

В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, В. П. Кулевич, С. А. Кузнецов, М. Д. Романенко

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ
НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДОВ ЖЕЛЕЗА,
СФОРМИРОВАННЫХ НА СТАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ***

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Показано, что в покрытиях FeAl/Fe₃Al/Fe(Al), сформированных на стальной основе с использованием сварки взрывом и последующей термообработки, основным механизмом разрушения является когезионный. Отслоение и скалывание покрытий происходит только при больших нагрузках или в случае слабой адгезии. Установлено, что твердость слоистого FeAl/Fe₃Al/Fe(Al) покрытия толщиной 440 мкм от подложки к поверхности увеличивается, на расстоянии 200 мкм от поверхности достигает максимума, а затем снижается за счет увеличения пористости. Его относительная износостойкость в ~1,5 раза выше основы из стали Ст3.

Ключевые слова: алюминиды железа, твердость, царапание, износостойкость, покрытия, адгезионное и когезионное разрушение

V. G. Shmorgun, O. V. Slautin, V. P. Kulevich, S. A. Kuznetsov, M. D. Romanenko

**STUDY OF WEAR RESISTANCE OF COATINGS BASED
ON IRON ALUMINIDES FORMED ON STEEL SURFACES**

Volgograd State Technical University

It has been shown that in FeAl/Fe₃Al/Fe(Al) coatings formed on a steel base using explosion welding and subsequent heat treatment, the main failure mechanism is cohesive. Peeling and chipping of coatings occurs only under heavy loads or in case of weak adhesion. It has been established that the hardness of a layered FeAl/Fe₃Al/Fe(Al) coating with a thickness of 440 μm increases from the substrate to the surface, reaches a maximum at a distance of 200 μm from the surface, and then decreases due to an increase in porosity. Its relative wear resistance is ~1.5 times higher than the St3 steel base.

Keywords: iron aluminides, hardness, scratching, wear resistance, coatings, adhesive and cohesive failure

Введение

Известно, что в металлургии алюминия, в частности в анодном производстве применяется большой ассортимент функционального (транспортирующего, накопительного, смешивающе-

го, прессового и т.п.) оборудования, где общим условием их работы является контакт с подготовленным промежуточным сырьем, в том числе с анодной массой (АМ). В промежуточном технологическом состоянии АМ является вязкой

© Шморгун В. Г., Слаутин О. В., Кулевич В. П., Кузнецов С. А., Романенко М. Д., 2024.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01245, <https://rscf.ru/project/23-79-01245/>

и склонной к налипанию на стенки оборудования, что в дальнейшем требует их периодической чистки, приводящей, в конечном итоге, к ускоренному износу [1; 2].

Так, например, как показывает практика, поверхности воронок (выполненных из низкоуглеродистой стали), контактирующие с АМ в процессе ее загрузки в накопительные бункеры смесителя АМ, наиболее интенсивно изнашиваются, что является следствием воздействия двух факторов. Во-первых, АМ содержит в своем составе (до $\approx 75\%$ по объему) твердые абразивные частицы – каменноугольный кокс (наполнитель). Гранулометрический состав наполнителя варьируется от 0,16 до 8,0 мм [3], а твердость частиц кокса может достигать (НВ) 318–330 МПа [4]. Во-вторых, входящий в состав АМ жидкий нефтяной пек (являющийся связующим), приводит в разогретом состоянии ($350 \div 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) к повышенной вязкости АМ и следствием этого к дальнейшему налипанию ее на внутренние поверхности воронок накопительных бункеров, что в дальнейшем требует ее периодического отделения механическим путем и, следовательно, ускоренному износу стенок воронок.

