ВОПРОСЫ СВАРКИ, МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.791.042

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-10-245-49-55

Д. В. Прияткин, А. А. Артемьев, В. И. Лысак, П. В. Лойко

АНАЛИЗ НАПЛАВОЧНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ ГАЗОАБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ*

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: nanomaterial-vstu@yandex.ru

Проведен анализ основных промышленных и экспериментальных типов износостойких наплавочных сплавов. Обсуждено влияние структурно-фазового состава и упрочняющих фаз в наплавленном металле на его износостойкость. Показано, что оптимальное соотношение объемных долей пластичной матрицы и твердых фаз в структуре наплавленных сплавов, обеспечивающее высокие показатели стойкости к газоабразивному изнашиванию, в значительной мере зависит от углов атаки. Формирование упрочняющих фаз в виде крупных включений карбидов хрома, а также мелких высокотвердых карбидов ниобия, молибдена и ванадия способствует повышению износостойкости сплавов в широком диапазоне углов атаки. Высокая пластичность и стойкость к окислению матричного металла обеспечивается при его формировании на основе γ -Fe за счет легирования сплава никелем. Легирование наплавленного металла большими количествами углерода и бора нежелательно, поскольку сильно повышает хрупкость металла, ухудшая его технологические свойства.

Ключевые слова: наплавочные сплавы, газоабразивное изнашивание, высокотемпературный износ, абразивные частицы, окисление, структурно-фазовый состав, упрочняющие фазы.

D. V. Priyatkin, A. A. Artem'ev, V. I. Lysak, P. V. Loyko

ANALYSIS OF CLADDING ALLOYS FOR GAS-ABRASIVE WEAR CONDITIONS AT ELEVATED TEMPERATURES

Volgograd State Technical University

The analysis of the main industrial and experimental types of wear-resistant surfacing alloys is carried out. The influence of the structural-phase composition and hardening phases in the deposited metal on its wear resistance is discussed. It is shown that the optimal ratio of the volume fractions of the plastic matrix and hard phases in the structure of the deposited alloys, which provides high resistance to gas-abrasive wear, largely depends on the angles of attack. The formation of hardening phases in the form of large inclusions of chromium carbides, as well as small high-hardness carbides of niobium, molybdenum and vanadium contributes to an increase in the wear resistance of alloys in a wide range of angles of attack. High ductility and resistance to oxidation of the matrix metal is provided when it is formed on the basis of γ -Fe due to alloying of the alloy with nickel. Alloying the weld metal with large amounts of carbon and boron is not desirable, since it greatly increases the brittleness of the metal, deteriorating its technological properties.

Keywords: surfacing alloys, gas abrasive wear, high-temperature wear, abrasive particles, oxidation, structure-phase composition, hardening phases.

Введение

Значительный вклад в изучение процессов газоабразивного изнашивания внесли ученые Таллинского политехнического института (И. Р. Клейс, Х. Х. Лепиксон, Ю. А. Тадольдер, Х. Х. Ууэмыйс, У. К. Суур, Х. В. Арумязэ и др.), Штуттгарского университета (Г. Уэтц, К. Вел-

лингер, Г. Валь, Г. Гоммел и др.), В. Н. Кашеев, И. Финни, Ю. Биттер, А. А. Антонов, Е. Ф. Непомнящий, Ю. А. Юзвенко и ряд других исследователей [1].

Газоабразивному изнашиванию подвержены детали оборудования, работающие при нормальной или повышенной температуре в потоке

газа, несущего в себе твердые частицы (элементы засыпных аппаратов доменных печей, тягодутьевые машины газоочистных сооружений и тепловых электростанций, оборудование пневмотранспорта и др.) [1–3].

Проблему борьбы с износом данного оборудования эффективно решают наплавкой их рабочих поверхностей износостойкими сплавами [1, 4, 5]. Для этой цели производители сварочных материалов предлагают специализированные порошковые проволоки и покрытые электроды. Большинство данных материалов высокоуглеродистые и отличаются высокой степенью легирования, что обуславливает их высокую стоимость и низкую технологичность при применении [6]. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка новых экономнолегированных наплавочных сплавов,

обеспечивающих требуемый комплекс эксплуатационных и технологических свойств [7–10].

Цель работы – на базе анализа известных износостойких сплавов сформулировать принципы рационального легирования металла, обеспечивающие его высокие эксплуатационные характеристики в условиях высокотемпературного газоабразивного изнашивания.

