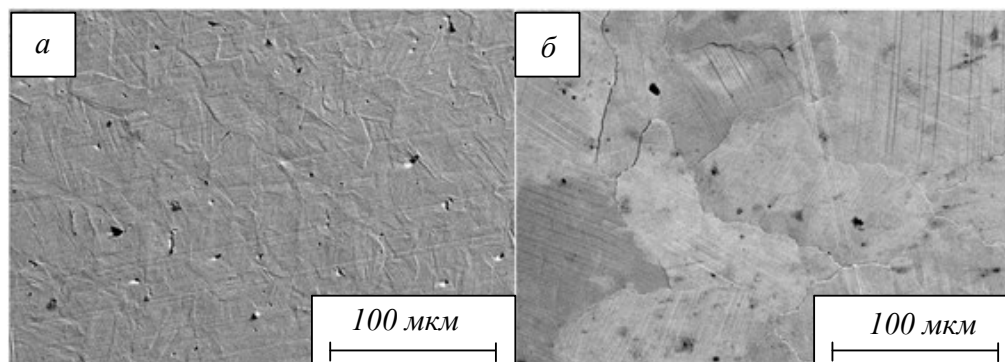


Рис. 2. Зеренная структура образцов ВЭС до облучения (а) и после (б)
 Fig. 2. Grain structure of HEA samples before (а) and after irradiation (б)

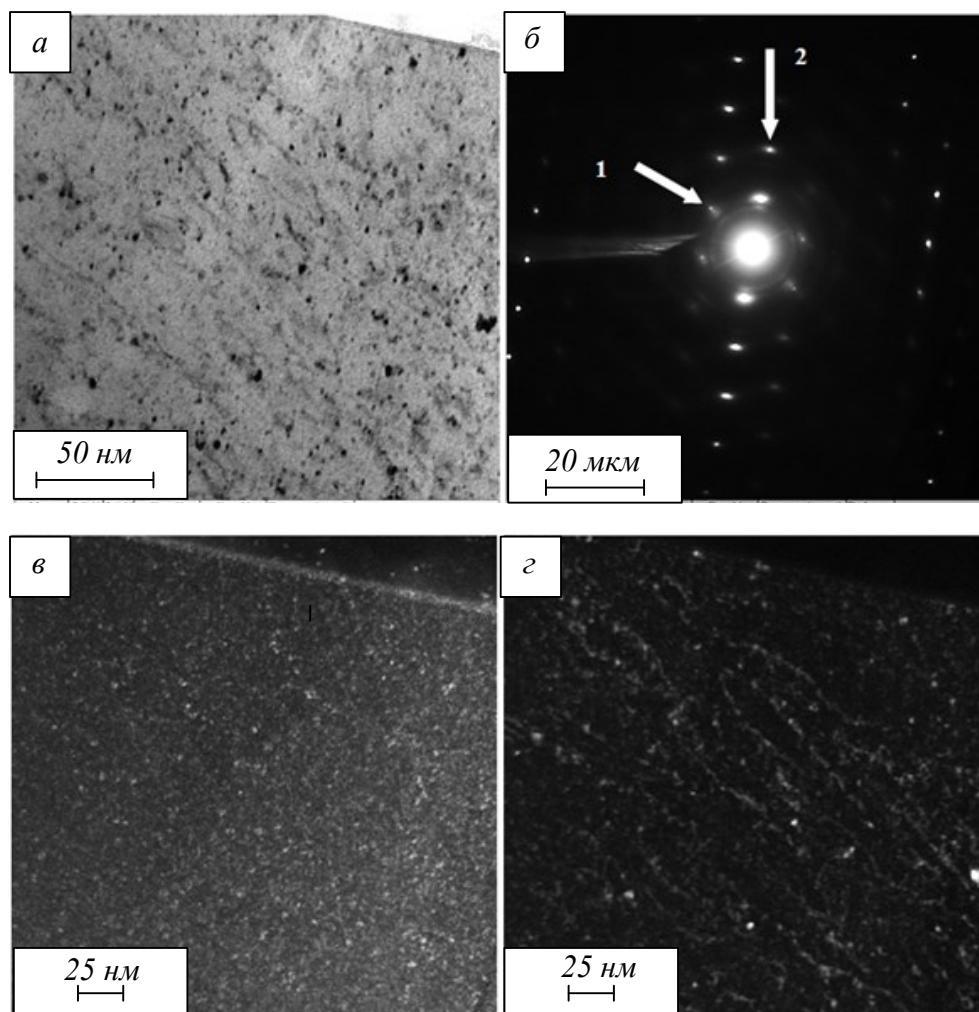


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя ВЭС, облученного импульсным электронным пучком (на поз. б стрелками указаны рефлексы, в которых были получены темные поля 1 – (в) и 2 – (г)):

a – светлое поле; *б* – микроэлектроннограмма; *в* и *г* – темные поля, полученные в рефлексах $[200]\text{Ni}_{2,9}\text{Cr}_{0,7}\text{Fe}_{0,36} + [200]\text{FeNi} + [331]\text{FeCr}$ (в) и $[222]\text{Ni}_{2,9}\text{Cr}_{0,7}\text{Fe}_{0,36} + [222]\text{FeNi} + [831]\text{FeCr}$

Fig. 3. Electron microscopic image of the structure of HEA surface layer irradiated with pulsed electron beam (at (b), arrows indicate the reflections in which dark fields were obtained 1 – (c), 2 – (d)):

a – bright field; *б* – microelectron diffraction pattern; *в* and *г* – dark fields obtained in reflections $[200]\text{Ni}_{2,9}\text{Cr}_{0,7}\text{Fe}_{0,36} + [200]\text{FeNi} + [331]\text{FeCr}$ (в) and $[222]\text{Ni}_{2,9}\text{Cr}_{0,7}\text{Fe}_{0,36} + [222]\text{FeNi} + [831]\text{FeCr}$

Ранее было установлено, что облучение ВЭС импульсным электронным пучком приводит к снижению параметра кристаллической решетки сплава от $a = 0,35582$ нм в исходном состоянии до $a = 0,35574$ нм после облучения с $E_s = 30$ Дж/см². Одной из причин этому может быть распад твердого раствора и уход атомов железа и хрома в частицы второй фазы (рис. 3). Действительно, средний атомный радиус R сплава, рассчитанный путем аддитивного сложения атомных радиусов химических элементов сплава с учетом их относительного содержания в материале, равен 0,127 нм, атомный радиус хрома – 0,130 нм, железа – 0,126 нм. Следовательно, выход атомов хрома в частицы второй фазы будет способствовать снижению параметра кристаллической решетки сплава.

Исследования поверхности разрушения облученных образцов выявили, наряду с областями, разрушенными по вязкому механизму, области материала, при разрушении которых формируется полосовая (пластинчатая) структура (рис. 4).

Полосы разрушения в большинстве случаев пересекают образец от верхней до нижней кромок и располагаются под углом 90 или 45 градусов к поверхности образца. Разрушение образца в полосах также протекает по вязкому механизму, диаметр ямок отрыва в полосах разрушения изменяется в пределах 0,1 – 0,2 мкм, что почти на порядок меньше диаметра ямок вязкого отрыва остальной части образца (рис. 4).

В необлученном образце полосы разрушения материала не формируются. В облученном сплаве при $E_s = 10$ Дж/см² области с полосовой структурой занимают примерно 25 % площади

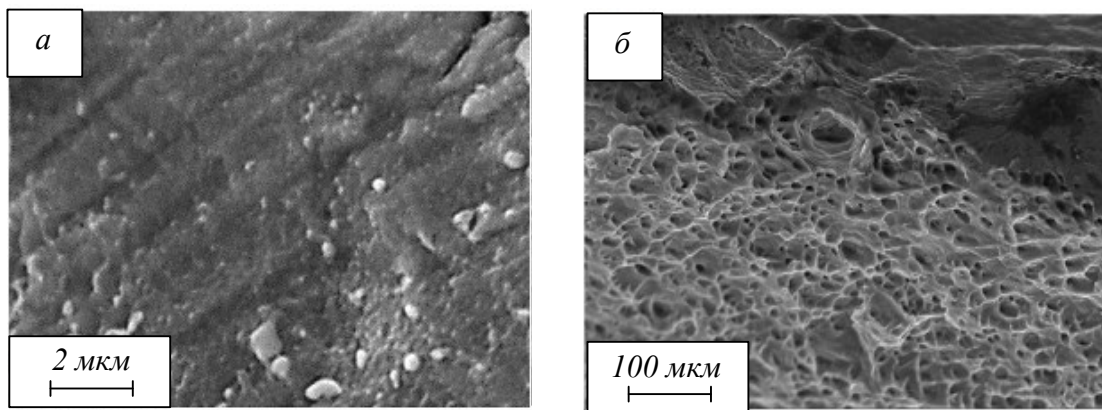


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение поверхности разрушения ВЭС (предварительное облучение импульсным электронным пучком при $E_S = 30$ Дж/см²):

a – структура в полосе разрушения; b – вне полосы

Fig. 4. Electron microscopic image of the HEA fracture surface (preliminary irradiation with pulsed electron beam at $E_S = 30$ J/cm²):
 a – structure in the fracture stripe; b – outside the stripe

излома, при $E_S = 30$ Дж/см² – примерно 65 %. Можно предположить, что формирование полосовой структуры при разрушении ВЭС является одной из причин снижения предельной прочности и пластичности материала в облученном состоянии.

Исследование поверхности разрушения образцов ВЭС позволило оценить толщину расплавленного слоя и рассмотреть состояние пограничного слоя (расплав/твердое тело), формирующегося при высокоскоростной кристаллизации материала: толщина расплавленного слоя изменяется в пределах от 0,8 мкм до 5 мкм и увеличивается с ростом плотности энергии пучка электронов (рис. 5).

Модифицированный электронным пучком объем ВЭС имеет двухслойное строение. На границе раздела поверхностного и подповерх-

ностного слоев, а также подповерхностного слоя и основного объема сплава располагаются микропоры. Подповерхностный слой и прилегающий к нему объем образца содержат микротрещины, расположенные преимущественно перпендикулярно к поверхности образца (рис. 5, б).

В поверхностном слое такие трещины не обнаружены. Можно предположить, что дефекты, выявленные в поверхностном и подповерхностном слоях, формируются в результате упругих напряжений, возникающих при высокоскоростной закалке образцов после завершения термического воздействия пучка электронов. Данные дефекты также могут быть причиной снижения предельной прочности и пластичности материала в облученном состоянии.

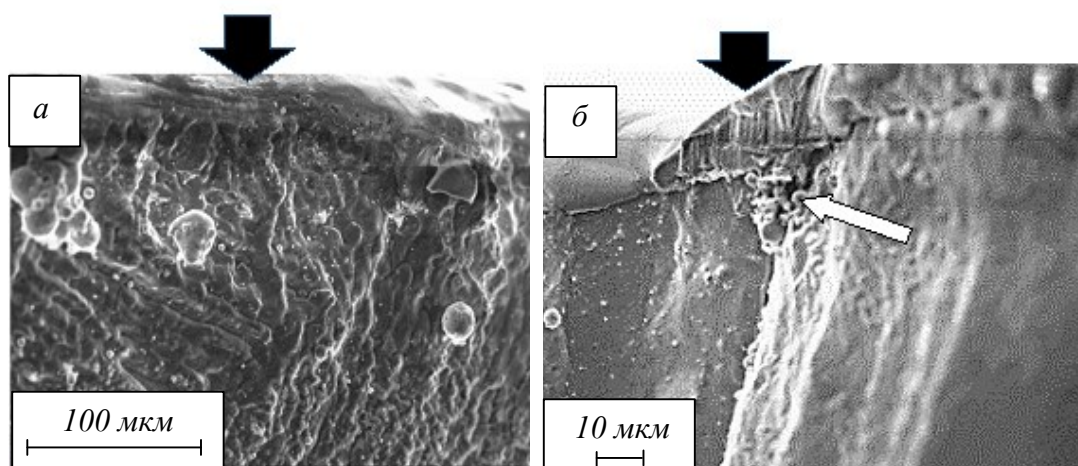


Рис. 5. Структура поверхности разрушения образца, облученного импульсным электронным пучком при $E_S = 20$ Дж/см² (а) и $E_S = 25$ Дж/см² (б) (темными стрелками указана поверхность облучения, светлой стрелкой – микротрещина)

Fig. 5. Structure of the sample fracture surface irradiated with pulsed electron beam at (a) $E_S = 20$ J/cm² and (b) $E_S = 25$ J/cm² (the dark arrows indicate the irradiated surface, the light arrow indicates the microcrack)

Выводы

С помощью технологии проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM) изготовлены образцы высокоэнтропийного сплава (ВЭС) CoCrFeMnNi неэквивалентного состава подвергнутые электронно-пучковой обработке со следующими параметрами: плотность энергии пучка $10 - 30 \text{ Дж/см}^2$; длительность 50 мкс; частота $0,3 \text{ с}^{-1}$; число импульсов 3.