Процесс нанесения технологической защиты или формирования функциональных покрытий для указанных стальных поверхностей сопряжены с рядом трудностей. Так, операция напыления специальной эмульсии для предупреждения налипания анодных масс предусмотрена лишь по технологическим соображениям только на стенки виброформы и формовочной плиты пуансона при формировании анодов [3]. Нанесение на стенки воронок бункеров износостойких покрытий из порошков самофлюсующихся сплавов не избавляет от налипания АМ к стенкам воронок, а процесс ее механического отделения от стенок полностью исключается, учитывая склонность нанесенного покрытия к выкрошиванию. Использование порошковых высоколегированных сплавов (например, системы Ni-Cr-B-Si и др.) также не решает проблему налипания АМ, а сами многокомпонентные сплавы для напыления, как правило, достаточно дорогие. Полностью исключает налипание АМ нанесение защитных полимерных покрытий из фторопласта (Ф4), но, как показал опыт эксплуатации таких воронок в условиях предприятия, их ресурс сокращается многократно, т.к. подогретая АМ (до температуры $300 \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$), фактически перекрывает температурный диапазон надежной эксплуата-

ции как самого Ф4, т. е. $\leq 250 \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5–7], так и сформированных на его основе покрытий за счет резко возрастающего градиента ТКЛР в сравнении со стальной основой [5–7]. Из минусов фторопластовых покрытий следует также учесть высокую стоимость порошка для напыления или пленок для нанесения на внутренние поверхности воронок, что отрицательно сказывается на рентабельности производства в целом.

Формирование на поверхности контактирующих с АМ частей оборудования или оснастки из углеродистых или низколегированных сталей покрытий на основе алюминидов железа FeAl и Fe₃Al, обладающих достаточно высокими показателями твердости и износостойкости, является на наш взгляд одним из возможных путей минимизации их износа. Из достоинств таких покрытий, помимо возможности реализации комплекса наиболее востребованных их функциональных характеристик на необходимом уровне, следует отметить и потенциальное снижение количества стальных частиц, попадающих в состав сырья при чистке стенок оборудования.

Нанесение на стальные поверхности покрытий на основе алюминидов железа [8–17] можно осуществить множеством способов, однако в силу ряда специфики, сварка взрывом (СВ) в сочетании с последующей термообработкой (ТО) позволяет на практически неограниченных по размеру площадях получать покрытия на основе алюминидов железа заданного химического состава [18].

На основании изложенного, в настоящей работе проведены исследования, направленные на определение триботехнических характеристик при абразивном изнашивании покрытий на основе алюминидов железа, сформированных с помощью СВ и последующей ТО на стальной основе.

Материалы и методы исследования

В работе металлографические исследования выполняли на модульном металлографическом микроскопе Олимпус ВХ-61, твердость определяли на микротвердомере ПМТ-3М. Определение фазового и химического состава проводилось совокупностью методов электронной микроскопии, рентгеноспектрального энергодисперсионного анализа и рентгенофазового анализа. Сопоставление данных, полученных с помощью дифрактометра Bruker D8 ADVANCE ECO и растрового двухлучевого электронного микроскопа системы Versa 3D DualBeam, позво-

лило произвести с высокой вероятностью оценку фазового состава диффузионной зоны (ДЗ).

Исследования проводили на покрытиях, сформированных на поверхности стали по технологии (СВ + ТО) с режимами, опубликованных в [13–15]. Так, режимы СВ алюминия марки АД1 со сталью Ст3 представлены в табл. 1, двойную ТО полученной композиции проводили по режиму 660 °С, 3 ч + 640 °С, 3 ч (рис. 1, а). Далее проводилось механическое отделение непрореагировавшего алюминиевого слоя (рис. 1, б) с последующим ТО сформированно-

го покрытия (Fe_2Al_5) по режиму 1100 °С (1,5 ч), обеспечивающую его трансформацию в следующей последовательности $\text{Fe}_2\text{Al}_5 \rightarrow \text{FeAl}_2 \rightarrow \text{FeAl} \rightarrow \text{Fe}_3\text{Al} \rightarrow \text{Fe(Al)}$ и увеличение толщины с 270 до 440 мкм (рис. 1, в, г).