Промышленные наплавочные материалы

Согласно известным отечественным [11] и зарубежным (DIN EN 14700:2005) классификациям, наплавочные материалы для условий газоабразивного изнашивания при температурах до 600 °С предназначены для получения сплавов на основе железа, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Промышленные износостойкие наплавочные сплавы

№	Производитель	Марка материала и химический состав сплава	Твердость, HRC
1	АО «ПОЛЕМА» (Россия)	ПЛ-АН 111 (500X40H40C2PЦ)	48–55
2		ПЛ-АН 179-1 (450X20B7M7B2Ф)	≥ 60
3		ПЛ-АН 101 (300X25C3H2Г2)	50–56
4		ПЛ-Нп-450X31М	≥ 58
5	н/д	ПЛ-АН-185 (500X22Б7)	56–60
6		ПЛ-АН-186 (450X30Р)	57–62
7	ООО «Интерпро» РФ	ПП-АН133 (10X17H9C5ГТ)	29–35,5
8	UTP (Германия)	ПП Ledurit-76 (530X11ГБ6Ф6Р)	≥ 68
9	Soudokay S.A (Германия)	ПП SK A 45-О (530X21Б6М6ФВ)	≥ 63
10	Castolin Eutectic (Германия)	ПП EnDOtec DO*33 (200X13Г2СБ6)	≥ 68
11		ПП EnDOtec DO*390N (500X20Г5С2Б10М10В10Р5)	≥ 71
12	DURMAT (Германия)	ПП FD 739 (100X20Б3М3В5Р4)	67–70
13		ПП FD 733 (350X18ГБ4Р2)	66–68
14		ПП FD 51 (450X25ГСР)	58–59
15	ESAB (Швеция)	Э ОК Wearthrode 65 T (ОК 84.80) (500X23Б7М7ФВ2С2Г)	65–66
16	Lincoln Electric (США)	Э Wearshield 70 (550X20Б6М6ФВ2)	68–70
17	Welding Alloys (США)	ПП HARDFACE CNV (500X22СБ6М5ФВ2)	≥ 65
18		ПП HARDFACE BNC (250X11Г2СБ5Р2)	64–68
19	Corodur Fülldraht GmbH (Германия)	ПП CORODUR® 60 (520X22ГСБ7)	61–63
20		ПП CORODUR® 75 (500X22ГСБ6М4ФВ)	62–65
21	DRATEC Drahttechnik GmbH (Германия)	ПП DT-DUR 65 (520X21Б7М7ФВ2)	63–65
22		ПП DT-DUR OCNR 29 (12X17H9Г2С6)	30–39
23		DT-DUR 600 (ОА) (50X6Г2МФ)	52–57

Сплавы можно разделить по системам легирования: Fe-C-Cr-B, Fe-C-Cr-Nb-Mo-V-W, Fe-C-Cr-Nb-B, Fe-C-Cr-Nb-Mo-Mn-Si-W-B, Fe-C-Cr-Ni-Si-Mn-Ti и др. Содержание элементов в данных материалах колеблется в широких диапазонах: 0,12–5,5 % C, 6–40 % Cr, до 40 % Ni, до 10 % Mo, до 10 % Nb, до 6 % V, до 10 % W, до 5 % B. Сравнительная оценка износостойкости представленных в табл. 1 материалов затруднена вследствие существенной ее зависимости от условий и параметров режима испытаний, выполненных по различным методикам [12, 13].

В работах [8, 14, 15] отмечается, что для получения высокой стойкости металла в условиях газоабразивного изнашивания требуется обеспечить содержание упрочняющей фазы в структуре металла в количестве не менее 30–35 %, а также – достаточную пластичность, характеризующую величиной раскрытия трещин. В порошковой ленте ПЛ-АН 111 это достигается высоким содержанием Cr и C, а также – Ni, содержание которого достигает 40 %. Однако, данный материал имеет высокую стоимость и нестабильные сварочно-технологические свойства.

Этих недостатков лишена лента ПЛ-АН 179, в которой реализовано легирование металла сильными карбидообразователями (Nb, V, Mo и др.). Износостойкость наплавленного металла в 1,6 раза больше, чем металла, наплавленного лентой ПЛ-АН 101, основной упрочняющей фазой которого являются карбиды хрома. Однако в обоих случаях металл склонен к образованию трещин [8, 14, 16]. Избежать их образования и повысить износостойкость металла, возможно путем его легирования ~ 3 % ниобия, образующего с углеродом высокотвердые карбиды NbC [8].

