

УДК 621.793

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПСЕВДОСПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

канд. техн. наук А.Н. ГРИГОРЧИК, Е.В. АСТРАШАБ,
 д-р техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, д-р физ.-мат. наук, проф. В.А. КУКАРЕКО,
 канд. техн. наук А.В. СОСНОВСКИЙ
 (Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск)
 канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН
 (Полоцкий государственный университет)

Исследовано структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства газотермических покрытий из сталей 08Г2С, 40Х13, 95Х18, а также покрытий из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1», «40Х13+БрКМц3-1», «95Х18+Л63». Показано, что напыленные псевдосплавы содержат пониженное количество оксидов железа FeO и Fe₃O₄, что связано с обволакиванием стальных частиц более легкоплавкими частицами медных сплавов в процессе газотермического напыления. Установлено, что покрытия из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1» и «40Х13+БрКМц3-1» обладают более высокой износостойкостью при трении в паре со стальным контртелом по сравнению со стальными покрытиями из сталей 08Г2С и 40Х13. В свою очередь, газотермические покрытия из сталей 08Г2С, 40Х13 и 95Х18 характеризуются более высокой износостойкостью при трении по контртелу из латуни Л63 по сравнению с покрытиями из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1», «40Х13+БрКМц3-1», «95Х18+Л63».

Ключевые слова: высокоскоростная металлизация, псевдосплавы, бронза, структура, фазовый состав, износостойкость.

Введение. Метод газотермического напыления является производительным и экономичным способом получения псевдосплавов из различных токопроводящих материалов [1]. К отличительным особенностям высокоскоростного напыления можно отнести: высокую скорость распыляемых частиц (выше 400 м/с), низкую пористость получаемых покрытий (~ 2% – 5%), а также высокий коэффициент использования напыляемого материала (0,85) [2]. Вместе с тем, структурно-фазовое состояние и физико-механические свойства газотермических покрытий из псевдосплавов изучены недостаточно, что существенно ограничивает область их применения.

Целью данной работы является исследование структурно-фазового состояния и триботехнических свойств газотермических покрытий, полученных методом высокоскоростной металлизации путем совместного распыления стальной проволоки и проволоки из медного сплава.

Подготовка образцов и методики исследований. В качестве объектов исследований были выбраны газотермические покрытия из сталей 08Г2С, 40Х13, 95Х18 и покрытия из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1», «40Х13+БрКМц3-1», «95Х18+Л63», напыленные методом высокоскоростной металлизации с использованием установки АДМ-10 [2]. Комбинированные покрытия из стали и бронзы, напылялись на пластины из стали 45 с размерами 100 × 50 × 6 мм. Химический состав напыленных псевдосплавов представлен в таблице 1.

Таблица 1. – Химический состав псевдосплавов, полученных методом высокоскоростного напыления

Напыляемые материалы	Содержание элемента, масс. %											
	Al	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Mo	Sn
08Г2С+БрКМц3-1	0,180	1,662	0,038	0,015	0,016	1,187	45,214	0,084	51,543	0,033	–	–
40Х13+БрКМц3-1	0,371	1,176	0,042	0,027	7,823	0,717	47,987	0,210	41,506	–	0,043	0,036
95Х18+Л63	–	0,049	0,052	0,012	6,489	0,089	25,801	0,219	43,830	23,459	–	–

Для исследований структуры, фазового состава и трибомеханических свойств из предварительно отшлифованных пластин с напыленными покрытиями вырезались образцы с размерами 8 × 6 × 5 мм.

Металлографические исследования газотермических покрытий проводились на оптическом микроскопе АЛБТАМИ МЕТ 1МТ. Исследование фазового состояния газотермических покрытий, проводилось на дифрактометре ДРОН-3.0 в монохроматизированном кобальтовом (CoK_α) излучении при напряжении 28 кВ и анодном токе 14 мА. Расшифровка рентгенограмм осуществлялось при помощи программного обеспечения Crystallographica Search-Match с картотекой PDF-2.