Таким образом, сформированное на стальной основе слоистое $\text{FeAl}/\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Fe(Al)}$ покрытие твердостью ≈ 6 ГПа на межфазной $\text{FeAl}/\text{Fe}_3\text{Al}$ границе имело пористое строение, а в алюминиде Fe_3Al твердостью $\approx 2,7$ ГПа присутствовали включения сульфидов марганца.

Таблица 1

Параметры сварки взрывом биметаллических АД1 + Ст3 пластин

Материал	Толщина слоя, мм	Тип ВВ	Высота заряда, мм	Высота зазора, мм	Скорость детонации, м/с	Скорость соударения, м/с
АД1	2	Аммонит № 6ЖВ	40	2	1900	360
Ст3	3					

Оценочные испытания алюминидного покрытия на сопротивляемость поверхностного слоя граничному износу выполняли на машине трения СМЦ-2 (рис. 2). В качестве роликов использовали сталь 35 в горячекатаном состоянии (диаметр 40 мм, ширина 10 мм) твердостью не более 163 НВ, сопряженных в паре с контртелом из стали Ст3 (эталон) и алюминидным покрытием. Удельная нагрузка на образец составляла 0,5 МПа, линейная скорость 0,08 м/с, в ка-

честве охлаждающей жидкости использовалась техническая вода, замер массы колодок и роликов после их просушки проводили спустя 5; 10; 20 и 60 минут испытания. Весовой износ определяли на электронных весах VIBRA AJ-620CE с точностью до 0,001 г. Формообразование образцов (рис. 3) для плотного сопряжения с роликом осуществляли с помощью специально изготовленной пресс-формы из стали 50ХГФА на разрывной машине УММ-10тм перед их ТО.

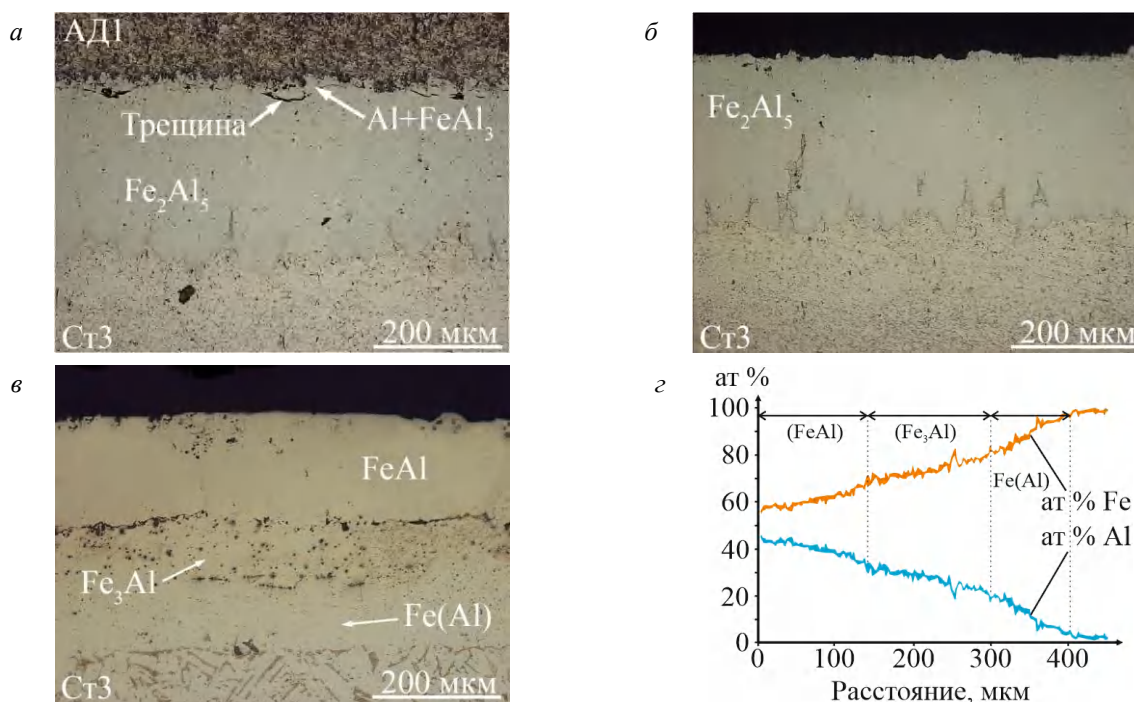


Рис. 1. Микроструктуры:

а – ДЗ после ТО 660 °С, 3 ч + 640 °С, 3 ч; б – после механического отделения алюминиевого слоя; в – покрытия после ТО 1100 °С, 1,5 ч с распределением химических элементов по его толщине (г)

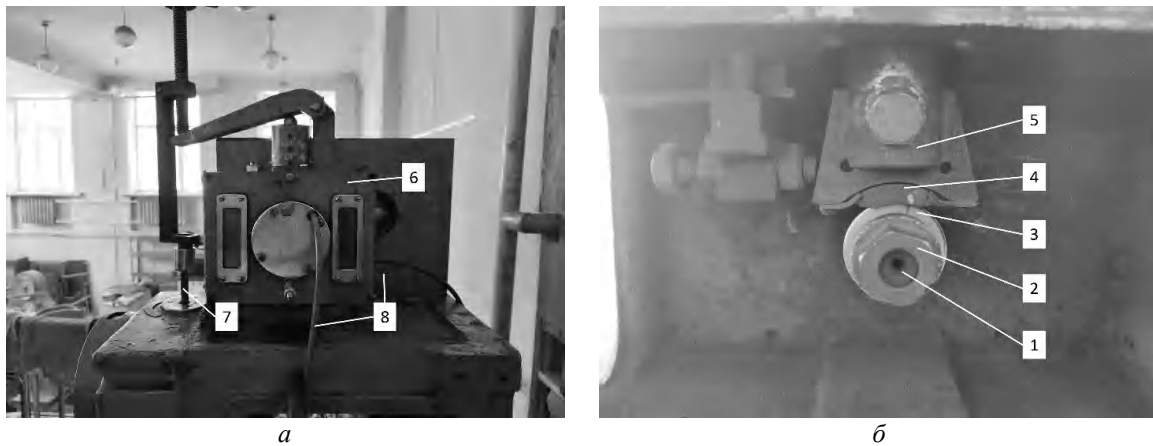


Рис. 2. Установка СМЦ-2 (а) и внутренний вид камеры с сопряжением ролик – контртело (б):
1 – вал; 2 – поджимная гайка; 3 – образец; 4 – контртело (колодка); 5 – шток; 6 – камера (для жидких сред);
7 – механизм нагружения; 8 – трубки подвода/отвода жидкости