Системы легирования Fe-C-Cr и Fe-C-Cr-V износостойких наплавочных сплавов хорошо

изучены и представлены, например, материалами ПЛ-Нп-450Х31М, ПЛ-АН-186, ПП FD 51 и др. Однако, как отмечается в работах [14, 17], введение в наплавочные материалы больших количеств хрома наряду с углеродом и бором не оправданно, т.к. приводит не только к перерасходу легирующих элементов, но и зачастую – к снижению износостойкости. Утверждается, что оптимальное содержание хрома 11–14 %, углерода – не более 2 %, бора – не более 4–5 %.

Большая группа зарубежных наплавочных материалов системы легирования Fe-C-Cr-Nb-Mo-V-W имеет в составе повышенное содержание углерода (4,5–5,5 %) и легирующих элементов (Nb, Mo до 7 %; W, V до 2 %), что обеспечивает высокую износостойкость металла, но снижает его технологичность и экономическую эффективность. Сплавы системы Fe-C-Cr-Nb-B (Cr-Nb-Mo-W-B) содержат в составе от 1 до 4 % углерода, а также бора, который способствует существенному повышению износостойкости, но снижает стойкость наплавленного металла к трещинообразованию.

Экспериментальные наплавленные сплавы

В отечественных и зарубежных публикациях большое внимание уделяется разработке новых сплавов, стойких в условиях газоабразивного изнашивания при повышенных температурах (табл. 2).

В работе [19] было исследовано поведение сплавов на основе Fe, Ni и Co при высокотемпературном (до 650 °C) изнашивании. По результатам испытаний установлено (рис. 1), что скорости износа всех материалов увеличиваются с повышением температуры, однако темп изменения скорости отличается.

Таблица 2

Химический, структурно-фазовый состав и твердость экспериментальных износостойких сплавов

№	Химический состав сплава, масс. %	Фазовый состав		Твердость	Источник
		матрицы	упрочняющей фазы		
1	2,0-2,5 C; 18-20 Cr; 4-5 Ni; 1,5-2,0 Si	Аустенит метастабильный	(Fe,Cr) ₇ C ₃	45–46 HRC	[18]
2	3,53 C; 24,3 Cr; 2,89 Ni; 1,86-2,0 Si; 3,13 Nb	Эвтектика γ + (Cr, Me) ₇ C ₃ + NbC	NbC	49 HRC	[8]
3	2,0 C; 13,4 Cr; 2,0 B	80 % α-Fe + 20 % γ-Fe	Cr _x C _y ; Cr ₂ B; CrB; CrB ₂ ; Cr ₅ B ₃	58–60 HRC	[17]
4	1,2-1,4 C; 27-30 Cr; 0,5-1,0 Mn; 1,0-2,5 Si; < 0,5 (Mo, W)	Феррит	Cr ₇ C ₃	280 HV ₁₀	[19]
5	1,3 C; 15,4 Cr; 0,2 Mn; 0,5 Si; 4 Nb; 4 B; < 11,5 (Mo, W, V)	α-Fe	(Fe,Cr) (B, C) _y ; NbC; WC	1100 HV ₁₀	

Окончание табл. 2

№	Химический состав сплава, масс. %	Фазовый состав		Твердость	Источник
		матрицы	упрочняющей фазы		
6	0,9 C; 4,1 Cr; 0,3 Mn; 0,25 Si; 5 Mo; 6,2 W; 1,8 V	Мартенсит	Mo ₆ C; Cr ₂₃ C ₆ ; VC	870-882 HV	[20]
7	5,5 C; 21,0 Cr; 0,2 Mn; 0,8 Si; 7,0 Nb; 7,0 Mo; 2,0 W; 1,0 V	Ледебурит	(Fe,Cr) ₇ C ₃ ; NbC	825-927 HV	
8	1,76 C; 4,55 Cr; 5,08 Ni; 5,04 Nb; 4,16 Mo; 5,52 W	Мартенсит + аустенит	NbC; W ₂ C; Mo ₂ C; Cr _x C _y	798 HV ₁₀	[21]
9	1,8 C; 0,85 Si; 0,38 Mn; 4,17 Cr; 10,06 Ni; 4,23 Co; 4,81 Mo; 4,71 W; 4,93 V	Аустенит	VC; Mo ₂ C; W ₂ C; Cr ₂ C; Cr ₇ C ₃	798 HV ₁₀	[4]
10	3,0 C; 1,0 Si; 0,7 Mn; 18 Cr; 8,0 Ni; 10,0 V	Аустенит	VC; Cr _x C _y	390 HV	[22]
11	4,26 C; 21,85 Cr; 1,0 Ni; 1,39 Nb; 2,5 Mo	Аустенит+карбиды	Cr _x C _y ; NbC; W ₂ C; Mo ₂ C	746 HV	[23]