Установлено, что сплав перед облучением является однофазным материалом, имеющим гранцентрированную кристаллическую решетку. Электронно-пучковая обработка сплава не приводит к изменению его элементного состава, однако существенным образом преобразует его дефектную субструктуру:

– существенно (в шесть раз – от 20 до 120 мкм) увеличивается средний размер зерна;

– в поверхностном слое толщиной примерно 5 мкм формируются структуры высокоскоростной ячеистой кристаллизации с размером ячеек $400 - 550 \text{ нм}$;

– в расплавленном поверхностном слое формируются текстуры высокоскоростной кристаллизации;

– твердый раствор распадается с выделением наноразмерных частиц состава FeCr .

Показано, что в результате ЭПО формируется градиентная дислокационная субструктура. В поверхностном слое формируется неориентированная ячеистая дислокационная субструктура, в объеме ячеек которой наблюдаются хаотически распределенные дислокации. На глубине 25 мкм формируется неориентированная ячеисто-сетчатая дислокационная субструктура с наибольшей плотностью дислокаций (примерно $5,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$). На глубине 45 мкм, наряду с ячеисто-сетчатой дислокационной субструктурой, присутствует структура, сформированная дислокациями, распределенными хаотически. В совокупности это привело к снижению пластичности более чем в 2 раза, прочности в 1,3 раза, микротвердости в 1,6 раза облученного сплава относительно необлученного состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- George E.P., Curtin W.A., Tazan C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms // *Acta Materialia*. 2020. Vol. 188. P. 435–474.
- Wu H., Huang S., Zhao C., Zhu H., Xie Z., Tu C., Li X. Microstructures and mechanical properties of in-situ FeCrNiCu high entropy alloy matrix composites reinforced with NbC particles // *Intermetallics*. 2020. Vol. 127. Article 106983.
- Liu Y., Zhang Y., Zhang H., Wang N., Chen X., Zhang H., Li Y. Microstructure and mechanical properties of refractory $\text{HfMo}_{0,5}\text{NbTiV}_{0,5}\text{Six}$ high entropy composites // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 694. P. 869–876.
- Zhang Y., Han T., Xiao M., Shen Y. Effect of Nb content on microstructure and properties of laser cladding $\text{FeNiCoCrTi}_{0,5}\text{Nbx}$ high-entropy alloy coating // *Optic*. 2019. Vol. 198. Article 163316.
- Tabachnikova E.D., Shapovalov Yu.A., Smirnov S.N., Gorban V.F., Krapivka N.A., Firstov S.A. Low-temperature mechanical properties and thermally activated plasticity parameters of the $\text{CrMnFeCoNi}_2\text{Cu}$ high entropy alloy // *Low Temperature Physics*. 2020. Vol. 46. No. 9. P. 1131–1141.
- Ремпель А.А., Гельчинский Б.Р. Высокоэнтропийные сплавы: получение, свойства, практическое применение // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020. Т. 63. № 3-4. С. 248–253.
- Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов // *Физика металлов и металловедение*. 2020. Т. 121. С. 807–841.
- Башев В.Ф., Кушнерев А.И. Структура и свойства литых и жидкозакаленных высокоэнтропийных сплавов системы Al-Cu-Fe-Ni-Si // *Физика металлов и металловедение*. 2017. Т. 118. № 1. С. 42–50.
- Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 122. P. 448–511.
- Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. ВЭС: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021. № 4. С. 1–8.
- Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and properties of high-entropy alloys // *Springer. Advanced structured materials*. 2021. Vol. 107. P. 110.
- Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Коновалов С.В., Шлярова Ю.А. Эволюция структуры AlCoCrFeNi высокоэнтропийного сплава при облучении импульсным электронным пучком // *Журнал технической физики*. 2021. Т. 91. № 12. С. 1971–1974.
- Zhang T., Xin L., Wu F., Xiang Chen J., Jiang S., Huang Y., Chen S. Microstructure and mechanical of $\text{Fe}_x\text{CoCrNiMn}$ high-entropy alloys // *Journal of Materials Science and Technology*. 2019. Vol. 35. No. 10. P. 2331–2335.
- Gludovatz B.A., Hohenwarter A., Catoor D., Chang E.H., George E.P., Ritchie R.O. Fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic

- applications // *Science*. 2014. Vol. 345. No. 6201. P. 1153–1158.
15. Proskyrovsky D.I., Rotshtein V.P., Ozur G.E., Ivanov Y.F., Markov A.B. Physical foundations for surface treatment of materials with low energy, high current electron beams // *Surface and Coatings Technology*. 2000. Vol. 125. No 1-3. P. 49–56.
 16. Valkov S., Ormanova M., Petrov P. Electron-beam surface treatment of metals and alloys: Techniques and trends // *Metals*. 2020. Vol. 10. No. 9. P. 1–20.
 17. Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V., Panchenko I. Fatigue-Induced Evolution of ALSI 310S Steel Microstructure after Electron Beam Treatment // *Materials*. 2020. Vol.13. No. 20. Article 4567.
 18. Konovalov S.V., Komissarova I.A., Kosiniv D.A., Ivanov Y.F., Gromov V.E. Structure of titanium alloy, modified by electron beams and destroyed during fatigue // *Letters on Materials*. 2017. Vol. 7. No. 3. P. 266–271.
 19. Lyu P., Peng T., Miao Y., Liu Z., Gao Q., Zhang C., Jin Y., Guan Q., Cai J. Microstructure and properties of CoCrFeNiMo_{0.2} high-entropy alloy enhanced by high-current pulsed electron beam // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 410. Article 126911.
 20. Cai J., Yao Y., Gao C., Lyu P., Meng X., Guan Q., Li Y., Han Z. Comparison of microstructure and oxidation behavior of NiCoCrAlYSi laser cladding coating before and after high-current pulsed electron beam modification // *Journal of alloys and Compounds*. 2021. Vol. 881. Article 160651.
 21. Osintsev K., Gromov V., Ivanov Y., Konovalov S., Panchenko I., Vorobyev S. Evolution of structure in alcocrfeni high-entropy alloy irradiated by a pulsed electron beam // *Metals*. 2021. Vol. 11. Article 1228.
 22. ГОСТ 1497 – 84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Стандартинформ, 2005. 24 с.
 23. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке // *Известия вузов. Физика*. 2008. № 5. С. 60–70.
 24. Томас Г., Гориндж М.Дж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов. М.: Наука, 1983. 320 с.
 25. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016. 196 p.
 26. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer, 2014. 717 p.
 27. Carter C.B., Williams D.B. *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing, 2016. 518 p.

REFERENCES

1. George E.P., Curtin W.A., Tazan C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. *Acta Materialia*. 2020, vol. 188, pp. 435–474.
2. Wu H., Huang S., Zhao C., Zhu H., Xie Z., Tu C., Li X. Microstructures and mechanical properties of in-situ FeCrNiCu high entropy alloy matrix composites reinforced with NbC particles. *Intermetallics*. 2020, vol. 127, article 106983.
3. Liu Y., Zhang Y., Zhang H., Wang N., Chen X., Zhang H., Li Y. Microstructure and mechanical properties of refractory HfMo_{0.5}NbTiV_{0.5}Si_x high entropy composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017, vol. 694, pp. 869–876.
4. Zhang Y., Han T., Xiao M., Shen Y. Effect of Nb content on microstructure and properties of laser cladding FeNiCoCrTi_{0.5}Nb_x high-entropy alloy coating. *Optic*. 2019, vol. 198, article 163316.
5. Tabachnikova E.D., Shapovalov Yu.A., Smirnov S.N., Gorban V.F., Krapivka N.A., Firstov S.A. Low-temperature mechanical properties and thermally activated plasticity parameters of the CrMnFeCoNi₂Cu high entropy alloy. *Low Temperature Physics*. 2020, vol. 46, no. 9, pp. 1131–1141.
6. Rempel' A.A., Gel'chinskii B.R. High-entropy alloys: obtaining, properties, practical application. *Izvestia. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 3-4, pp. 248–253. (In Russ.).
7. Rogachev A.S. Structure, stability and properties of high-entropy alloys. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2020, vol. 121, pp. 807–841. (In Russ.).
8. Bashev V.F., Kushnerev A.I. Structure and properties of cast and liquid-heated high-entropy alloys of the Al–Cu–Fe–Ni–Si system. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2017, vol. 118, no. 1, pp.42–50. (In Russ.).
9. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017, vol. 122, pp. 448–511.
10. Osintsev K.A., Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A. WES: structure, mechanical properties, deformation mechanisms and application. *Izvestia. Ferrous Metallurgy*. 2021, no. 4, pp. 1–8. (In Russ.).
11. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and properties of high-

- entropy alloys. *Springer. Advanced structured materials*. 2021, vol. 107, pp. 110.
12. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kononov S.V., Shlyarova Yu.A. Evolution of the AlCoCrFeNi structure of a high-entropy alloy under pulsed electron beam irradiation. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2021, vol. 91, no. 12, pp. 1971–1974. (In Russ.).
 13. Zhang T., Xin L., Wu F., Xiang Chen J., Jiang S., Huang Y., Chen S. Microstructure and mechanical of Fe_xCoCrNiMn high-entropy alloys. *Journal of Materials Science and Technology*. 2019, vol. 35, no. 10, pp. 2331–2335.
 14. Gludovatz B.A., Hohenwarter A., Catoor D., Chang E.H., George E.P., Ritchie R.O. Fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications. *Science*. 2014, vol. 345, no. 6201, pp. 1153–1158.
 15. Proskirovsky D.I., Rotshtein V.P., Ozur G.E., Ivanov Y.F., Markov A.B. Physical foundations for surface treatment of materials with low energy, high current electron beams. *Surface and Coatings Technology*. 2000, vol. 125, no 1-3, pp. 49–56.
 16. Valkov S., Ormanova M., Petrov P. Electron-beam surface treatment of metals and alloys: Techniques and trends. *Metals*. 2020, vol. 10, no. 9, pp. 1–20.
 17. Kononov S., Ivanov Y., Gromov V., Panchenko I. Fatigue-Induced Evolution of ALSI 310S Steel Microstructure after Electron Beam Treatment. *Materials*. 2020, vol.13, no. 20, article 4567.
 18. Kononov S.V., Komissarova I.A., Kosiniv D.A., Ivanov Y.F., Gromov V.E. Structure of titanium alloy, modified by electron beams and destroyed during fatigue. *Letters on Materials*. 2017, vol. 7, no. 3, pp. 266–271.
 19. Lyu P., Peng T., Miao Y., Liu Z., Gao Q., Zhang C., Jin Y., Guan Q., Cai J. Microstructure and properties of CoCrFeNiMo_{0.2} high-entropy alloy enhanced by high-current pulsed electron beam. *Surface and Coatings Technology*. 2021, vol. 410, article 126911.
 20. Cai J., Yao Y., Gao C., Lyu P., Meng X., Guan Q., Li Y., Han Z. Comparison of microstructure and oxidation behavior of NiCoCrAlYSi laser cladding coating before and after high-current pulsed electron beam modification. *Journal of alloys and Compounds*. 2021, vol. 881, article 160651.
 21. Osintsev K., Gromov V., Ivanov Y., Kononov S., Panchenko I., Vorobyev S. Evolution of structure in alcoCrFeNi high-entropy alloy irradiated by a pulsed electron beam. *Metals*. 2021, vol. 11, article 1228.
 22. *GOST 1497 – 84 Metals. Tensile testing methods*. Moscow: Standartinform, 2005, 24 p. (In Russ.).
 23. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. Nanostructuring of the surface of metal-ceramic and ceramic materials with pulsed electron-beam processing. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2008, no. 5, pp. 60–70. (In Russ.).
 24. Tomas G., Gorindzh M.Dzh. *Transmission electron microscopy of materials*. Moscow: Nauka, 1983, 320 p. (In Russ.).
 25. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016, 196 p.
 26. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer, 2014, 717 p.
 27. Carter C.B., Williams D.B. *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing, 2016, 518 p.
- Сведения об авторах**
- Сергей Валерьевич Коновалов**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева
E-mail: ksv@ssau.ru
ORCID: 0000-0003-4809-8660
- Юрий Федорович Иванов**, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН
E-mail: yufi55@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8022-7058
- 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
- Юлия Андреевна Шлярова**, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: rubannikova96@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5677-1427
- Ольга Анатольевна Кондратова**, к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной математики и ин-