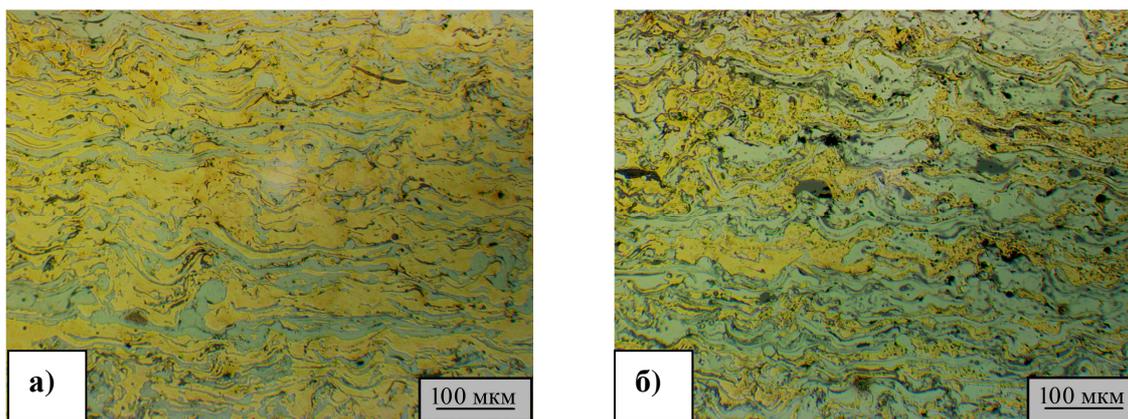
Триботехнические испытания образцов напыленного сплава проводились на трибометре АТВП. Испытания осуществлялись по схеме возвратно-поступательного движения контактирующих тел при

средней скорости взаимного перемещения $\approx 0,1$ м/с в режиме трения без смазочного материала. Удельная нагрузка испытаний составляла $p = 1,5$ МПа. При испытаниях использовалось контртело, изготовленное из закаленной стали У10 (800 HV10) и из латуни Л63 (100 HV 10.). Путь трения составлял ≈ 1200 м.

Измерения твердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор $P = 10$ кг.

Результаты исследований и их анализ. В результате совместного напыления проволоки из стали и цветного металла, формируются покрытия, состоящие из стальных прослоек, прослоек цветного металла, а также оксидов. Характерные микроstructures псевдосплавов, полученных методом высокоскоростной металлизации, представлены на рисунке 1.

Пористость напыленных покрытий не превышала 5 об. %.



а) – «08Г2С+БрКМц3-1»; б) – «40Х13+ БрКМц3-1».

Рисунок 1. – Характерные микроstructures газотермических покрытий из псевдосплавов

Фазовый состав покрытий из псевдосплавов представлен в таблице 2 и на рисунке 2.

Можно видеть, что газотермические покрытия из высокохромистых сталей 95Х18 и 40Х13 в фазовом составе содержат α -Fe, γ -Fe и оксиды железа FeO, Fe₃O₄, а покрытие из низколегированной стали 08Г2С включает в себя α -Fe, FeO, Fe₃O₄ (см. Таблица 2, рисунок 2). В покрытиях из псевдосплавов, сформированных с использованием проволок из медных сплавов и сталей, помимо вышеуказанных фаз, регистрируются медь (псевдосплавы «08Г2С+БрКМц3-1» и «40Х13+БрКМц3-1») и интерметаллидные фазы CuZn, Cu_{0,64}Zn_{0,36} в псевдосплаве «95Х18+Л63» (см. Таблица 2, рисунок 2). Также необходимо отметить, что во всех псевдосплавах регистрируется пониженное количество оксидов железа FeO, Fe₃O₄ (см. Рисунок 2). Это связано с тем, что в процессе газотермического напыления более легкоплавкие частицы медных сплавов обволакивают частицы железа и, тем самым, препятствуют их интенсивному окислению. Кроме этого, в фазовом составе напыленных псевдосплавов не регистрируются оксиды меди (см. Таблица 2, рисунок 2). По нашему мнению, отсутствие оксидов меди связано с их восстановлением в процессе газотермического напыления железом [3].