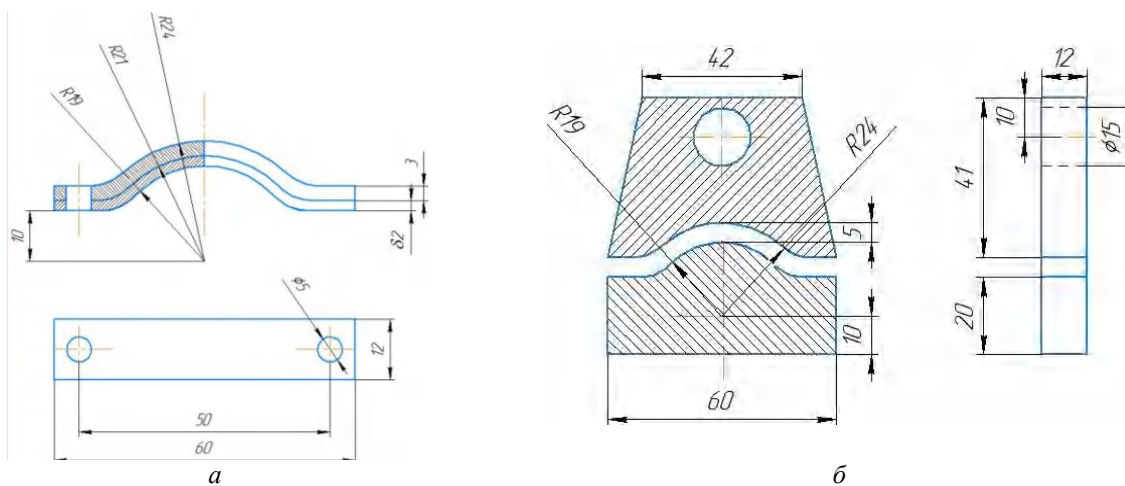


Рис. 3. Образец для испытания на износ (а) и пресс-форма из стали 50ХГФА для формообразования образцов (б)

Результаты и их обсуждение

Испытания на износ показали (табл. 2, рис. 4, 5), что в зависимости от времени воздействия ролика на контртело (покрытие на основе FeAl), относительная износостойкость образцов с покрытием в 1,5–2 раза выше стали Ст3 (рис. 5, в). Более низкий износ при 5 мин испытания связан с повышенными значениями твердости внешней поверхности покрытия, что может быть связано с более высокой концентрацией алюминия в поверхностных слоях покрытия. Далее, в диапазоне времени испытания 10–30 минут, процесс износа несколько интенсифицируется, что, по нашему мнению, является результатом двух факторов. Во-первых, происходит процесс полной притирки контактных поверхностей при трении. Во-вторых, более интенсивное истирание рабо-

чей глубины покрытия первой его половины по толщине (до 400 мкм) связано с наличием пор (пустот Киркендалла) в структуре, изначально образовавшихся при ТО.

Эти пустоты, в свою очередь, являясь объемными дефектами, под воздействием ролика, оголяются, т. е. трансформируются в поверхностные дефекты (раковины). Поскольку истирающее воздействие непрерывно, то кромки округлых раковин, образовавшихся при открытии пор, также будут скалываться и разрушаться, а до момента выноса продукта износа (осколков покрытия), они выполняют функцию абразива, интенсифицирующего изнашивание. Указанный процесс будет усугубляться кавитацией, поскольку испытание проводится в водной ванне.

Таблица 2

Результаты испытаний на изнашивание алюминиевых покрытий

Величина износа (по потере)	Время испытания, мин				
	Поверхность	5	10	20	60
Массы, г	Сталь Ст3	0,202	0,45	0,982	2,964
Объема, мкм ³		26	59	126	380
Массы, г	Алюминидное покрытие	0,068	0,185	0,4	0,846
Объема, мкм ³		16	45	95	201
Относительный износ		1,63	1,31	1,36	1,97