форматики, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: okondratova@mail.ru

ORCID: 0000-0002-7347-7681

Анна Викторовна Кириллова, старший преподаватель кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева

E-mail: avkirillova76@mail.ru

ORCID: 0000-0003-4428-1831

Information about the authors

Sergey V. Konovalov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University. academician S.P. Korolev

E-mail: ksv@ssau.ru

ORCID: 0000-0003-4809-8660

Yuri F. Ivanov, Ph.D., Professor, Chief Researcher, Institute of High-Current Electronics SB RAS

E-mail: yufi55@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8022-7058

Viktor E. Gromov, Ph.D., Professor, Head of the Department of Natural Sciences named after Pro-

essor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-5147-5343

Yulia A. Shlyarova, Post-graduate student of the Department of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel, Researcher at the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

E-mail: rubannikova96@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5677-1427

Olga A. Kondratova, Ph.D., Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Computer Science, Siberian State Industrial University

E-mail: okondratova@mail.ru

ORCID: 0000-0002-7347-7681

Anna V. Kirillova, Senior Lecturer of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University named after academician S.P. Korolev

E-mail: avkirillova76@mail.ru

ORCID: 0000-0003-4428-1831

© 2022 г. С.В. Коновалов, Ю.Ф. Ионов,
В.Е. Громов, Ю.А. Шлярова,
О.А. Кондратова, А.В. Кириллова
Поступила в редакцию 14 апреля 2022 г.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПОДЗЕМНОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ КУЗБАССА

С. В. Риб, В. Н. Фрянов, А. М. Никитина, Д. М. Борзых

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

Аннотация. В статье обоснованы перспективные направления развития подземной геотехнологии в условиях Кузбасса. Базой для новых направлений являются цифровизация объектов и процессов угольной шахты, разработка и реализация технологических решений с использованием многовариантных методов моделирования и оптимизации параметров технологии и технических средств, адаптированных к условиям угольных шахт Кузбасса и обеспечивающих промышленную безопасность на период до 2035 года.

Ключевые слова: геотехнология, шахта, способы развития шахтного фонда, цифровизация, моделирование, оптимизация проектных решений, угольные месторождения, промышленная безопасность

Для цитирования: Риб С.В., Фрянов В.Н., Никитина А.М., Борзых Д.М. Состояние и перспективы развития подземной геотехнологии на угольных шахтах Кузбасса // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 2 (40). С. 57 – 63.

STATE AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF UNDERGROUND GEOTECHNOLOGY IN KUZBASS COAL MINES

S. V. Rib, V. N. Fryanov, A. M. Nikitina, D. M. Borzykh

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

Abstract. The article substantiates promising directions of development of underground geotechnology in the conditions of Kuzbass. The basis for new directions is digitalization of objects and processes of the coal mine, development and implementation of technological solutions using multivariate methods of modeling and optimization of technology parameters and technical means, adapted to the conditions of the coal mines of Kuzbass and providing industrial safety in the period up to 2035.

Keywords: geotechnology, mine, mine development methods, digitalization, modeling, optimization of design solutions, coal deposits, industrial safety

For citation: Rib S.V., Fryanov V.N., Nikitina A.M., Borzykh D.M. State and prospects for the development of underground geotechnology in Kuzbass coal mines. *Bulletin of the SibSIU*. 2022, no. 2 (40), pp. 57 – 63. (In Russ.).

Введение

По отчетным данным угледобывающих компаний добыча угля в России в 2021 г. составила 438,4 млн т. По сравнению с 2020 г. она увеличилась на 36,4 млн т (или на 9,1 %). Подземным способом добыто 113,0 млн т угля (на 9,8 млн т или на 9,4 % больше, чем годом ранее).

Из угледобывающих регионов самым крупным поставщиком угля является Кузнецкий бас-

сейн, где добывается более половины (55,0 %) всего угля в стране и 71,6 % углей коксующихся марок. Такая добыча определяет значимость кузнецких углей для экономики России [1].

В Кузнецком бассейне в 2021 г. по сравнению с 2020 г. добыча угля увеличилась на 20,5 млн т или на 9,3 % (добыто 241,2 млн т). На 01.01.2022 г. в Кузбассе работает 152 угледобывающих и перерабатывающих предприятия:

– 39 шахт, из них: 21 предприятие, добывающее коксующийся уголь; 18 предприятий, добывающих энергетический уголь;

– 57 разрезов, из них: 8 предприятий, добывающих коксующийся уголь; 39 предприятий, добывающих энергетический уголь; 10 предприятий, добывающих коксующийся и энергетический уголь;

– 56 обогатительных фабрик и установок.

Согласно стратегии социально-экономического развития Кузбасса до 2035 года [2] по одному из сценариев к этому времени в регионе целевой показатель добычи составит 370 млн т угля (рис. 1).

Перспективы развития угольной отрасли во многом определяются внедрением инновационных и эффективных технологий в процессы добычи, переработки и транспортировки, возможностями комплексного использования угля. На рис. 2 представлены фазы эволюционного развития угольной отрасли России [3].

При определении направлений совершенствования технологий разработки пологих угольных пластов в Кузбассе мощностью 1,5 – 6,0 м [4] принципиальное значение имеет то, что в ближайшей перспективе технико-экономические показатели подземной угледобычи на шахтах Кузнецкого бассейна будут существенно зависеть от эффективности решения проблем, связанных с выемкой ранее надработанных или подработанных сближенных пластов, при использовании системы разработки длинными столбами с оставлением целиков угля в выработанном пространстве.

За последние десятилетия функционирования угольные шахты на базе достижений науки и систем управления довели до совершенства технологии добычи угля в рамках доступных им

техники и технологий. При этом был сформирован технический и технологический задел на базе накопленного информационного материала.

Возможные сценарии технологического развития отличаются темпами поэтапного перехода отрасли в новое технологическое качество, обеспечиваемое использованием передовых цифровых и интеллектуальных технологий, роботизированных систем, искусственного интеллекта, глубокой переработки углеводородного сырья. При этом главенствующую роль играет снижение травматизма и аварийности в шахтах.

Актуальность дигитализации угольной промышленности Кузбасса и обоснования инновационных решений следует из результатов анализа достижений отечественной и мировой горной науки и опыта работы высокопроизводительных угольных шахт в России и за рубежом. В соответствии с Программой «Цифровая экономика Российской Федерации» и концепцией «Индустрия 4.0 – Четвертая промышленная революция» технология подземной угледобычи в России и за рубежом активно перестраивается на новые условия функционирования горнодобывающих предприятий.

В условиях действующих угольных шахт возникают неоднозначные горнотехнические ситуации, устранение которых возможно посредством решения локальных задач управления геомеханическими и геотехнологическими процессами. На угольных шахтах реализуется первый этап цифровизации предприятий: создаются базы данных горно-геологических информационных систем (ГГИС), которые включают цифровые модели земной поверхности, геологического массива, топологии горных выработок и

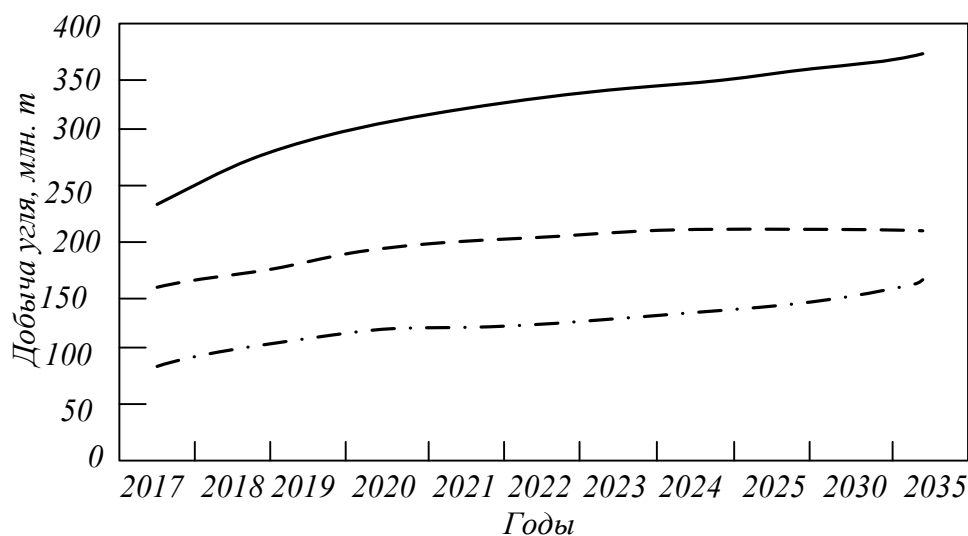


Рис. 1. Динамика добычи угля в Кузбассе всего (—), подземным (---) и открытым (-·-·-) способом

Fig. 1. Dynamics of coal mining in Kuzbass in total (—), underground (---) and open (-·-·-) way

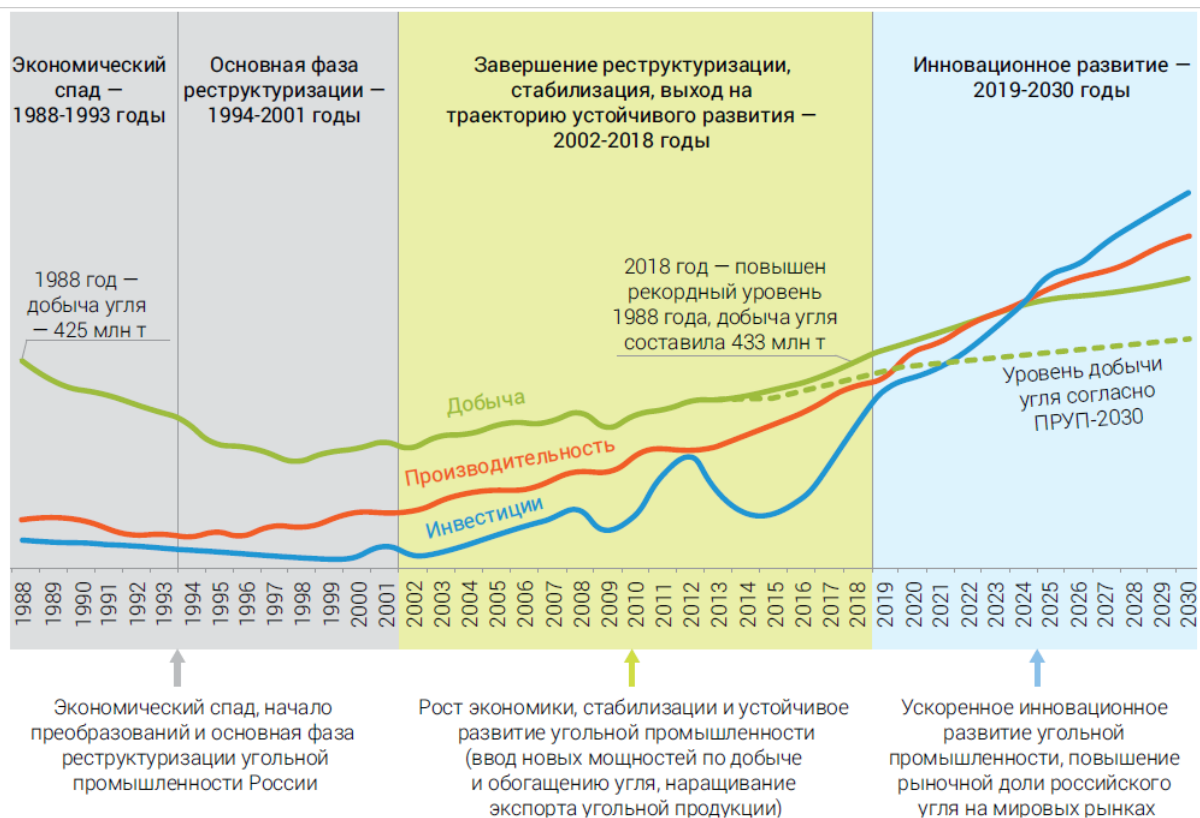


Рис. 2. Фазы развития угольной промышленности России
Fig. 2. Phases of development of the Russian coal industry

другие информационные ресурсы угольной шахты [5 – 7]. В настоящее время ГГИС горнодобывающих предприятий являются ресурсными моделями и обеспечивают сокращение потерь времени на подготовку и передачу информации, прямой доступ специалистов к визуальной информации, оперативное принятие решений для снижения риска возникновения аварий и инцидентов [8, 9].

