



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.793

А.Н. ГРИГОРЧИК, канд. техн. наук

заместитель начальника Центра структурных исследований и трибомеханических испытаний материалов и изделий машиностроения коллективного пользования НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»¹
E-mail: GrigorchikAN@gmail.com

В.А. КУКАРЕКО, д-р физ.-мат. наук, проф.

начальник Центра структурных исследований и трибомеханических испытаний материалов и изделий машиностроения коллективного пользования НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»¹
E-mail: v_kukareko@mail.ru

М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, д-р техн. наук, доц.

заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»¹
E-mail: mbelotser@gmail.com

А.В. СОСНОВСКИЙ, канд. техн. наук, проф.

ведущий научный сотрудник лаборатории газотермических методов упрочнения деталей машин НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»¹
E-mail: sosnovskij@inbox.ru

Е.В. АСТРАШАБ

младший научный сотрудник Центра структурных исследований и трибомеханических испытаний материалов и изделий машиностроения коллективного пользования НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»¹
E-mail: astrashabev@mail.ru

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 12.09.2023.

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ АНТИФРИКЦИОННЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА БАЗЕ СИСТЕМЫ Cu-Al В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОГО ТРЕНИЯ

Исследованы структура, фазовый состав, дюрометрические и триботехнические свойства напыленных композиционных газотермических покрытий на базе системы Cu-Al. Показано, что напыленные покрытия включают в себя фазы Cu, Al, Cu₉Al₄, CuAl₂, Cu₃Al, Si, Al₂O₃. Установлено, что дополнительный отжиг композиционных покрытий при 175 и 225 °С в течение 2 ч приводит к увеличению содержания в них интерметаллидных соединений до 43 об.%, что способствует возрастанию микротвердости композитов до 20 % по сравнению с исходным состоянием. Отмечено, что покрытие из «БрКМцЗ-1 + АК12» характеризуется повышенной износостойкостью в среде смазочного материала И-20А и его износостойкость до 2 раз выше износостойкости наплавленного покрытия из бронзы БрОФ10-1. Показано, что дополнительный отжиг покрытий из «БрКМцЗ-1 + АК12» приводит к повышению их износостойкости до 30 % по сравнению с исходным состоянием.

Ключевые слова: композиционные материалы, антифрикционные покрытия, фазовый состав, интерметаллидные соединения, износостойкость

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-4-65-54-62>

Введение. Материалы и композиты на базе меди широко используются в качестве антифрикционных покрытий узлов трения. К достоинствам данных материалов можно отнести хорошую прирабатываемость к сопрягаемой детали, невысокий коэффициент трения, высокую теплопроводность и ударную вязкость, способность работать при относительно больших нагрузках и скоростях [1–3]. Для обеспечения данного комплекса свойств структура антифрикционных материалов должна быть гетерогенной, состоящей из мягкой и пластичной основы и включений из более твердых частиц. При этом мягкая основа, прирабатываясь к контртелу, создает совместно с выступающими износостойкими твердыми частицами микрорельеф, обеспечивающий циркуляцию смазочного материала и вынос продуктов износа [1, 2, 4]. Сплавы на основе алюминия также применяются в качестве антифрикционных материалов благодаря своим важным преимуществам: прочность, невысокая стоимость, хорошая теплопроводность, высокая коррозионная стойкость и низкая плотность [2, 5]. Вместе с тем, у сплавов на основе алюминия имеется существенный недостаток, заключающийся в высоком коэффициенте теплового расширения и способности к схватыванию с материалом контртела. Традиционными способами получения антифрикционных материалов являются литье, порошковая металлургия, индукционная наплавка [6–9]. Перечисленные технологии являются трудоемкими и энергозатратными, что приводит к удорожанию получаемых антифрикционных материалов. В то же время метод высокоскоростной металлизации (ВМ) является экономичной и производительной технологией, позволяющей эффективно формировать защитные покрытия из токопроводящих проволочных материалов различных составов [10, 11]. При использовании ВМ можно получать покрытия из одной или нескольких проволок путем совместного распыления двух разнородных материалов или сплавов [11, 12]. В частности, в работах [11–14] было проведено исследование структуры, фазового состава и свойств газотермических покрытий из проволочных сталей различных классов, композиционных материалов на базе железа и алюминия, никеля и железа, а также нитрида титана. Таким образом, использование высокоскоростной металлизации для формирования экономичных покрытий на медной основе для трибологических приложений является перспективной задачей. В связи с этим, целью данной работы являлось исследование триботехнических свойств металлизированных методом высокоскоростной металлизации антифрикционных газотермических покрытий на основе системы Cu-Al.