Рис. 1. Изменение скорости износа сплавов в зависимости от температуры при угле атаки газозабразивного потока 30° (а) и 90° (б) [19]

При угле атаки 30° и нормальной температуре испытаний наилучшей износостойкостью обладает сплав 5 системы Fe-Cr-Nb-B-W-C (табл. 2), однако при повышении температуры до 650°C разница со сплавом системы Fe-Cr-C (сплав 4 в табл. 1) нивелируется. Увеличение угла атаки до 90° обуславливает резкое снижение его, что объясняется низкой пластичностью сплава с большой объемной долей хрупких карбидов и боридов, которые разрушаются в результате образования трещин [20].

Сплавы на основе Ni и Co, применение в данном диапазоне температур не рационально, занимают промежуточное положение по износостойкости между сплавами на основе Fe.

Известно [18], что высокую стойкость к газозабразивному изнашиванию демонстрируют сплавы системы Fe-C-Cr эвтектического состава. Сплавы системы Fe-C-Cr-Ni при содержании углерода 2–2,5 % и хрома 18–20 % (сплав 1

в табл. 2) состоят из аустенитной матрицы, армированной 20–25 об.% карбидов (Fe,Cr)₇C₃, что обеспечивает уровень износостойкости, превышающий на 70 % показатели сплава 500X40H40C2РЦ (сплав 1, табл. 1). Повысить износостойкость возможно за счет легирования металла ниобием или ванадием (~3 %). Мелкодисперсные карбиды NbC не образуют сплошную сетку, как карбиды типа Me₇C₃, что препятствует распространению трещин [8, 24].

Увеличение температуры испытаний до 650 °C обуславливает резкое падение износостойкости при малых углах атаки сплава 6 (табл. 2), что обусловлено снижением его твердости и интенсивной пластической деформацией поверхностных слоев с отделением микростружки. В свою очередь повышенная хрупкость сплава 7, содержащего большую объемную долю твердой фазы, становится причиной падения его износостойкости при углах атаки, близких к 90° [20].

Высокая износостойкость сплава 8 (табл. 2) достигается при его легировании никелем. Это связано с тем, что Ni не только улучшает пластические свойства и термостойкость матрицы, но и снижает растворимость в ней Cr, Mo и др., способствуя выделению эвтектических карбидов [21]. При этом он не влияет на тип образующихся карбидов в отличие от Mo, который подавляет образование карбидов Me_7C_3 и активирует – $Me_{23}C_6$ [25].

В работе [4] показано, что значительное повышение высокотемпературной (900 °C) износостойкости сплава 9 (табл. 2) достигается при его легировании 10 % никеля при содержании углерода около 2 %. Положительное влияние никеля обусловлено значительным снижением интенсивности окислительного износа сплава при образовании на его поверхности плотной пленки, содержащей оксид никеля.

Авторы [22] полагают, что повышение износостойкости сплава 10 (табл. 2) достигается

за счет выделения сфероидальных карбидов ванадия, а также – в результате деформационного превращения аустенита в мартенсит при ударах абразивных частиц о поверхность сплава, что снижает эффект от его размягчения при повышении температуры [26].

Общие принципы выбора материалов для работы в условиях газобразивного изнашивания

Исследование влияние объемной доли карбидной фазы на скорость изнашивания [23] показало (рис. 2), что при использовании сравнительно мягкого абразива в виде железной руды (твердость ~5 по шкале Мооса) между ними наблюдается тесная корреляция. При использовании кварцевого песка (твердость ~7) при одинаковой объемной доле твердых фаз разного химического состава, размера и морфологии скорости износа сплавов могут значительно отличаться (рис. 2).

Рис. 2. Влияние объемной доли карбидов в сплавах на газобразивную износостойкость. Абразив: железная руда (а), кварцевый песок (б) [23]

Выбор типа наплавленного металла, стойкого в условиях газобразивного изнашивания, должен осуществляться с учетом скорости абразивных частиц и угла атаки (рис. 3) [27].