Основные идеи формирования информационной базы горнодобывающих предприятий активно реализуются в учебном процессе вузов горного направления [10], в том числе в СибГИУ на кафедре геотехнологии при подготовке выпускной квалификационной работы и изучении следующих учебных дисциплин: компьютерная горная графика, компьютерное моделирование пластовых месторождений, моделирование динамических процессов, научно-исследовательская работа и др. [11, 12]. Поэтому можно ожидать появления на предприятиях подготовленных специалистов горного направления как творческий потенциал для реализации основных идей цифровизации угольных шахт.

В соответствии с необходимостью развития подземной геотехнологии Кузбасса предлагается начинать реализацию второго этапа цифровизации: использовать ГГИС как основу для решения локальных прикладных задач управления

горным производством, профилактики рисков возникновения опасных производственных ситуаций при интенсификации горных процессов и обеспечения эффективности горного производства. Такими уникальными задачами, решение которых не обеспечивается частично устаревшими действующими нормативными и методическими документами с достаточной для горных предприятий надежностью, являются:

- многовариантная оптимизация параметров технологической схемы шахты с использованием ГГИС как ресурса для имитационного и когнитивного моделирования;

- прогноз напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород в окрестности сопряжений и пересечений горных выработок, при движении очистных и подготовительных забоев с переменной скоростью, в случае отработки весьма сближенных пластов с переменной мощностью междупластья и др.;

- разработка технологических требований для создания робототехнических средств проведения горных выработок без постоянного присутствия персонала в опасных зонах;

- прогноз рисков возникновения опасных производственных ситуаций в зонах влияния геологических нарушений, локальных коллекторов десорбированного метана, влияния природных и техногенных микроземлетрясений, взаим-

ного влияния открытых и подземных процессов и выработок и пр.

Ниже рассмотрены предлагаемые авторами настоящей работы основные виды и направления решения задач по элементам технологической схемы угольной шахты с использованием ГГИС как информационного ресурса.

Проектирование и техническое перевооружение шахт

Применение методов имитационного, нейронного или когнитивного моделирования для выбора оптимального варианта развития шахтного фонда. Так как критерием эффективности принятых решений является прибыль при ограничениях по условиям безопасности, то в настоящее время преобладает выборочная отработка участков угольных пластов в свите. Это приводит к временной консервации балансовых запасов полезного ископаемого, возникновению зон повышенного горного давления (ЗПГД), очагов эндогенных пожаров. В итоге сокращается период эффективной работы предприятия, осуществляется его консервация с негативными экологическими последствиями. В качестве примера можно привести ликвидированные шахты старопромышленных районов Кузбасса: Анжеро-Судженск, Ленинск Кузнецкий, Киселёвск, Прокопьевск и др. В качестве направления по комплексному извлечению недр предлагается развивать в этих районах технологии добычи метана, подземной газификации.

Вскрытие, подготовка и отработка угольных пластов

По мере развития горного машиностроения изменились требования к параметрам блоков и панелей в пределах лицензионных участков. На высокопроизводительных угольных шахтах (например, шахта им. В.Д. Ялевского в Кузбассе) при отработке пологих пластов размеры выемочных столбов в панелях достигают 4 км, а длина лавы 400 м. Соответственно повысились требования к многоштрековой технологии проведения и поддержания подготовительных и вскрывающих выработок, так как темпы проходки этих выработок меньше скорости подвигания очистного комплексно-механизированного забоя.

Однако возможности повышения скорости проходки выработок ограничены следующими негативными факторами: высокая газоносность пластов, повышенное горное давление при увеличении глубины залегания пластов, риск обрушения пород и внезапных выбросов угля, породы и газа в зонах геологических нарушений.

В качестве одного из направлений повышения темпов проведения выработок предлагается

разработка и изготовление технических роботизированных средств [13], обеспечивающих выполнение основных процессов в проходческом забое без постоянного присутствия человека.

Система разработки

Монопольное применение системы разработки пологих угольных пластов длинными комплексно-механизированными забоями с полным обрушением пород кровли [14] при работе по схеме шахта – пласт привело при интенсификации темпов подвигания забоя к периодическому разрыву фронта очистных работ за счет отставания подготовки готовых к выемке запасов угольных пластов. Наличие на шахте только одного очистного забоя при возникновении неблагоприятных горно-геологических условий приводит к аварийной ситуации и резкому снижению прибыли предприятия.

На шахте с использованием ресурсов ГГИС предлагается организовать работу альтернативного очистного забоя, например с применением систем разработки с короткими забоями, участка открытых горных работ. Возможны и другие варианты. Это повысит экономическую устойчивость предприятия и полноту извлечения недр.

Промышленная безопасность

Угледобывающем предприятии характеризуются пространственной изменчивостью свойств и анизотропией пород и угольных пластов. При высоких скоростях подвигания очистных и подготовительных забоев все механические и динамические процессы, происходящие в массиве горных пород, связаны с негативными проявлениями горного давления. Это приводит к изменению режимов технологических процессов, авариям и инцидентам. Поэтому одной из функций ресурсов ГГИС является прогнозирование предвестников этих опасных производственных ситуаций. В настоящее время на шахтах функционируют следующие многофункциональные системы безопасности: «Микон III» (Россия), «Гранч» (Россия), «Davis Darby» (Великобритания) и др.

Для решения локальных задач и снижения рисков возникновения аварий и инцидентов требуется создание методов и инструментов, которые обеспечат оперативный прогноз последствий сочетаний факторов-предвестников. На современном этапе развития информационных технологий в качестве инструментов прогноза опасных явлений с целью оперативного принятия профилактических решений широко применяются специализированные программные ком-

плексы, позволяющие моделировать НДС геомассива: Ansys, Comsol, Abaqus и др.

На кафедре геотехнологии СибГИУ разработаны авторские варианты пакетов компьютерных программ [15, 16], которые обеспечивают прогноз ЗПГД, параметров крепи горных выработок, очередности отработки свиты пластов, геомеханических параметров при отработке пластов сложного строения, в том числе при переходе очистным забоем геологических нарушений.

Выводы

Кузбасс по праву считается лидером в части развития угольных производств, где реализуются федеральные задачи по автоматизации и роботизации горных работ, внедрению технологий их геоинформационного обеспечения. Современный этап развития горных предприятий – цифровая трансформация, характеризуемая бурным развитием технологий и средств телекоммуникаций, высокоточной навигации, вычислительных технологий и робототехники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петренко И.Е. Итоги работы угольной промышленности России за 2021 год // Уголь. 2022. № 3. С. 9–23.
2. Стратегия социально-экономического развития Кемеровской области до 2035 года. Администрация Кемеровской области: официальный сайт. 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://кузбасс-2035.рф/> (Дата обращения: 13.05.2022).
3. Малышев Ю., Ковальчук А., Рожков А. Угольная отрасль: поиск ориентиров в эпоху перемен // Энергетическая политика. 2021. № 2 (156). С. 18–29.
4. Зубов В.П. Состояние и направления совершенствования систем разработки угольных пластов на перспективных угольных шахтах Кузбасса // Записки Горного института. 2017. № 225. С. 292–297.
5. Ройтер М., Крах М., Кисселинг У., Векслер Ю. Мониторинг геомеханического состояния очистного забоя угольной шахты в системе управления Марко «Цифровая шахта» // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2016. Т. 1. № 3. С. 156–162.
6. Подготовка и разработка высокогазоносных угольных пластов / А.Д. Рубан, В.Б. Артемьев, В.С. Забурдяев и др. М.: Горная книга, 2010. 500 с.
7. ГИС-технологии при недропользовании / Д.С. Михалевич, А.О. Исаченко, Г.П. Жуков, Л.Р. Ишбулатова. М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2016. 280 с.
8. Курцев Б.В., Федотов Г.С. Геомеханическое сопровождение горных работ с использованием ГГИС Micromine // Горный журнал. 2022. № 1. С. 90–91. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.01.08>
9. Сапронова Н.П. Состояние и перспективы геолого-маркшейдерского обеспечения технических проектов разработки месторождений в среде ГГИС Micromine // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 5. С. 345–351.
10. Методическое руководство по цифровому трехмерному моделированию георесурсного потенциала пластовых месторождений полезных ископаемых. Конспект лекций и практические работы / Д.А. Стадник, Б.В. Курцев, Ю.Н. Кузнецов, Н.М. Стадник. М.: Изд-во «Горная книга», 2021. 224 с.
11. Домрачев А.Н., Риб С.В. Разработка междисциплинарных компьютерных лабораторных работ как основа массового внедрения обучающе-тестирующих систем по направлению подготовки 21.05.04 «Горное дело» // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2018. № 3 (25). С. 18–21.
12. Домрачев А.Н., Риб С.В. Использование нейросетевого моделирования для повышения эффективности функционирования обучающе-тестирующего комплекса // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2020. № 4 (34). С. 44–46.
13. Клишин В.И., Фрянов В.Н., Павлова Л.Д., Никитенко С.М., Малахов Ю.В. Исследование взаимодействия многофункциональной шагающей крепи с массивом горных пород при проведении подземных выработок // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 3. С. 3–11. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210301>
14. Коровкин Ю.А., Савченко П.Ф. Теория и практика длиннолавных систем. М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2012. 808 с.
15. Комплекс проблемно-ориентированных программ для моделирования формирования и распределения опасных зон в газоносном геомассиве: свидетельство о регистрации электронного ресурса. № 21123, дата регистрации 03 августа 2015 года. / В.Н. Фрянов, О.А. Петрова, Т.В. Петрова // Хроники объединного фонда электронных ресурсов «Наука и образование» № 08-09 (75-76) август-сентябрь 2015. Режим досту-

па: <http://ofernio.ru/portal/newspaper05.php>
(Дата обращения: 13.05.2022).

16. Риб С.В., Борзых Д.М., Фрянов В.Н. Свидетельство о регистрации электронного ресурса. «Комплекс программ для прогноза геомеханических и технологических параметров подземных горных выработок и неоднородных угольных целиков с тестированием численной модели по результатам точечного мониторинга». Гос. акад. наук, ИНИПИ РАО, 2014. № 20629; дата регистрации 09.12.2014.