Получение образцов покрытий и методики их исследований. В качестве объектов для исследований были выбраны газотермические покрытия, полученные совместным напылением сварочной бронзы БрКМц3-1 и алюминиевого сплава АК12.

Для регулирования содержания меди и алюминия в композиционном покрытии использовались проволочные материалы различных диаметров (проволока сплава БрКМц3-1 диаметром 1,2 и 1,6 мм и сплава АК12 диаметром 1,6 мм). Напыление проводилось на предварительно подготовленную поверхность подложки из стали 35 (пластина с размерами 50×50×4 мм) методом высокоскоростной металлизации с использованием разработанной в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси установки АДМ-10 [10]. Толщина напыленных покрытий составляла ≈1 мм. После напыления покрытия механически шлифовались на абразивной бумаге Р600. Для исследований структуры, фазового состава и твердости из пластин с покрытием вырезались образцы размерами 15×15×5 мм, для триботехнических испытаний — 8×5×5 мм.

Отжиг образцов покрытий осуществлялся в муфельной печи SNOL 7.2/1100. Термическая обработка заключалась в изотермической выдержке образцов при температурах 175 и 225 °С в течение 2 ч.

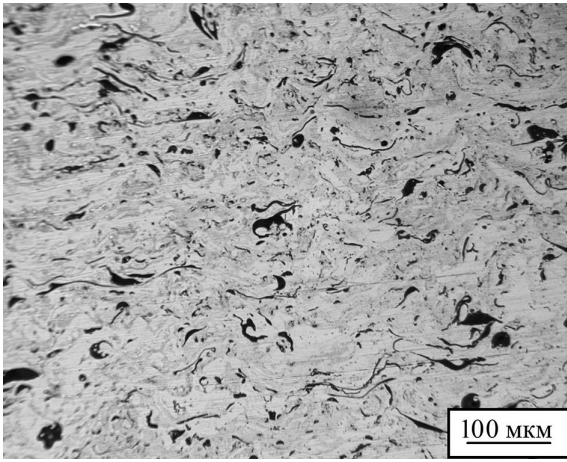
Металлографические исследования газотермических покрытий проводились на оптическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ. Исследование фазового состава покрытий выполнялось на дифрактометре POWDIX 600 в монохроматизированном кобальтовом (CoK_α) излучении при напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Расшифровка рентгенограмм осуществлялась при помощи программного обеспечения Crystallographica Search-Match с картотекой PDF-2.

Сравнительные испытания триботехнических свойств образцов напыленных покрытий проводились в смазочном материале И-20А (удельная нагрузка испытаний p составляла 2, 5 и 10 МПа). В качестве контртела использовалась закаленная сталь У8 твердостью 800 HV 10. Измерение величины износа призматических образцов осуществлялось путем определения их линейного износа [15]. Путь трения составлял ≈1500 м. Измерения твердости и микротвердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan20 при нагрузке на индентор P , равной 1 кг и 25 г соответственно.