Для обеспечения сопротивления изнашиванию при малых углах атаки газобразивной струи рационально применение твердых материалов с высокой (более 50 %) объемной долей упрочняющих фаз (рис. 3, 4) [28]. При больших углах атаки с целью обеспечения достаточной прочности сплава при повышенной пластичности значительную долю в структуре должна занимать матрица, обеспечивая многократную деформацию поверхностных слоев материала без образования трещин и отколов. Для материала матрицы перспективно использование материалов с ГЦК решеткой, поскольку они обладают высокой пластичностью и наименее чувствительны к скорости деформации [9].

Рис. 3. Схема выбора материалов для газобразивного износа в зависимости от угла атаки и скорости частиц [27]

Сочетание относительно крупных частиц упрочняющей фазы с мелкими, равномерно распределенными в объеме матрицы, способст-

вует эффективной работе материала в широком диапазоне углов атаки (рис. 4, б). При этом, как отмечается в работе [29], размеры упрочняю-

щих фаз должны быть не менее размера отпечатка, оставляемого абразивной частицей на изнашиваемой поверхности.

Рис. 4. Рекомендуемые соотношения матрицы и упрочняющих фаз для различных условий газобразивного износа [28]

Таким образом, при разработке новых типов наплавочных сплавов необходимо использовать принцип Шарпи, при котором общее улучшение механических свойств сплава достигается за счет определенного сочетания в его гетерогенной структуре пластичной матрицы и твердых фаз [30].

Выводы

Показано, что оптимальное соотношение объемных долей пластичной матрицы и твердых фаз в структуре наплавленных сплавов, обеспечивающее высокие показатели стойкости к газобразивному изнашиванию, в значительной мере зависит от углов атаки. Формирование упрочняющих фаз в виде крупных включений карбидов хрома, а также мелких высокотвердых карбидов ниобия, молибдена и ванадия способствует повышению износостойкости сплавов в широком диапазоне углов атаки. Высокая пластичность и стойкость к окислению матричного металла обеспечивается при его формировании на основе γ -Fe за счет легирования сплава никелем. Легирование наплавленного металла большими количествами углерода и бора не желательно, поскольку сильно повышает хрупкость металла, ухудшая его технологические свойства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тененбаум, М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию / М. М. Тененбаум. – Москва : Машиностроение, 1976. – 271 с.
2. Терещенко, А. Ф. Исследование струйного износа наплавленного металла / А. Ф. Терещенко, В. П. Шимановский, Ю. А. Юзвенко // Автоматическая сварка. – 1966. – № 11. – С. 32–35.
3. Быстров, В. А. Условия эксплуатации и высокотемпературного износа засыпного устройства доменной печи / В. А. Быстров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1966. – № 11. – С. 32–35.
4. Shimizu, K. Effect of C Content on High Temperature Erosive Wear Characteristics of Fe-Based V Containing Multi-Component Cast Steel with Ni / K. Shimizu et al. // Materials Science Forum. – Trans Tech Publications Ltd, 2018. – Vol. 925. – P. 400–407.
5. Соколов, Г. Н. Наплавка износостойких сплавов на пресовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей / Г. Н. Соколов, В. И. Лысак. – Волгоград : ВолгГТУ, 2005. – 248 с.
6. Ворончук, А. П. Порошковые ленты для износостойкой наплавки / А. П. Ворончук // Автоматическая сварка. – 2014. – № 14. – С. 75–78.
7. Лейначук, Е. И. Электродуговая наплавка деталей при абразивном и гидроабразивном износе / Е. И. Лейначук. – Киев : Наук. думка, 1985. – 160 с.
8. Малинов, В. Л. Новые порошковые ленты для наплавки деталей, работающих в условиях абразивного и газобразивного воздействия / В. Л. Малинов, В. В. Чигарев, В. В. Воробьев // 36. наук. пр. : Захист металургійних машин від поломок. ПДТУ, Маріуполь, Вип. 14, 252–258 с.
9. Эрозия / А. Эванс, А. Рафф, С. Видерхорн [и др.] ; под ред. К. Прис. ; пер. с англ. – Москва : Мир, 1982. – 464 с.