REFERENCES

- Petrenko I.E. Results of the Russian coal industry in 2021. *Ugol'*. 2022, no. 3, pp. 9–23. (In Russ.).
- The strategy of socio-economic development of the Kemerovo region until 2035. *Administration of the Kemerovo region: official website*. 2022. [Elektronnyi resurs]. URL:<https://kuzbass-2035.rf/> (Data obrashcheniya: 13.05.2022). (In Russ.).
- Malyshev Yu., Koval'chuk A., Rozhkov A. Coal industry: finding landmarks in an era of change. *Energeticheskaya politika*. 2021, no. 2 (156), pp. 18–29. (In Russ.).
- Zubov V.P. The state and directions of improvement of coal seam development systems at prospective Kuzbass an coal mines. *Zapiski Gornogo instituta*. 2017, no. 225, pp. 292–297. (In Russ.).
- Roiter M., Krakh M., Kisseling U., Veksler Yu. Monitoring of the geomechanical condition of the coal mine treatment face in the control system of Marko "Digital Mine". *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*. 2016, vol. 1, no. 3, pp. 156–162. (In Russ.).
- Ruban A.D., Artem'ev V.B., Ziburdyayev V.S. etc. *Preparation and development of high-gas coal seams*. Moscow: Gornaya kniga, 2010, 500 p. (In Russ.).
- Mikhalevich D.S., Isachenko A.O., Zhukov G.P., Ishbulatova L.R. *GIS technologies for subsurface use*. Moscow: Izd-vo «Gornoe delo» OOO «Kimmeriiskii tsentr», 2016, 280 p. (In Russ.).
- Kurtsev B.V., Fedotov G.S. Geomechanical support of mining operations using GGIS Micromine. *Gornyi zhurnal*. 2022, no. 1, pp. 90–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.01.08>
- Sapronova N.P. The state and prospects of geological and surveying support for technical projects of field development in the environment of GGITS Micromine. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*. 2017, no. 5, pp. 345–351. (In Russ.).
- Stadnik D.A., Kurtsev B.V., Kuznetsov Yu.N., Stadnik N.M. *Methodological guide to digital three-dimensional modeling of the resource potential of reservoir mineral deposits. Lecture notes and practical work*. Moscow: Izd-vo «Gornaya kniga», 2021, 224 p. (In Russ.).
- Domrachev A.N., Rib S.V. Development of interdisciplinary computer laboratory work as the basis for the mass introduction of training and testing systems in the field of training 21.05.04 "Mining". *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2018, no. 3 (25), pp. 18–21. (In Russ.).
- Domrachev A.N., Rib S.V. The use of neural network modeling to improve the efficiency of the functioning of the training and testing complex. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2020, no. 4 (34), pp. 44–46. (In Russ.).
- Klishin V.I., Fryanov V.N., Pavlova L.D., Nikitenko S.M., Malakhov Yu.V. Investigation of the interaction of a multifunctional walking support with an array of rocks during underground workings. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2021, no. 3, pp. 3–11. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPPI20210301>
- Korovkin Yu.A., Savchenko P.F. *Theory and practice of long-head systems*. Moscow: Izd-vo «Gornoe delo» OOO «Kimmeriiskii tsentr», 2012, 808 p. (In Russ.).
- Fryanov V.N., Petrova O.A., Petrova T.V. A complex of problem-oriented programs for modeling the formation and distribution of hazardous zones in a gas-bearing geomass: certificate of registration of an electronic resource. No. 21123, registration date 03 August 2015. *Khroniki ob"edinnogo fonda elektronnykh resursov «Nauka i obrazovanie» no. 08-09 (75-76) avgust-sentyabr' 2015*. Rezhim dostupa: <http://ofernio.ru/portal/newspaper05.php> (Data obrashcheniya: 13.05.2022). (In Russ.).
- Rib S.V., Borzykh D.M., Fryanov V.N. Certificate of registration of an electronic resource. "A set of programs for forecasting geomechanical and technological parameters of underground mine workings and heterogeneous coal targets with testing of a numerical model based on the results of point monitoring". Gos. akad. nauk, INIPI RAO, 2014, no. 20629; data registratsii 09.12.2014. (In Russ.).

Сведения об авторах

Сергей Валерьевич Риб, к.т.н., старший преподаватель кафедры геотехнологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: seregarib@yandex.ru

Виктор Николаевич Фрянов, д.т.н., заведующий кафедрой геотехнологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: ftyanov@sibsiu.ru

Анастасия Михайловна Никитина, к.т.н., доцент кафедры геотехнологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: nik.am_78@mail.ru

Дмитрий Михайлович Борзых, старший преподаватель кафедры геотехнологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: 25borz@rambler.ru

Information about the authors

Sergei V. Rib, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Chair of Geotechnology, Siberian State Industrial University
E-mail: seregarib@yandex.ru

Viktor N. Fryanov, Dr. Sci. (Eng.), Head of Chair of Geotechnology, Siberian State Industrial University
E-mail: ftyanov@sibsiu.ru

Anastasiya M. Nikitina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Chair of Geotechnology, Siberian State Industrial University
E-mail: nik.am_78@mail.ru

Dmitrii M. Borzykh, *Senior Lecturer* of Chair of Geotechnology, Siberian State Industrial University
E-mail: 25borz@rambler.ru

© 2022 г. С.В. Риб, В.Н. Фрянов,
А.М. Никитина, Д.М. Борзых
Поступила в редакцию 13 мая 2022 г.

УДК 728.1.03

С ЖИЛИЩА НАЧИНАЕТСЯ АРХИТЕКТУРА, С ЖИЛИЩА НАЧИНАЕТСЯ ГОРОД*

В. И. Магель, Ю. К. Осипов, О. В. Матехина

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

Аннотация. Проведен анализ факторов, влияющих на архитектуру жилого дома, что, в конечном итоге, сказывается на архитектуре населенного места.

Ключевые слова: архитектура, жилище, композиция, городская жилая среда

Для цитирования: Магель В.И., Осипов Ю.К., Матехина О.В. С жилища начинается архитектура, с жилища начинается город // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 2 (40). С. 64 – 70.

ARCHITECTURE BEGINS WITH HOUSING, CITY BEGINS WITH HOUSING

V. I. Magel', Y. K. Osipov, O. V. Matekhina

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

Abstract. Analysis of factors affecting the architecture of a residential building, which, ultimately, affects the architecture of a populated place.

Keywords: architecture, dwelling, composition, urban living environment.

For citation: Magel' V.I., Osipov Yu.K., Matekhina O.V. Architecture begins with a dwelling, a city begins with a dwelling. *Bulletin of SibSIU*. 2022, no. 2 (40), pp. 64 – 70 (In Russ.).

В историческом отношении основные типы зданий произошли от жилища [1]. Тема жилища актуальна во все времена. Как подчеркивал Ле Корбюзье «...Если существует на свете святая профессия, то это строительство жилья» [2].

Необходимость рассмотрения основ проектирования жилых зданий имеет ряд предпосылок. Во-первых, жилые здания – самый массовый объект проектирования и строительства. Во-вторых, как справедливо заметил американский архитектор И.М. Пэй: «Легко проектировать крупные музеи или административные здания, но очень трудно создать проект хорошего жилого дома». Не следует забывать и о том, что современное состояние архитектуры в России характеризуется

отсутствием социальной и архитектурной концепции формирования жилища.

Одна из главных черт нового, которая все более ощутимо проявляет себя – переход архитектуры сооружения к пространственной архитектуре. Это проходит через систему генеральных планов, которые формируют городскую среду [3]. Городская среда – это сложная функционально-пространственная система неразрывно связанных частей города. В этой системе равноправно взаимодействуют здания и сооружения, а также пространства улиц, перекрестков и площадей.

Смысл архитектуры как искусства состоит в преобразении утилитарной строительной конструкции здания и (или) сооружения в образную, художественную композицию. Отсюда традиционные сравнения архитектуры с застывшей музыкой, каменной книгой истории человечества, с космосом, возникающим из хаоса.

*Мысль, вынесенная в заглавие статьи, принадлежит теории советской архитектуры А.К. Бурову.

Во все эпохи архитектура связана с уровнем развития науки, техники, новых технологий, культуры и бытом своего времени. Она зеркально отражает социальный строй. В городах появляются те типы зданий, которые отвечают потребностям городского общества [4]. Искусство создавать архитектуру может меняться под воздействием идей, меняющих это искусство. Под идеями в настоящей работе понимается, например, технические новшества (материалы, технологии, потребности, интернет). Ничто из перечисленного не создавалось с художественными идеями, но каждое открывало новые возможности, которыми интересовались и пользовались люди искусства, в том числе и архитекторы, создавая архитектурно-художественные образы при проектировании зданий [5].

Жилище и человек, жилище для человека... Эта тема касается каждого, она вечна и не утратит актуальности, она всегда нова, хотя корнями уходит в глубочайшую древность. В настоящее время мало информации о том, где и когда человек построил свой первый дом. Можно лишь догадываться как он выглядел по дошедшим до нас останкам и изображениям древних жилищ. Сегодня в теории архитектуры жилище человека понимается как сложный комплекс взаимосвязанных архитектурно-градостроительных объектов, обеспечивающих осуществление процессов труда, быта, отдыха семьи и отдельного человека, их нравственного и эстетического совершенствований.

Проектированию жилых зданий и комплексов предшествует разработка градостроительных проектов (генеральный план города, проекты планировки территорий и отдельных градостроительных комплексов) [6]. В проектных разработках отражаются особенности градостроительной структуры, масштаб сложившейся городской за-

стройки, природного окружения, ландшафта, этажность и типы существующей жилой застройки, климатические характеристики, национальные традиции и уклад жизни, обеспечивающие в совокупности необходимый психофизиологический комфорт среды обитания.

В обосновывающей градостроительной документации с учетом реальных потребностей и возможностей определяются типы жилой застройки (малоэтажная с приусадебными участками и без, многоэтажная и др.) и количество проживающего населения. На основании этих расчетов, композиции планировки города или отдельной его территории и с учетом конкретных природных условий (рельеф местности, зелёные массивы, открытые пространства, инсоляция и проветривание, гидрогеологические особенности грунтов, господствующее направление ветров и др.) размещаются планировочные элементы жилой застройки. В отечественной градостроительной практике они получили название жилой микрорайон, жилой квартал или многофункциональный жилой комплекс.

В микрорайонах кроме жилых зданий размещается общеобразовательные школы, детские дошкольные учреждения и предприятия торгового-бытового обслуживания для обеспечения потребностей населения микрорайона. Микрорайоны застраиваются многоэтажными, многоквартирными жилыми домами (рис. 1). Этажность жилых домов определяется проектом.

В большинстве кварталов отсутствуют общеобразовательные школы. Они могут размещаться в одном из кварталов и обслуживать несколько соседних. Кварталы могут застраиваться жилыми домами разных типов и этажности в соответствии с проектами планировки территории.



Рис. 1. Микрорайон
Fig. 1. Microdistrict

Многофункциональные жилые комплексы размещаются на обособленных земельных участках, часто, в структуре общественного центра города или района, выполняя роль высотных акцентов-доминант в композиции застройки. В связи с этим этажность определяется местом размещения и может быть высокой. Иногда они размещаются на небольших участках, примыкающих к лесным массивам. Нижние этажи комплексов заняты нежилыми помещениями обслуживания, на верхних размещаются жилые квартиры.

При проектировании каждого конкретного дома, особенно многоэтажного, необходимо учитывать его роль в композиции застройки микрорайона (квартала) и жилой улицы (или магистрали), если он примыкает к ним. Очень важным является ориентация жилого дома по сторонам света с целью оптимальной инсоляции жилых помещений. При неблагоприятных условиях можно воспользоваться различными типами жилых домов (галерейные, точечные и др.).

Комфортность жилища (кроме собственно квартиры) во многом определяется благоустройством (планировка двора; подъезды и подходы к дому; автопарковки; площадки для детей, для отдыха, спортивные, хозяйственные, для выгула домашних животных и др.) и озеленением территории вокруг дома. Жилой дом служит бытовым потребностям человека. Как известно этот вид зданий является самым массовым в группе гражданских зданий. Используя общие принципы, закономерности и функции архитектуры, рассмотрим основы объемно-пространственной композиции, ее архитектурно-художественные приемы и методы, применяемые при проектировании массового жилища. Архитектор при проектировании жилых зданий должен профессионально, творчески использовать закономерности и средства архитектурной композиции, оказывающие решающее влияние на формирование окружающего пространства.

Современная типология жилых зданий имеет огромный культурный, исторический опыт классификаций [1]. Классификация – это система соподчиненных понятий какого-либо знания, являющаяся средством для установления связей между ними. В архитектурном проектировании знание классификации способствует установлению единого профессионального языка общения между специалистами и позволяет ориентироваться в практике жилого строительства. Понятие «жилой дом» имеет широкое толкование, и это позволяет дополнить его рядом признаков, количество которых может меняться (см. таблицу).

Специфика современного массового жилищного домостроения в том, что оно осуществля-

ется, главным образом, с использованием панельных, каркасно-панельных и монолитных зданий. Им присущи четкость и прямолинейность геометрических линий, строгий ритм повторяющихся элементов. Это требует от архитектора творческого использования архитектурных приемов для создания индивидуального образа жилой застройки. Рассматриваемая проблема приобретает все большую значимость и ее решение связано с повышением профессиональной ответственности архитектора. Архитектурно-эстетические качества многих зданий и комплексов массовой жилой застройки довольно низки, что является следствием чрезмерного подчинения творческих аспектов архитектуры техническим и другим утилитарным задачам. Использование типовых проектов для формирования жилых территорий преследует только одну цель – экономию затрат времени и средств, что существенно ограничивает архитектурно-художественные замыслы архитекторов. В связи с этим от архитекторов требуется действительно творческий подход к сочинению композиции жилой застройки.