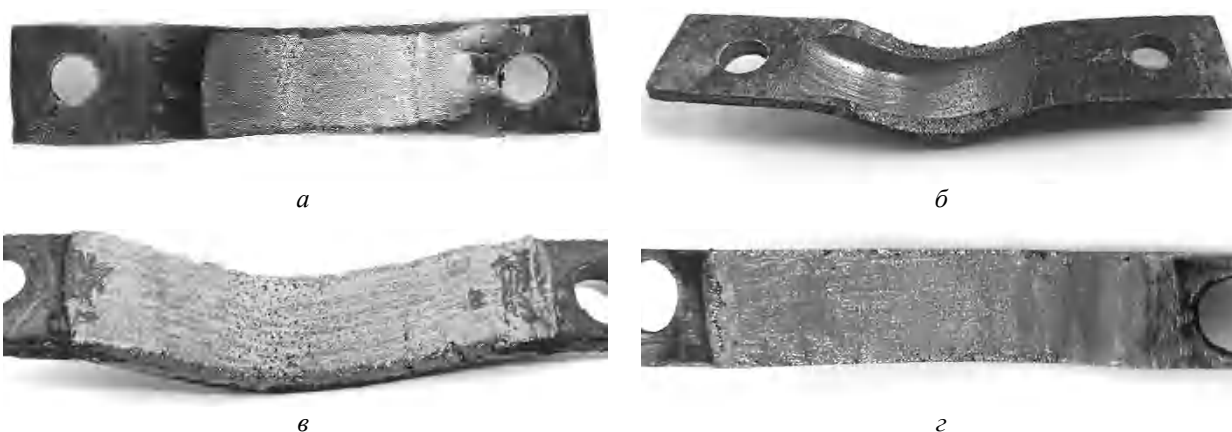


Рис. 4. Образцы после испытания на износ:
а, б – Ст3; *в, з* – алюминиевое покрытие на подложке из Ст3. Время испытания: 10 мин (*а, в*); 60 мин (*б, з*)

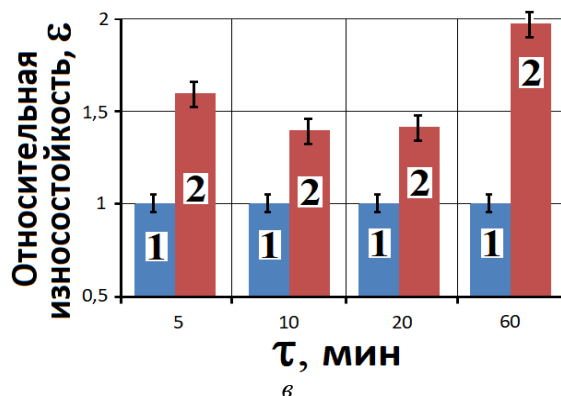
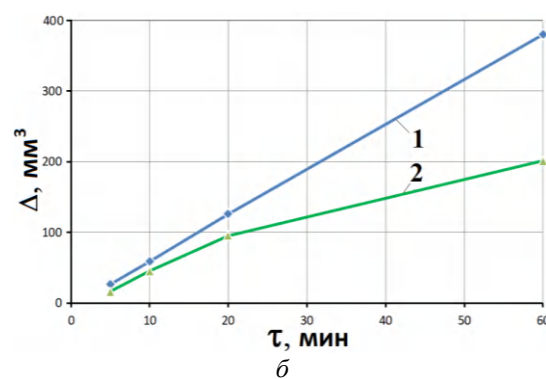
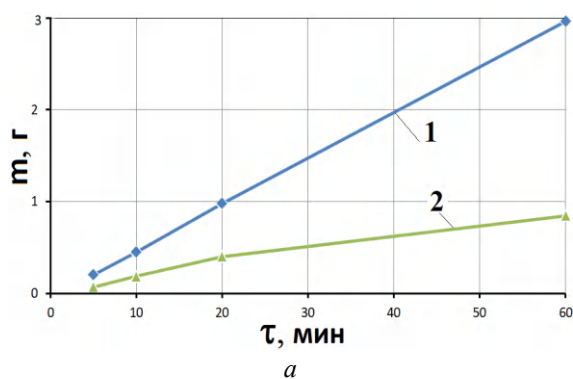


Рис. 5. Потеря массы, m (*а*); объема, ΔV (*б*) и относительная (*в*) износостойкость (ϵ) образцов после испытаний на изнашивание при трении по горячекатаной стали 35 в воде: 1 – сталь Ст3; 2 – алюминиевое покрытие