10. Исследование структуры и свойств износостойкого наплавленного сплава системы Fe – C – Cr – Ni – Mn – Mo – Ti – Nb / Д. В. Прияткин, А. А. Артемьев, П. В. Лойко, Г. Н. Соколов, В. И. Лысак // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6 (241) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 71–75.
11. Наплавочные материалы стран – членов СЭВ : Каталог / под ред. И. И. Фрумина и В. Б. Еремеева. – Киев – Москва : Изд. МЦНиТИ, 1979. – 620 с.
12. Методика испытаний наплавленного металла на газоабразивное изнашивание / А. А. Артемьев, Г. Н. Соколов, И. В. Зорин, В. И. Лысак, М. А. Рыков, А. В. Крутенко, М. В. Шниппко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (213) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 112–116.
13. Дуговая наплавка деталей засыпного устройства доменной печи / Ю. А. Юзвенко [и др.] // Автоматическая сварка. – 1972. – № 2. – С. 59–63.
14. Воробьев, В. В. Сплавы и материалы для наплавки контактных поверхностей уравнильных клапанов / В. В. Воробьев, В. Л. Малинов // Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии: темат. сб. науч. тр. – 2010. – № 2. – С. 64–68.
15. Исследование формирования структуры износостойкого сплава при наплавке порошковой лентой ПЛАН-111 / Б. В. Ефременко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2017. – № 9. – С. 17–22.
16. Юзвенко, Ю. А. Влияние трещин на газо-абразивный износ наплавленного металла / Ю. А. Юзвенко, В. П. Шимановский // Автоматическая сварка. – 1971. – № 2. – С. 61–62.
17. Шумилов, А. А. Разработка наплавочных материалов для повышения износостойкости деталей тягодутьевых машин тепловых электростанций / А. А. Шумилов, П. К. Штанько, В. Н. Гордиенко // Вестник СевНТУ. – 2010. – Вып. 110. – С. 216–218.
18. Софрошенков, А. Ф. Порошковая лента для наплавки поверхностей конусов доменных печей / А. Ф. Софрошенков, И. Н. Слободинский, С. Л. Семенов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 12. – С. 42–43.
19. Varga, M. High temperature abrasive wear of metallic materials // Wear. – 2017. – Vol. 376-377, Part A. – P. 443–451.
20. Katsich, C. Erosive wear of hardfaced Fe–Cr–C alloys at elevated temperature / C. Katsich et al. // Wear. – 2009. – Vol. 267. – №. 11. – С. 1856–1864.
21. Zhang, Y. Influence of Ni addition on erosive wear characteristics of multi-component white cast iron at elevated temperature / Y. Zhang et al. // Wear. – 2017. – Vol. 376-377. – P. 452-457.
22. Shimizu, K. Erosive wear properties of high V–Cr–Ni stainless spheroidal carbides cast iron at high temperature / K. Shimizu et al. // Wear. – 2009. – Vol. 267. – №. 1-4. – P. 104-109.
23. Chatterjee, S. Solid particle erosion behaviour of hardfacing deposits on cast iron – Influence of deposit microstructure and erodent particles / S. Chatterjee, T. K. Pal // Wear. – 2006. – Vol. 261. – №. 10. – P. 1069-1079.
24. Kan, W. H. Slurry erosion, sliding wear and corrosion behavior of martensitic stainless steel composites reinforced in-situ with NbC particles / W. H. Kan et al. // Wear. – 2019. – Vol. 420. – P. 149-162.
25. Jindal, C. Effect of Molybdenum Addition in Hardfacing Layer on Erosion Resistance Behavior of Steel // Proceedings of the International Conference on Research and Innovations in Mechanical Engineering. – Springer, New Delhi, 2014. – P. 337-346.
26. Структура и свойства износостойких покрытий, наплавленных электродуговым методом на сталь порошковыми проволоками / В. Е. Громов [и др.] // Успехи физики металлов. – 2014. – № 15. – С. 213–234.
27. Dallaire, S. Erosion resistance of arc-sprayed coatings to iron ore at 25 and 315° C / S. Dallaire, H. Levert, J. G. Legoux // Journal of thermal spray technology. – 2001. – Vol. 10. – №. 2. – С. 337-350.
28. Veinthal, R. Microstructural aspects of abrasive wear of composite powder materials and coatings / R. Veinthal, P. Kulu, H. Käerdi // International Journal of Materials and Product Technology. – 2011. – Vol. 40. – №. 1-2. – С. 92-119.
29. Patent No. 6,156,443. U.S. Method of producing improved erosion resistant coatings and the coatings produced thereby / Dallaire S., H. Levert. – 5 Dec. 2000.
30. Любарский, И. М. Металлофизика трения / И. М. Любарский, Л. С. Палатник. – Москва : Металлургия, 1976. – 176 с.