Последовательно рассмотрим основные средства и приемы архитектурной композиции. Она является важнейшей характеристикой художественно-эстетических качеств застройки. К основным средствам архитектурной композиции и формообразования относятся тектоника, масштаб, пропорциональность, художественный контраст, нюанс, ритм, пластика объемов, фактура, цвет и др.

Образное решение, архитектурный облик жилых зданий и их комплексов должен определяться не только их архитектурно-планировочными и композиционными решениями, но и правильным выбором несущих и ограждающих конструкций, строительных материалов, эффективным использованием местных ресурсов и строительной базы.

Тектоника в архитектурном творчестве и искусстве получила название архитектоника. Она является характеристикой определяющей художественные закономерности сооружения, в том числе жилого здания, отражающей соотношение несущей и несомой частей, присущее архитектурно-конструктивной системе того или иного сооружения. Архитектоника сооружения – это органичное сочетание функциональных потребностей и конструктивных возможностей, реализованное в процессе формообразования понятное обывателю.

Практика подтверждает, что архитектурная выразительность здания во многом зависит от зрительного восприятия надежности работы конструкций. В жилом доме тектонические ка-

Классификация жилых зданий
Classification of residential buildings

Классификация по назначению	Массовые (<i>открытая система обслуживания</i>) здания					
	Рекреационные здания (<i>без системы обслуживания</i>)			Специализированные здания (<i>закрытая система обслуживания</i>)		
	Садовый дом	Дача	Вилла			
Этажность	1 – 2	3 – 5		6 – 9	10 – 16	Более 16
	Малозэтажные	Среднеэтажные		Многоэтажные		
Длительность проживания	Индивидуальные	Квартирные – <i>постоянного проживания</i>				
		Общежития – <i>временного проживания</i>				
		Гостиницы – <i>кратковременного проживания</i>				
		Интернаты – <i>длительного проживания</i>				
Число квартир	Одноквартирные	Многоквартирные				
	Спаренные					
	Малоквартирные					
Планировочная структура	Усадебные	Многосекционные				
	Блокированные	Односекционные (башенные, точечные)				
	Атриумные	Коридорные				
		Галерейные				
		Смешанные структуры				
		Коридорно-секционные				
		Галерейно-секционные				
Вид поселения	Сельские					
	Городские					
Градостроительная ситуация	Угловые					
	Рядовые					
	Дома-вставки			Ориентеры		
	Дома-акценты					
	Панорамные					
Архитектурно-пространственная структура жилой ячейки	С придомовым садом	С приквартирным участком-террасой	С летними помещениями		Без летних помещений	
	С приквартирным двориком					
Другие (дополнительные) признаки	Для строительства в южных, северных и других климатических районах					
	Для строительства на рельефе					
	Террасные	Каскадные				
		Переменной этажности				
	По функциональной структуре					
	Ателье	Специализированные				Многофункциональные жилые комплексы
	Ремесленников	Дома с обслуживанием				
Дома-магазины	Жилые комплексы					
Шумозащитные						
По наличию трудовой деятельности в жилище	Без трудовой деятельности – только вне дома					
	С трудовой зоной – дома и вне дома					
	С производственно-трудовой зоной – только дома					
По уровню комфорта	Высококачественные – дом			Для состоятельных семей		
	Комфортабельные – этаж			Для обеспеченных семей		
	Муниципальные – квартира			Для малообеспеченных семей		
По числу лифтов	безлифтовые			1	2	3 – 4
Мусороудаление	Нет	Нет/да		Да	Да	Да
Тип лестницы	Внутриквартирная	Внеквартирная обычная			Внеквартирная незадымляемая	

чества проявляются, прежде всего, в стеновых ограждениях, которые в зависимости от примененных материалов обладают различным характером (рис. 2).

Выявление несущей способности ограждающих конструкций в стеновой конструктивной системе – прием, позволяющий добиться повышения пластики фасадов, за счет выноса торцов несущих стен за плоскость фасада, применением пилястр или устройством лоджий. В каркасных зданиях применяют навесные ограждения. Последние могут иметь различную разрезку (на этаж, двухрядную, на одно или несколько помещений), что позволяет варьировать акцентами на фасадах, например, располагать элементы горизонтально, вертикально или в шахматном порядке.

Форма здания реализуется на трех уровнях (внутренняя форма, внешняя форма и композиция в целом). Внутренняя форма – это объемно-

пространственная структура, то есть построение плана и разреза здания на основе компоновки требуемых элементов. Конструктивная структура – построение несущих и ограждающих конструкций согласно типу здания.

Внешняя форма решается с учетом градостроительных особенностей застраиваемой территории и требований жителей городской среде. Создание внешней формы жилого здания базируется на следующем принципе: дом – часть города. Архитектура жилого дома любой этажности должна быть соразмерна с человеком и природным окружением.

Масштабность достигается на основе сочетания ритмов и пропорций внутренних и внешних форм; объемно-пространственным решением и этажности жилого дома; планировочной структуры (квартиры, секции, типа дома); конструктивных материалов, конструктивной системы, методов возведения и отделки зданий.



а



б



в

Рис. 2. Панельные (а), монолитный (б) и кирпичные (в) дома
 Fig. 2. Panel (a), monolithic (б) and brick (в) houses



Рис. 3. Особняк И. Цветкова на Пречистенской набережной (г. Москва)
Fig. 3. I. Tsvetkov's mansion on the Prechistenskaya embankment (Moscow)

В прошлом традиционным материалом стен являлся кирпич, который необоснованно ограничен в применении в настоящее время. Кирпичные стены позволяют значительно обогатить решение фасада за счет своей пластики [7], ввести в фасадные решения мелкое членение элементов, соразмерное человеку, что улучшает масштабность восприятия архитектурного объекта (рис. 3).

Ритм выявляется на фасаде метро-ритмичной повторяемостью объемов и планировок жилых секций, повторением простенков и оконных проемов, балконов, лоджий, эркеров и др.

Пропорциональность между отдельными элементами фасада (окнами, простенками, балконными экранами, участками с различной отделкой фасада и т.д.) и общими объемами здания позволяет усилить художественные достоинства и положительное впечатление от композиции жилого дома.

Отделка фасадов жилых домов и (или) отдельных его частей могут значительно различаться в соответствии с общим принятым композиционным и цветовым решением, материалом наружной отделки. За счет применения различных строительных отделочных материалов достигается богатое цветовое и текстурное решение фасадов. При этом текстура и рельеф поверхностей формируются как различными материалами (кирпич, бетон, натуральный и искусственный камень, современные фасадные системы и др.), так и множеством видов штукатурки (гладкая, «под шубу», под руст, орнаментальная и т.д.). Нельзя забывать об активной пластике объемов, что позволяет активизировать свето-теневое решение.

Цвет в архитектуре может означать очень многое. Он обычно представляет собой нечто более чем просто цвет или его отсутствие. В искусстве архитектуры, конструктивизма и некото-

рых других жанров, цвет символизирует ценности, образующие целую эстетическую философию. Включение в композицию жилых зданий цвета может существенно повысить их разнообразие и пластику. Цвет помогает добиться подчеркивания отдельных функциональных зон, например лестничных клеток или структурных элементов каркаса здания. При плоском монотонном фасаде, особенно в панельных зданиях, цвет придает разнообразие и усиливает пластику.

Большую роль в повышении архитектурно-художественных достоинств играет цветовое решение городской окружающей среды, жилых образований, включая элементы городской среды (школьные и дошкольные здания, инженерные сооружения, зоны отдыха и т.д.).

Изучение и творческое использование архитектурного наследия является важной предпосылкой обогащения и углубления языка современной архитектуры. Известные образцы архитектуры гражданских зданий могут служить своеобразным пособием для современных архитекторов и творческим импульсом при создании современных композиций архитектурно-конструктивных форм.

Выводы

Достижения настоящей эпохи позволяют реализовать и претворять в жизнь идеи, которые еще недавно казались утопией. Пространство – это то, что окружает всех нас, его можно видоизменять и именно это делает архитектор, проектируя жилой дом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Змеул Г., Маханько Б.А. Архитектурная типология зданий и сооружений. М.: Архитектура-С, 2004. 240 с.

2. Молчанов В.М. Теоретические основы проектирования жилых зданий. Ростов-на-Дону: Феникс, 2003. 236 с.
3. Матехина О.В. Планировка, застройка и реконструкция населенных мест. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2004. 213 с.
4. Осипов Ю.К., Матехина О.В. Архитектурно-типологические основы проектирования жилых зданий. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2013. 253 с.
5. Майкл Берд. 100 идей, изменивших искусство. М.: ЭКСМО, 2013. 216 с.
6. Хасиева С.А. Архитектура городской среды. М.: Стройиздат, 2001. 200 с.
7. Горбачев В.Т. Архитектура сибирских городов. Санкт-Петербург: КОЛО, 2016. 150 с.

REFERENCES

1. Zmeul G., Makhan'ko B.A. *Architectural typology of buildings and structures*. Moscow: Arkhitektura-S, 2004, 240 p. (In Russ.).
2. Molchanov V.M. *Theoretical foundations of the design of residential buildings*. Rostov-na-Donu: Feniks, 2003, 236 p. (In Russ.).
3. Matekhina O.V. *Planning, construction and reconstruction of populated places*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2004, 213 p. (In Russ.).
4. Osipov Yu.K., Matekhina O.V. *Architectural and typological foundations of the design of residential buildings*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2013, 253 p. (In Russ.).
5. Maikl Berd. *100 ideas that changed art*. Moscow: EKSMO, 2013. 216 p. (In Russ.).
6. Khasieva S.A. *Architecture of the urban environment*. Moscow: Stroiizdat, 2001, 200 p. (In Russ.).

7. Gorbachev V.T. *Architecture of Siberian cities*. SPetersburg: KOLO, 2016. 150 p. (In Russ.).

Сведения об авторах

Виктор Иванович Магель, профессор кафедры архитектуры, Сибирский государственный индустриальный университет

Юрий Константинович Осипов, к.т.н., доцент кафедры архитектуры, Сибирский государственный индустриальный университет

Ольга Владимировна Матехина, заведующий кафедрой архитектуры, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: olgamatekhina@yandex.ru

Information about the authors

Viktor I. Magel', Professor of the Department of Architecture, Siberian State Industrial University

Yurii K. Osipov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Architecture, Siberian State Industrial University

Ol'ga V. Matekhina, Head of the Department of Architecture, Siberian State Industrial University
E-mail: olgamatekhina@yandex.ru

© 2022 г. В.И. Магель, Ю.К. Осипов,
О.В. Матехина

Поступила в редакцию 3 февраля 2022 г.

ОЦЕНКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПАРНИКОВОГО ЭФФЕКТА

В. В. Стерлигов, В. К. Дробышев

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

Аннотация. Проведено исследование по определению показателей и характеристик процесса потепления в терминах, понятных широкому кругу людей, с использованием доказательств из источников достаточно известных в мире. Эта работа позволит хотя бы приблизительно дать оценку количественным показателям явлений, представляющим значимый научный и социальный интерес.

Ключевые слова: потепление климата, парниковый эффект, лучистый теплообмен, степень черноты, оксид углерода CO₂

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания (шифр 0809-2021-0013).

Для цитирования: Стерлигов В.В., Дробышев В.К. Оценка теплофизических параметров парникового эффекта // Вестник СибГИУ. 2022. № 2 (40). С. 71 – 76.

ASSESSMENT OF THERMOPHYSICAL PARAMETERS OF THE GREENHOUSE EFFECT

V. V. Sterligov, V. K. Drobyshev

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

Abstract. A study was conducted aimed at determining the indicators and characteristics of the warming process in terms understandable to a wide range of people, using evidence from sources well known in the world. This work will allow at least an approximate assessment of quantitative indicators of phenomena of significant scientific and social interest for a wide range of readers.

Keywords: climate warming, greenhouse effect, radiant heat transfer, degree of blackness, carbon oxide CO₂

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

For citation: Sterligov V. V., Drobyshev V. K. Estimation of thermophysical parameters of the greenhouse effect. *Bulletin of SibSIU*. 2022, no. 2 (40), pp. 71 – 76 (In Russ.).

Проблемой современного общества является глобальное потепление климата на Земле. Организация объединенных наций приняла специальный документ, посвященный этому вопросу («Рамочная Конвенция по вопросам изменения климата») [1]. Эта концептуальная разработка была реализована через ряд решений конкретного характера и прямого действия, включая Киотский протокол [2], а поскольку его срок действия закончился в 2012 г., то в развитие его было выработано «Парижское согла-

шение», подписанное в декабре 2015 г. главами более 190 стран.