Таблица 2. – Фазовый состав газотермических покрытий

Материал псевдосплава	Фазовый состав	Твердость, HV 30
08Г2С	α -Fe, FeO, Fe ₃ O ₄	280
08Г2С+БрКМц3-1	Cu, α -Fe, FeO, Fe ₃ O ₄	145
40Х13	α -Fe, γ -Fe, Fe ₃ O ₄ , FeO	400
40Х13+БрКМц3-1	Cu, α -Fe, γ -Fe, Fe ₃ O ₄ , FeO	180
95Х18	γ -Fe, α -Fe, Fe ₃ O ₄ , FeO	360
95Х18+ Л63	α -Fe, γ -Fe, Cu, CuZn, Cu _{0,64} Zn _{0,36} , Fe ₃ O ₄	155

Твердость напыленных покрытий из псевдосплавов значительно ниже твердости покрытий, напыленных стальных покрытий (см. Таблица 2). В частности, твердость покрытий из монолитных сталей 08Г2С, 40Х13 и 95Х18 составляет 280, 400 и 360 HV 10, соответственно (см. Таблица 2). Твердость псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1», «40Х13+БрКМц3-1» и «95Х18+Л63» составляет 145, 180 и 155 HV 10, соответственно (см. Таблица 2). Пониженная твердость псевдосплавов обусловлена присутствием в них мягких прослоек из бронзы.

Триботехнические испытания образцов газотермических покрытий из сталей и псевдосплавов проводились на контртелах из стали У10 и латуни Л63. Результаты триботехнических испытаний газотермических покрытий из псевдосплавов представлены в таблице 3 и на рисунке 3.