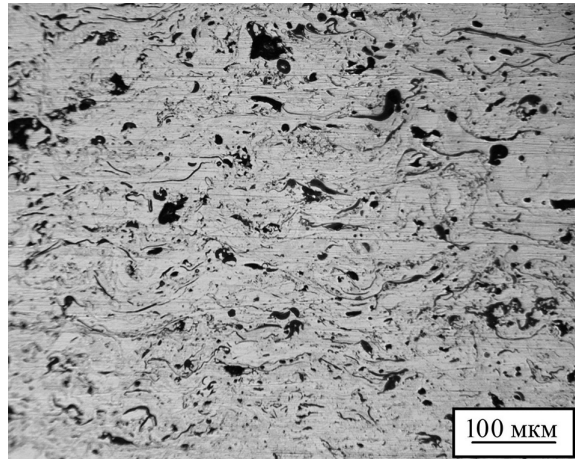
Результаты исследований и их обсуждение.

Структурно-фазовое состояние газотермических покрытий системы Cu-Al. В результате высокоскоростной металлизации двух проволочных материалов формируются слоистые композиционные покрытия, содержащие прослойки бронзы БрКМц3-1 и алюминиевого сплава АК12, а также незначительное количество оксидов алюминия. Характерная микроструктура напыленного покрытия из композиционного материала «БрКМц3-1 + АК12» представлена на рисунке 1. Пористость напыленных покрытий не превышала 10 об.% (см. рисунок 1).

Фазовый состав покрытий после напыления включает в себя Cu, Al, Cu_9Al_4 , CuAl_2 , Cu_3Al , Si, Al_2O_3 (рисунок 2 а, б). Необходимо отметить, что покрытие, сформированное из проволочного ма-

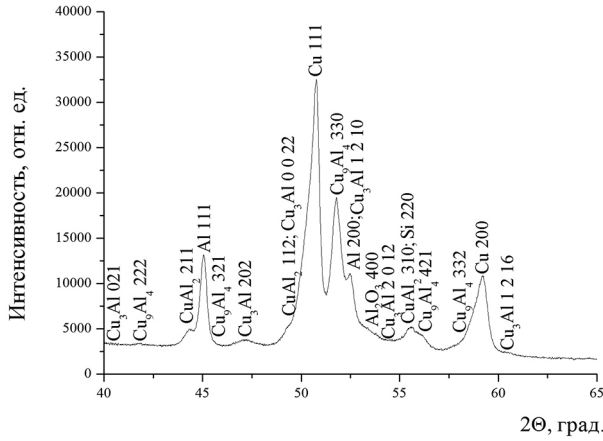


a

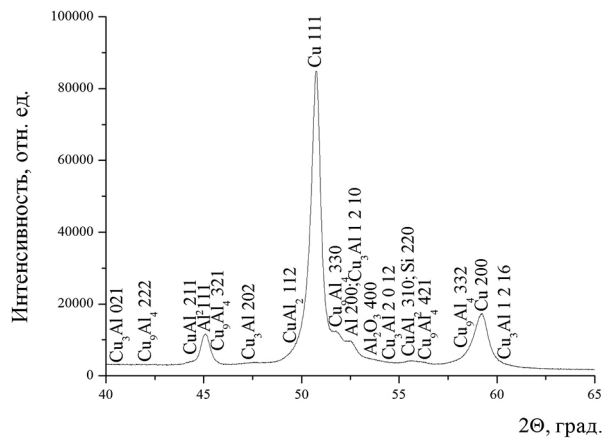


b

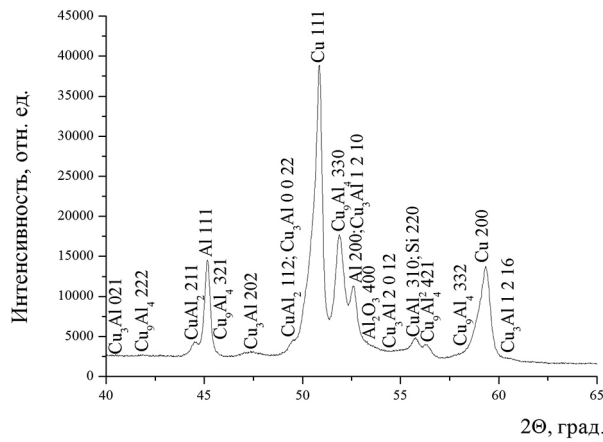
Рисунок 1 — Характерные микроструктуры газотермических покрытий из композиционных материалов на базе системы Cu-Al: покрытие из «БрКМц3-1 (1,6 мм) + АК12 (1,6 мм)» после напыления (a) и отжига при температуре 225 °C (b) в течение 2 ч
Figure 1 — Characteristic microstructures of gas-thermal coatings made of composite materials based on Cu-Al system: coating made of CuSi3Mn1 (1.6 mm) + AlSi (1.6 mm) after spraying (a) and annealing at 225 °C (b) for 2 h