Потепление климата имеет феноменологический характер, то есть признается сам факт существования явления без научного описания причинно-следственной связи между разными факторами климатической катастрофы. Тем самым, правильность самого предположения остается недоказанной. Кроме метеорологии (климата), здесь присутствует и экономика, и география, и демография и многое другое, что определяет жизнь людей.

Настоящая работа направлена на определение некоторых показателей и характеристик процесса потепления, оценки их влияния на глобальные тенденции. Исследование позволит хотя бы приблизительно дать оценку количественным показателям в терминах, понятных широкому кругу людей, сообщая доказательства, основанные известных в мире на источниках.

Объектом изучения является планета Земля, которая при движении в космосе, сопровождается газовой оболочкой присоединенного воздуха, называемой стратосферой. В атмосфере, имеющей несколько характерных слоев, выделяется тропосфера, первый слой от поверхности земли, высотой (толщиной) в среднем 10 км. В этом слое сосредоточено 80 % всей массы стратосферы, в котором протекают основные процессы формирования облаков, развитие турбулентностей и циклонов-антициклонов [3]. В этом допущении уже виден характер исследования – найти «оценку» величины, определить хотя бы порядок. Сравнивая размеры Земного шара с радиусом $R = 6370$ км и тропосферы (толщина слоя 10 км), находим, что площадь поверхности Земли A_3 и верхней поверхности тропосферы газовой оболочки A_T отличаются на доли процента (около 0,2 %), то есть $A_3 \approx A_T$. Известно [4], что такое условие выполняется для двух бесконечно больших плоскопараллельных поверхностей, поэтому в расчетах принимали, что слой тропосферы плоский.

При расчете лучистого теплообмена, который реализуется в газовом слое тропосферы, необходимо знать расчетную толщину S газового слоя. Из теории теплопередачи [5] для такой геометрии $S = 1,8\delta$ (где δ – толщина слоя, м).

Ниже представлена попытка рассмотреть «парниковый эффект» с позиции теплопередачи, используемой для описания лучистого теплообмена в теплотехнических агрегатах, где достигается адекватность расчетной модели и практических результатов.

Общепринятый механизм лучистого теплообмена представлен на рисунке.

Приходящее из космоса излучение E_k реализуется на «жестких» (коротких) волнах, которые в большей части поглощаются поверхностью Земли. Разница $E_k - \Delta E_k = E_3$ отражается (излучается) Землей на длинных волнах, соответствующих тепловой части спектра. Это тепло может поглощаться газами, которые имеют в своем составе три и более молекул (CO_2 , H_2O , CH_4 , NH_3 , озон и другие). Пройдя через газовый слой, оставшаяся лучистая энергия Солнца $E_3 - E_T$ проходит через контрольную поверхность в космос, где поглощается. Эта способность поглощать лучистую энергию характеризуется

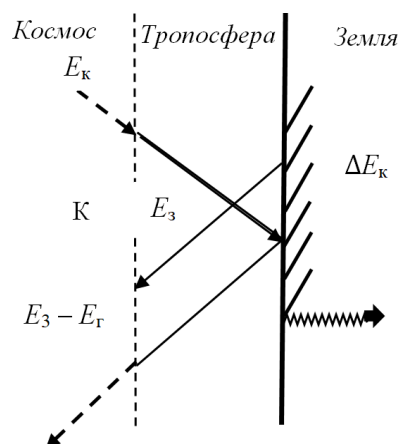


Схема лучистого теплообмена:

E_k – космическое излучение; ΔE_k – поглощенное Землей излучение; E_3 – излучение Земли; E_T – излучение, поглощенного газа

The scheme of radiant heat exchange:

E_k – cosmic radiation; ΔE_k – radiation absorbed by the Earth; E_3 – radiation of the Earth; E_T – radiation of absorbed gas

«степенью черноты» газа E_T , которая зависит от толщины газового слоя (эффективной длины луча) S и состава газа, выражаемого через парциальное давление поглощающего газа P_T , Па.

Исходя из этих определений, расчет проводится при следующих допущениях:

- слой рассматривается как бесконечно плоский;
- учитывается действие только оксида CO_2 ;
- излучение является единственным видом теплообмена;
- максимальной в системе является температура поверхности Земли ($t_3 = 27$ °C; $T_3 = 300$ К);
- температура космоса $T_k = 0$ К;
- реальный процесс парникового эффекта представляется как теплообмен излучениями между двумя плоскими поверхностями (Земли и верхней границы тропосферы).

Уравнение лучистого теплообмена между двумя поверхностями, разделенными слоем поглощающего газа, описывается уравнением [5]:

$$q_{3-k} = \epsilon_{np} C_0 \left[\left(\frac{T_3}{T_{100}} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{T_{100}} \right)^4 \right], \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad (1)$$

где q_{3-k} – плотность теплового потока; ϵ_{np} – приведенная степень черноты системы; C_0 – коэффициент излучения идеального излучателя, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; T_3 и T_k – абсолютная температура поверхности Земли и космоса, К.

Для рассматриваемой геометрии [6] тепло, усвоенное газовым слоем, определяется

$$q_T = \epsilon_T q_{3-k}. \quad (2)$$

После подстановки всех известных параметров действующих факторов получим тепловой поток, усваиваемый газом:

$$q_r = \varepsilon_r \varepsilon_3 C_0 \left(\frac{T_3}{T_{100}} \right)^4, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (3)$$

Уравнение (3) учитывает условия $\varepsilon_k = 1$, $T_k = 0$ К и позволяет получить оценку плотности теплового потока (то есть мощность теплового потока на 1 м^2 поверхности).

Общее количество тепла, поглощенное всей поверхностью A_n , м^2 , в течение времени τ , с, определится из выражения

$$Q_r = q_r A_n \tau, \text{ Дж}. \quad (4)$$

Выражения (1) – (3) для оценки интенсивности теплового излучения содержат параметр ε (степень черноты), который характеризует степень совершенства излучателя по сравнению с идеальным, для которого $\varepsilon_0 = 1$, для реальных тел излучателей $\varepsilon < 1$. Для земной поверхности можно принять $\varepsilon_3 = 0,8$ [6].

Степень черноты газов (атмосферы) ε_r зависит от состава атмосферы, определяемого через парциальное давление P , Па, от геометрии (длина свободного пробега излучения, «эффективная длина луча») S , м, температуры газов T_r , К.

Для оксида CO_2 степень черноты принято считать по уравнению Хоттеля [7], когда определяется величина интенсивности теплового потока E_{CO_2} :

$$E_{\text{CO}_2} = 3,5(PS)^{0,33} C_0 \left(\frac{T_r}{T_{100}} \right)^{3,5}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (5)$$

Зависимость (5) приводится к универсальной форме закона излучения Стефана – Больцмана:

$$E_{\text{CO}_2} = \varepsilon_{\text{CO}_2} C_0 \left(\frac{T_r}{T_{100}} \right)^4. \quad (6)$$

Из условий идентичности уравнений (5) и (6) определяется выражение для степени черноты оксида CO_2 , то есть $\varepsilon_{\text{CO}_2} = \varepsilon_r$:

$$\varepsilon_{\text{CO}_2} = f(PS; T_r). \quad (7)$$

Для практического применения используется диаграмма, содержащая графическую интерпретацию зависимости (7). Для этого определяется по условиям задачи парциальное давление P , ата, и

эффективную длину луча. Из закона Дальтона [8] получим

$$P_{\text{CO}_2} = P \cdot \text{CO}_2 = 1 \cdot 0,0004 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ ата}. \quad (8)$$

Концентрация оксида CO_2 в атмосфере составляет 0,04 % взята из работы [9]. В других источниках содержатся следующие значения для концентрации CO_2 в воздухе: 0,0314 % [10]; 0,0333 – 0,0337 % [11]; 0,03 – 0,05 % [12]. В дальнейшем будем использовать значение $\text{CO}_2 = 0,04$ %.

При подстановке значений получим

$$E_{\text{CO}_2} = 1,163 \cdot 3,5 (4 \cdot 10^{-4} \cdot 168 \cdot 10^3)^{0,33} \left(\frac{260}{100} \right)^{3,5} = 102,65 \text{ Вт/м}^2.$$

Степень черноты оксида CO_2 $\varepsilon_r = 0,39$.

Подставляя значение ε_r и ε_3 в уравнение (4), получим

$$q_r = 0,39 \cdot 0,8 (1 - 0,39) \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 = 8,69 \text{ Вт/м}^2.$$

Используя справочные данные [3], для площади поверхности тропосферы Земли $A_3 = 5,1 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$, длительность года $\tau = 31,536 \cdot 10^6$ с определим количество тепла, полученное газовым слоем тропосферы:

$$Q_r = q_r A_n \tau = 8,69 \cdot 5,1 \cdot 10^{14} \cdot 31,536 \cdot 10^6 = 139,76 \cdot 10^{21} \text{ Дж}.$$

Из уравнения теплового баланса

$$Q_r = C_r M_r \Delta t, \text{ Дж}, \quad (9)$$

можно найти возможное увеличение температуры газового слоя за год:

$$\Delta t = \frac{Q_r}{C_r M_r}. \quad (10)$$

Из работы [8] для теплоемкости воздуха $c = 1 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$ [8] и масса тропосферы $M_r = 4,2 \cdot 10^{18} \text{ кг}$, получим

$$\Delta t = \frac{70,6 \cdot 10^{21}}{1 \cdot 10^3 \cdot 4,2 \cdot 10^{18}} = 17,5 \text{ } ^\circ \text{C}.$$

Практические данные (1 – 2 °C) значительно отличаются от полученных результатов расчета, сле-

довательно, составленная математическая модель не адекватна практике, хотя задача и ее решение поставлены физически корректно, о чем свидетельствует размерность определяемых величин.

Следующим этапом будут операции, которые определяются в теории моделирования как «идентификация модели», то есть нахождение численных коэффициентов, принятых при аппроксимации условий модели, которые бы создавали адекватность модели процессу.

Такие показатели как степень черноты земной поверхности, на 60 % состоящей из поверхности мирового океана, средние температуры слоя газов и поверхности Земли, выделение в качестве объекта исследования только тропосферы сразу вносили возможность ошибки. Расчеты позволили определить порядок величин, причем глобального уровня, и это уже можно считать позитивным результатом, хотя и не подтвержденным практикой. Это подчеркивает практическую невозможность решения такой задачи, так как нужно создать точные локальные характеристики разных участков земной коры для разных времен года, разных стран и так далее. Полезность результата настоящей работы – доказательство верности методологического подхода и возможность использовать этот материал как демонстрационный при обучении специалистов.

Одним из способов идентификации модели является численное моделирование, когда проводят ряд расчетов при различных исходных данных с тем, чтобы приблизиться к практическим (реальным) данным на основе предложенной структуры модели.

Анализ расчетной модели выявляет различные физические факторы (среди которых в первую очередь будут влиять степень черноты разных участков земной поверхности, ее температура) и можно получить разные численные результаты.

Если учесть, что 30 – 40 % поверхности Земли занято сушей со степенью черноты 0,8, а 60 – 70 % – занято водой со степенью черноты 0,2, можно получить средневзвешенное значение степени черноты поверхности земного шара:

$$\varepsilon_3 = 0,3 \cdot 0,8 + 0,7 \cdot 0,2 = 0,38.$$

Если считать теплообмен для летнего периода при температуре $T_3 = 310$ К, получим

$$q_3 = \varepsilon_3 C_0 \left(\frac{T_3}{T_{100}} \right)^4 = 20,29 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Для зимнего периода при использовании показателей снега ($\varepsilon_3 = 0,96$ и $T_3 = 250$ К) получим среднее значение степени черноты земной поверхности:

$$\varepsilon_3 = 0,3 \cdot 0,96 + 0,7 \cdot 0,2 = 0,44;$$

$$q_3 = 0,44 \cdot 5,77 \left(\frac{250}{T_{100}} \right)^4 = 99,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Из этих расчетов видим, что тепловое излучение Земли в космос, часть которого удерживается в тропосфере, может колебаться в значительном диапазоне, для рассматриваемого сочетания входных факторов почти в два раза. Следовательно, и повышение температуры тропосферы может изменяться тоже в два раза. Для получения адекватной модели нужно точно определить эти факторы, обобщенные средней величиной степени черноты земной поверхности и температуры ввиду ее слишком выраженной неравномерностью локальных значений, вызванных метеорологическими условиями.