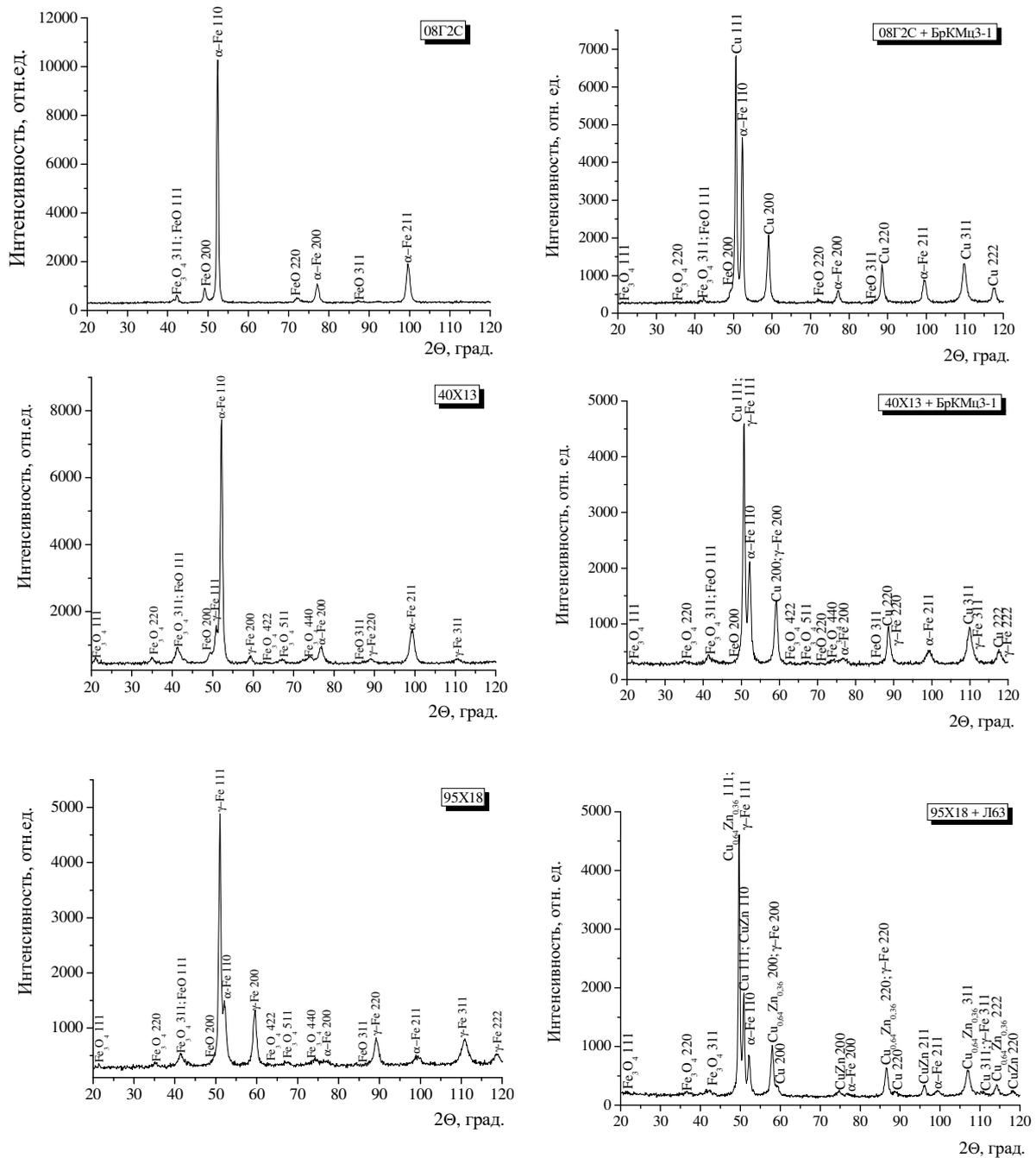


Рисунок 2. – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK_α) от поверхностных слоев газотермических покрытий из сталей и псевдосплавов, напыленных методом высокоскоростной металлизации

Таблица 3. – Результаты триботехнических испытаний газотермических покрытий

Покрытие	Интенсивность массового изнашивания в условиях сухого трения, ×10 ⁻³ мг/м		Интенсивность линейного изнашивания контртела из латуни Л63, ×10 ⁻⁷
	Материал контртела		
	Сталь У10	Латунь Л63	
08Г2С	1450,0	33,2	2,3
08Г2С+КМц3-1	185,0	348,4	2,2
40Х13	8,6	3,3	2,7
40Х13+КМц3-1	4,7	29,7	2,6
95Х18	1,5	2,0	2,1
95Х18+Л63	13,5	392,3	2,0