Вывод

Поскольку относительная износостойкость сформированного покрытия FeAl/Fe₃Al/Fe(Al) с использованием сварки взрывом и последующей термообработки на стальной основе выше в ≈1,5 раза основы из стали Ст3, то предложенная технология позволяет его применять для нанесения на стенки различных воронок бункеров, транспортеров контактирующих с анодной массой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Троцкий, И. А. Металлургия алюминия / И. А. Троцкий, В. А. Железнов. – Москва : Металлургия, 1977. – 392 с.
2. Минцис, М. Я. Электрометаллургия алюминия / М. Я. Минцис, П. В. Поляков, Г. А. Сиразутдинов. – Новосибирск : Наука, 2001. – 368 с.
3. Янко, Э. А. Аноды алюминиевых электролизеров / Э. А. Янко. – М. : Издательский дом «Руда и металлы», 2001. – 674 с.
4. S. A. Ageel, A. M. Saleem, B. B. Farhad M. Abdul Mujeebu and, J. M. Alalkawi, Cold Extrusion of Carbon Electrodes Using Dies of CRHS Concept and Performance Analysis, Modern Applied Science (Journal of Canadian Center of Science and Education), 2009, Vol. 3, No. 3, pp. 44–54.
5. Панишин, Ю. А. Фторопласты / Ю. А. Панишин, С. Г. Малкевич, И. С. Дунаевская. – Л. : Химия, 1978. – С. 12–53.
6. Ebnesajjad, Sina Fluoroplastics: Non-melt processible fluoropolymers - the definitive user's guide and data book. / Sina Ebnesajjad. – Volume 1. 2nd Edition. – Elsevier Inc., 2015. – 718 p.
7. Фторполимерные материалы / Адаменко Н. А., Болбасов Е. Н., Бузник В. М., Вавилова С. Ю., Гнеденков С. В., Дяченко В. И., Зибарева И. В., Игнатьева Л. Н., Игумнов С. М., Казуров А. В. [и др.] ; отв. ред. академик В. М. Бузник. – Томск : Изд-во НТЛ, 2017. – 600 с.
8. Zhou, Z. A novel powder aluminizing technology assisted by direct current field at low temperatures / Z. Zhou, F. Xie, J. Hu // Surface and Coatings Technology. – 2008. – 203(1-2). – pp. 23–27.
9. Aluminization of high purity iron by powder liquid coating / K. Murakami [at al.] // Acta Materialia. – 2004. – 52(5). – pp. 1271–1281.
10. Smith, A. B. Vapour aluminide coating of internal cooling channels, in turbine blades and vanes / A. B. Smith, A. Kempster, J. Smith // Surface and Coatings Technology. – 1999. – 120. – pp. 112–117.
11. Pierson, H. O. Handbook of chemical vapor deposition: principles, technology and applications / H. O. Pierson. – William Andrew : New York, 1999. – 458 p.
12. Formation of aluminide coatings on Fe-based alloys by chemical vapor deposition / Y. Zhang [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2008. – 202(16). – pp. 3839–3849.
13. Electrolytic aluminizing of low-carbon steel in NaF-KF-AlF₃ melt / Y. P. Zaikov [at al.] // Advanced Materials Research. – 2015. – № 1088. – pp. 250.
14. Electrolytic aluminizing of low carbon steel as protection treatment for current leads against high temperature oxidation / V. A. Kovrov [et al.] // Materials Science Forum. – 2016. – № 844. – pp. 141–145.
15. Structure and phase composition of protective coatings on steel produced by methods of liquid-phase calorizing / I. G. Brodova [et al.] // The Physics of Metals and Metallography. – 2015. – 116(9). – pp. 879–887.
16. Формирование структуры и свойств стали при комплексной электровзрывной и электронно-пучковой обработке / Ю. Ф. Иванов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2008. – № 12. – С. 43–48.
17. Cheng, W. J. Observation of high-temperature phase transformation in the Si-modified aluminide coating on mild steel using EBSD / W. J. Cheng, C. J. Wang // Materials characterization. – 2010. – 61(4) – pp. 467–473.
18. Shmorgun V. G., Slautin O. V., Kulevich V. P. Features of diffusion interaction in steel-aluminum composite after explosive welding and aluminizing by melt immersion // Metallurgist. – 2019. – Т. 63. – С. 766–774.