Используя данные из работы [14], Земля получает от Солнца в год $Q_c = 1,66 \cdot 10^{25}$ ккал. Из них 60 % поглощается атмосферой (большой частью ультрафиолетового излучения) и до Земли доходит только 40 % от величины Q_3 :

$$Q_3 = 0,4 Q_c = 0,664 \cdot 10^{25} \frac{\text{ккал}}{\text{год}}.$$

В соответствии с теорией лучистого теплообмена Земля от этого количества поглощает $Q_3^{\text{полг}} = \varepsilon_3 Q_3 = 0,252 \cdot 10^{21} \frac{\text{ккал}}{\text{год}}$, а остальное переизлучает в атмосферу и в космос в количестве

$$Q_3^{\text{изл}} = (1 - \varepsilon_3) Q_3 = 0,160 \cdot 10^{21} \frac{\text{ккал}}{\text{год}}.$$

Часть этого тепла будет поглощаться тропосферой, что приведет к увеличению температуры газа: $Q_r = \varepsilon_r Q_3^{\text{изл}} = 0,160 \cdot 10^{21}$ ккал.

На основании теплового баланса для газов можно записать $Q_r = C_{\text{сп}} M_r \Delta t_2$.

По полученному уравнению можно определить возможное повышение температуры. Определив теплоемкость для воздуха $Q = 0,31$ ккал/(К·град) при $t = 0$ °С и массу тропосферы $M = 0,8 M_{\text{ст}} = 4,2 \cdot 10^{21}$ кг, получим $\Delta t = Q_r / (C_{\text{сп}} M_r)$. После подстановки численных значений $\Delta t = 15,8$.

Из результатов сравнения расчетов возможного возрастания температуры видно (по теоретической модели и из данных сальдо-потока на Землю), что они дают значения одного порядка. Первая из них рассчитана на основе гипотезы о применимости геометрической модели теплообмена между Землей и космосом как случая теплообмена между бесконечно большими плоскопараллельными поверхностями, для одной из которых в представленной модели степень черноты космоса $\varepsilon_k = 1$, что логически оправдано.

Совпадение результатов использования теоретической модели теплообмена (гипотезы) и эмпирического обобщения требует признания факта приближения к истине.

Из литературы известна еще одна величина, характеризующая явление излучения Солнца на Землю. В работе [13] содержится понятие «постоянной солнечной радиации» $E = 2 \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$, которое определяет количество солнечной энергии, приходящейся на 1 см^2 перпендикулярно расположенной поверхности, равной. Эту величину можно связать с оценками Аррениуса, которыми оперирует В.И. Вернадский записав $Q_c = EF\tau, \frac{\text{ккал}}{\text{год}}$.

В качестве величины F нужно принять проекцию земного шара на поверхность, перпендикулярную направлению лучей, то есть площадь тени Земли.

Определив $\tau = 51,81 \cdot 10^3$ мин и $F = \pi R_3^2 = 127,476 \cdot 10^{18} \text{ см}^2$, после подстановки получим $Q = 1,340 \cdot 10^{24} \frac{\text{кал}}{\text{год}} = 1,340 \cdot 10^{21} \frac{\text{ккал}}{\text{год}}$.

Это почти на порядок отличается от данных С. Аррениуса и расчетов В.И. Вернадского, где $Q_c = 1,66 \cdot 10^{25} \frac{\text{ккал}}{\text{год}}$.

Таким образом, становится очевидным, что детерминированная модель теплообмена не дает адекватных результатов, а статистический подход, изложенный в работе [16], позволяет определить тренд изменения температуры атмосферы. Упомянутый доклад содержит диаграмму, где в хронологическом порядке за период 1939 – 2018 гг. представлены температурные аномалии в России, рассчитанные как отклонения от средней глобальной температуры.

За период 1969 – 1990 гг. было выявлено линейное повышение температуры в пределах $0,47 \text{ }^\circ\text{C}$ за десятилетие, что в 2,5 раза больше глобального показателя ($0,18 \text{ }^\circ\text{C}$ за десятилетие). Внутри территории страны существует значительный разброс этого показателя по регионам. Так, для крайнего Севера и Дальнего Востока за период 1976 – 2013 гг. он составил $0,81 \text{ }^\circ\text{C}$, для Запада европейской части России около $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$, а для Юга Западной Сибири $0,2 - 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ за десятилетия. Кроме того, отмечаются и сезонные колебания среднего значения по стране за десятилетие: для зимнего периода характерна цифра $0,39 \text{ }^\circ\text{C}$; для летнего – $0,41 \text{ }^\circ\text{C}$; для весеннего – $0,61 \text{ }^\circ\text{C}$.

Это является практическим подтверждением вывода о том, что определение температурных трендов носит феноменологический характер на базе регулярной систематической регистрации этого параметра, с позиции математической статистики эти величины являются «случайными», то есть определяемые с известной погрешностью. Данные этих наблюдений

имеют неоспоримый характер, но вызывает сомнение возможность их применения для уверенного прогнозирования. В этом случае необходимо проводить экстраполяцию опытных зависимостей, что не всегда допустимо. Обращаясь к уже упомянутой диаграмме в работе [16], можно увидеть, что в период 1930 – 1970 гг. существовал очень слабый тренд к понижению температуры, и используя его можно было прийти к выводу о будущем похолодании, что последующие годы не подтвердили.

Математические процедуры создания прогнозов (сценариев) изменения климата довольно сложны и основаны на анализе нескольких моделей общей циркуляции. Существующий международный орган по изучению изменения климата (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change) использует стадильную методологию с привлечением мощной сети обсерваторий и компьютерных центров [17]. Эта методология понятно только специалистам. Для разъяснения, информирования и популяризации рассматриваемых проблем нужны другие подходы к описанию и их моделированию.

Выводы

Признавая значимость проблемы, Правительство России приняло стратегию социально-экологического развития страны на основе снижения выбросов. Для решения многих вопросов нужна математическая модель этого явления (потепление климата). Приведенный анализ показал, что даже при наличии правильной физической методологии лучистого теплообмена в газовой среде для проблемы парникового эффекта это решение возможно только при большом массиве практически данных (степень черноты, температура, контуры и площадь отдельных участков Земли), что достижимо только на основе большого количества показателей и наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рамочная конвенция ООН об изменении климата. 1962.
2. Киотский протокол. Электронный ресурс. URL: www.carbonmarketsolutions.com. (Дата обращения: 04.03.2022).
3. Советский энциклопедический словарь. IV издание. М.: Советская энциклопедия, 1987. 1600 с.
4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. СПб.: Лань, 2010. 608 с.
5. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973. 320 с.
6. Казанцев Е.И. Промышленные печи. М. Металлургия. 1964, 462 с.
7. Мак-Адамс В.Х. Теплопередача / Перевод с англ. Б.Л. Маркова; под ред. Л.С. Эйгенсо-

- на, К.Д. Воскресенского. М.: Metallurgizdat, 1961. 686 с.
8. Варгафтик Н.Б. Теплофизические свойства веществ. М.: Госэнергоиздат, 1956. 683 с.
 9. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматлит, 1963. 562 с.
 10. Бюллетень ВМО по парниковым газам. 2019. № 15.
 11. Grandars. ru. Электронный ресурс. URL: <http://www.grandars.ru/shkola/geografiya/sostav-atmosfery/htme> (Дата обращения: 04.03.2022).
 12. Планета Земля. Электронный ресурс. URL: <http://wonderful-planet.ru/atmosphere/97> (Дата обращения: 04.03.2022).
 13. Экобаланс. Независимая экологическая экспертиза/ Электронный ресурс. URL: <http://ecobalans.ru/investigations> (Дата обращения: 04.03.2022).
 14. Блох А.Г. Основы теплообмена излучением. М.: Госэнергоиздат, 1962. 382 с.
 15. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Айрис, 2003. 575 с.
 16. Хендель А. Основные законы физики. М.: Физматгиз, 1958. 284 с.
 17. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 г. М.: Росгидромет, 2019. 76 с.
 18. Special Report of Working Group I and II of IPCC. Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Shaftesbury Road, Cambridge CB2 8RU ENGLAND. 2012. P. 109–230.
 9. Vargaftik N.B. *Handbook of thermophysical properties of gases and liquids*. Moscow: Fizmatlit, 1963, 562 p. (In Russ.).
 10. *WMO Greenhouse Gas Bulletin*. 2019, no. 15. (In Russ.).
 11. *Grandars*. ru. Electronic resource. URL: <http://www.grandars.ru/shkola/geografiya/sostav-atmosfery/htme> (Data obrashcheniya: 04.03.2022).
 12. *Planet Earth*. Electronic resource. URL: <http://wonderful-planet.ru/atmosphere/97> (Data obrashcheniya: 04.03.2022). (In Russ.).
 13. *Ecobalance. Independent environmental expertise*. Electronic resource. URL: <http://ecobalans.ru/investigations> (Data obrashcheniya: 04.03.2022).
 14. Blokh A.G. *Fundamentals of heat exchange by radiation*. Moscow: Gosenergoizdat, 1962, 382 p. (In Russ.).
 15. Vernadskii V.I. *Biosphere and noosphere*. Moscow: Airis, 2003, 575 p. (In Russ.).
 16. Khendel' A. *Basic laws of physics*. Moscow: Fizmatgiz, 1958, 284 p. (In Russ.).
 17. *Report on the peculiarities of the climate in the territory of the Russian Federation for 2018*. Moscow: Rosgidromet, 2019, 76 p. (In Russ.).
 18. *Special Report of Working Group I and II of IPCC*. Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Shaftesbury Road, Cambridge CB2 8RU ENGLAND. 2012. P. 109–230.

Сведения об авторах

Владислав Викторович Стерлигов, к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: kafedra-tee@yandex.ru

Владислав Константинович Дробышев, магистрант кафедры электротехники, электропривода и промышленной электроники, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: drobyshev_v.k@mail.ru

Information about the authors

Vladislav V. Sterligov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University
E-mail: kafedra-tee@yandex.ru

Vladislav K. Drobyshev, Master's student of the Department of Electrical Engineering, Electric Drive and Industrial Electronics, Siberian State Industrial University
E-mail: drobyshev_v.k@mail.ru

REFERENCES

1. *The UN Framework Convention on Climate Change*. 1962. (In Russ.).
2. *Kyoto Protocol*. Electronic resource. URL: www.carbonmarketsolutions.com. (Accessed: 04.03.2022). (In Russ.).
3. *Soviet Encyclopedic Dictionary*. IV edition. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1987, 1600 p. (In Russ.).
4. Bronshtein I.N., Semendyaev K.A. *Handbook of Mathematics for engineers and university students*. St. Petersburg: Lan', 2010. 608 s. (In Russ.).
5. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Fundamentals of heat transfer*. Moscow: Energiya, 1973, 320 p. (In Russ.).
6. Kazantsev E.I. *Industrial furnaces*. Moscow: Metallurgiya. 1964, 462 p. (In Russ.).
7. Mak-Adams V.H. Eigenson L.S. ed., Voskresenskov K.D. *Heat Transfer*. Perevod s angl. Markov B.L. Moscow: Metallurgizdat, 1961, 686 p. (In Russ.).
8. Vargaftik N.B. *Thermophysical properties of substances*. Moscow: Gosenergoizdat, 1956, 683 p. (In Russ.).

© 2022 г. В.В. Стерлигов, В.К. Дробышев
 Поступила в редакцию 4 марта 2022 г.

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:

- металлургия и материаловедение;
- горное дело и геотехнологии;
- машиностроение и транспорт;
- энергетика и электротехнологии;
- химия и химические технологии;
- архитектура и строительство;
- автоматизация и информационные технологии;
- экология и рациональное природопользование;
- экономика и управление;
- образование и педагогика;
- социально-гуманитарные науки;
- отклики, рецензии, биографии.

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 10.

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 до 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 следует 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 оформле-

нию 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 и представлены на сайте СибГИУ (www.sibsiu.ru) в разделе Наука и инновации (Периодические научные издания (Журнал «Вестник СибГИУ»)).

На д н о м е р о м р а б о т а л и

Коновалов С.В., главный редактор

Запольская Е.М., ответственный секретарь

Бащенко Л.П., ведущий редактор

Киселева Н.Н., ведущий редактор

Темлянцева Е.Н., верстка

Олендаренко Е.В., менеджер по работе с клиентами