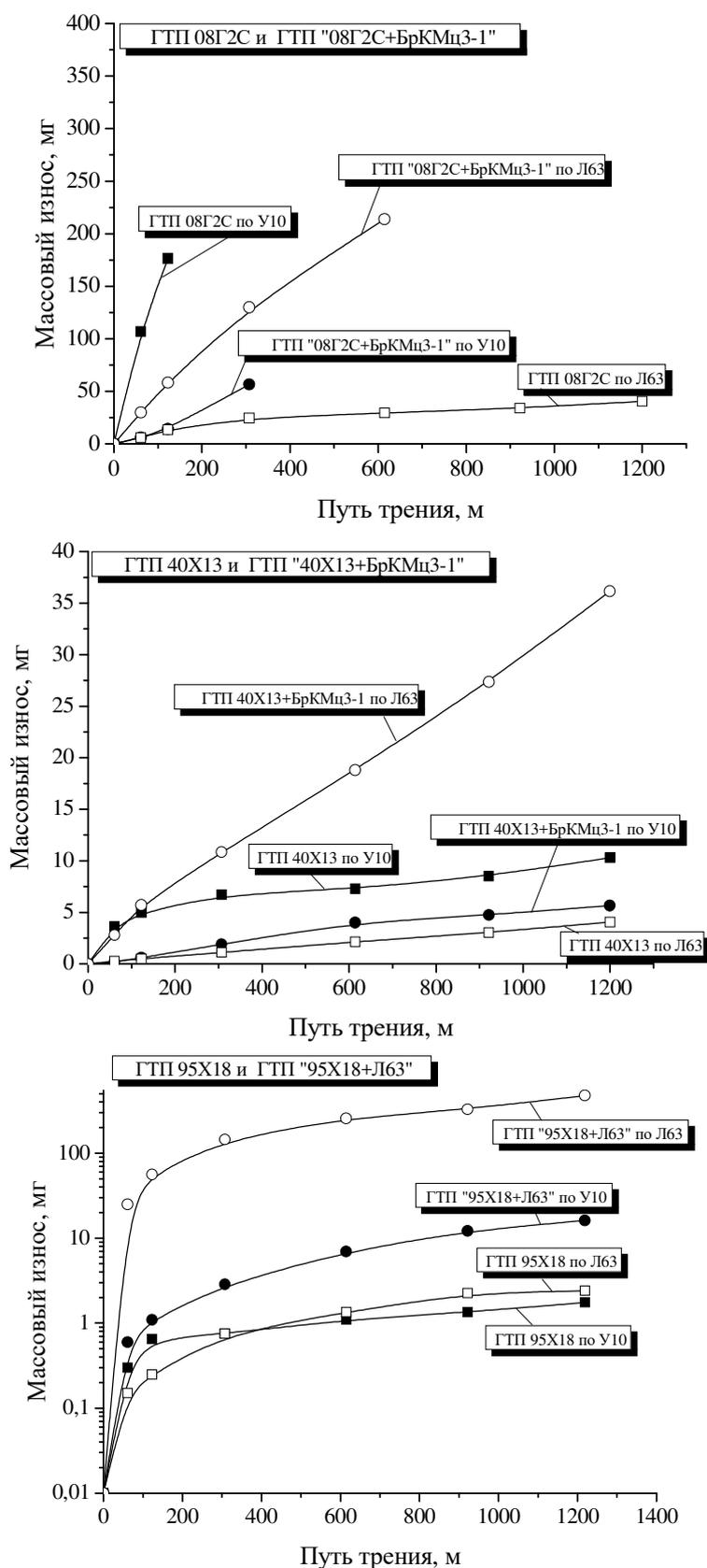


Рисунок 3. – Зависимости массового износа газотермических покрытий из различных материалов, полученных методом гиперзвуковой металлизации, от пути трения

Можно видеть, что износостойкость монопокрытий из сталей 08Г2С, 40Х13 и 95Х18 при трении в паре с контртелом из стали У10 и латуни Л63 возрастает с увеличением содержания в покрытиях углерода и хрома (см. Таблица 3). В свою очередь покрытия из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1» и «40Х13+БрКМц3-1» характеризуются более высокой износостойкостью при их триботехнических испытаниях в паре со стальным контртелом по сравнению с покрытиями из сталей 08Г2С и 40Х13 (см. Таблица 3, рисунок 3). В частности, интенсивности их массового изнашивания составляют $185,0 \times 10^{-3}$ и $4,7 \times 10^{-3}$, соответственно (см. Таблица 3). Более высокая износостойкость покрытий из псевдосплавов обусловлена низким содержанием в них оксидов железа (см. Рисунок 2), являющихся местами зарождения микротрещин и их распространения при трении. Однако покрытия из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1» и «40Х13+БрКМц3-1» при трении в паре с контртелом из латуни Л63 характеризуются пониженной износостойкостью, по сравнению с трением по контртелу из стали У10 (см. Таблица 3). При этом интенсивности их массового изнашивания составляют $348,4 \times 10^{-3}$ и $29,7 \times 10^{-3}$, соответственно (см. Таблица 3). Не высокая износостойкость покрытий из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1» и «40Х13+БрКМц3-1» при сухом трении по контртелу из латуни Л63 (см. Таблица 3) связана с интенсивным протеканием процессов адгезионного схватывания между материалами пары трения, содержащими медь.

Также необходимо отметить, что покрытие из стали 95Х18 имеет более высокую износостойкость в случае его триботехнических испытаний в паре со стальным контртелом из закаленной стали У10, по сравнению со случаем испытания с контртелом из латуни Л63 (см. Таблица 3, рисунок 3). Высокая износостойкость покрытия из стали 95Х18 в паре с закаленным контртелом из стали У10 связана с более интенсивным протеканием в его поверхностных слоях деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения [4; 5], по сравнению с покрытием, испытываемом в паре с контртелом из латуни Л63. Покрытия из псевдосплавов «95Х18+Л63» характеризуются пониженной износостойкостью в паре с контртелами из стали У10 и латуни Л63, по сравнению с покрытием из стали 95Х18 (см. Таблица 3). Интенсивное изнашивание покрытий из псевдосплавов «95Х18+Л63» связано с наличием в их фазовом составе хрупких интерметаллидных фаз CuZn , $\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$ (см. Таблица 2).

В результате проведенных исследований было выявлено, что при испытаниях псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1», «40Х13+БрКМц3-1» и «95Х18+Л63» регистрируется несколько пониженный износ контртел из латуни Л63, по сравнению с износом контртел при испытаниях покрытий из сталей 08Г2С, 40Х13 и 95Х18 (см. Таблица 3).

Таким образом, использование газотермических покрытий из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1» и «40Х13+БрКМц3-1» целесообразно в узлах трения в паре с закаленными высокоуглеродистыми сталями. В свою очередь, использование покрытий из сталей 08Г2С, 40Х13 и 95Х18 перспективно в триботехнических узлах в паре с изделиями из медных сплавов. Покрытия на основе сталь-латунь не обеспечивают высоких триботехнических свойств в условиях сухого трения.

Заключение. Исследовано структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства газотермических покрытий из сталей 08Г2С, 40Х13, 95Х18, а также из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1», «40Х13+БрКМц3-1», «95Х18+Л63». Показано, что покрытия из псевдосплавов содержат пониженное количество оксидов по сравнению с покрытиями из сталей, что связано с уменьшением интенсивности окисления стальных частиц в процессе металлизации за счет их обволакивания более легкоплавкими частицами медных сплавов.

Установлено, что газотермические покрытия из псевдосплавов «08Г2С+БрКМц3-1», «40Х13+БрКМц3-1» и «95Х18+Л63» обладают повышенной износостойкостью в паре с закаленными стальными контртелами из стали У10 по сравнению с их износостойкостью в паре с контртелами из латуни Л63. В свою очередь, покрытия из сталей 08Г2С и 40Х13 характеризуются более высокой износостойкостью при их испытаниях по латуни Л63, по сравнению с износостойкостью в паре с закаленной сталью У10. Покрытия на основе сталь-латунь не обеспечивают высоких триботехнических свойств в условиях сухого трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. – Минск : УП «Технопринт», 2004. – 200 с.
2. Замена гальванического хромирования на технологию гиперзвуковой металлизации при ремонте деталей узлов трения скольжения / П.А. Витязь [и др.] // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2010. – № 10. – С. 2–5.
3. Калюкова, Е.Н. Свойства металлов и их соединений : учеб. пособие / Е.Н. Калюкова. – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – 156 с.

4. О природе формирования метастабильной аустенитной структуры при газотермическом напылении высокохромистой стали мартенситного класса 95X18 / В.А. Кукареко [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – М., 2017. – Т.13. – №7(151). – С. 318–322.
5. Кукареко, В.А. Деформационно-активированное мартенситное превращение в газотермических покрытиях из высокохромистых сталей при сухом трении / В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик // ПОЛИКОМТРИБ-2015 : междунар. науч.-техн. конф. : тез. докл. ; редкол.: В.Н. Адерица [и др.]. – Гомель, 2015. – С. 75.

Поступила 10.08.2019

**WEAR RESISTANCE OF GAS-THERMAL COATINGS FROM COPPER-ALLOYS
ON THE BASIS OF COPPER OBTAINED BY HIGH-SPEED METALLIZATION METHOD**

**A. GRIGORCHIK, E. ASTRASHAB, M. BELOTSERKOVSKIY,
A.V. SOSNOVSKIY, A. DUDAN**

The structural phase state and tribotechnical properties of gas-thermal coatings from 08G2S, 40Cr13, 95Cr18 steels, as well as coatings from pseudo-alloys 08G2S + BrKMC3-1, 40Cr13 + BrKMC3-1, 95Cr18 + L63, were investigated. It is shown that sprayed pseudo-alloys contain a reduced amount of iron oxides FeO and Fe₃O₄, which is associated with the enveloping of steel particles by more easily fusible particles of copper alloys during gas thermal spraying. It has been established that coatings from pseudo-alloys 08G2S + BrKMC3-1 and 40Cr13 + BrKMC3-1 have higher wear resistance during friction paired with steel counterbody compared to steel coatings from 08G2S and 40Cr13 steels. In turn, gas-thermal coatings from 08G2S, 40Cr13 and 95Cr18 steels are characterized by higher wear resistance during friction on the counterbody made of brass L63 compared to coatings from pseudo-alloys 08G2S + BrKMC3-1, 40Cr13 + BrKMC3-1, 95Cr18 + L63.

Keywords: *high-speed metallization, pseudo-alloys, bronze, structure, phase composition, wear resistance.*