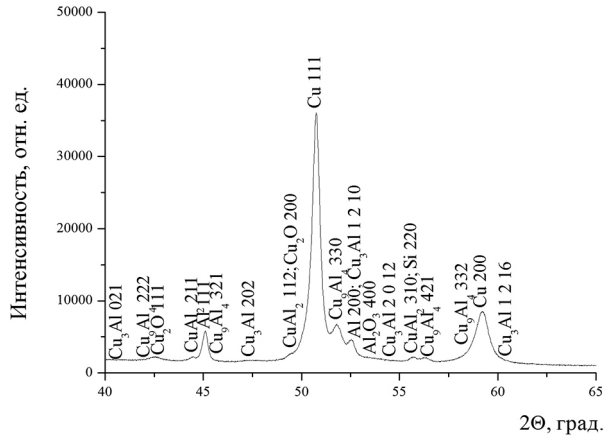
a



b



c



d

Рисунок 2 — Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK α) от поверхностных слоев газотермических покрытий из композиционных материалов на базе системы Cu-Al после напыления (a, b) и отжига при температуре 225 °C (c, d) в течение 2 ч: a, c — покрытие из «БрКМц3-1 (1,2 мм) + АК12 (1,6 мм)»; b, d — покрытие из «БрКМц3-1 (1,6 мм) + АК12 (1,6 мм)»
Figure 2 — Fragments of X-ray diffractograms (CoK α) from surface layers of gas-thermal coatings made of composite materials based on Cu-Al system after spraying (a, b) and annealing at 225 °C (c, d) for 2 h: a, c — coating made of CuSi3Mn1 (1.2 mm) + AlSi (1.6 mm); b, d — coating made of CuSi3Mn1 (1.6 mm) + AlSi (1.6 mm)»

териала БрКМц3-1 диаметром 1,2 мм и алюминиевого сплава АК12 диаметром 1,6 мм, включает в 3 раза больше интерметаллидных соединений по

сравнению с покрытием, полученным с использованием двух проволочных материалов одинакового диаметра 1,6 мм (таблица 1, см. рисунок 2 a, b).

Таблица 1 — Содержание интерметаллидных соединений в газотермических покрытиях из композиционного материала на базе системы Cu-Al после напыления и отжига при температурах 175 и 225 °С в течение 2 ч

Table 1 — Content of intermetallic compounds in gas-thermal coatings made of composite material based on Cu-Al system after spraying and annealing at temperatures of 175 and 225 °C for 2 h

Материалы покрытий и диаметры проволочных материалов, использовавшихся для напыления	Обработка покрытий	Содержание интерметаллидных соединений, об.%
БрКМц3-1 (1,2 мм) + АК12 (1,6 мм)	После напыления	35
	Отжиг при $T = 175\text{ °C}$, $\tau = 2\text{ ч}$	40
	Отжиг при $T = 225\text{ °C}$, $\tau = 2\text{ ч}$	43
БрКМц3-1 (1,6 мм) + АК12 (1,6 мм)	После напыления	10
	Отжиг при $T = 175\text{ °C}$, $\tau = 2\text{ ч}$	15
	Отжиг при $T = 225\text{ °C}$, $\tau = 2\text{ ч}$	17

Повышенное количество интерметаллидных соединений в покрытии «БрКМц3-1 (1,2 мм) + АК12 (1,6 мм)» связано с повышенной растворимостью алюминия в медных прослойках.

В связи с этим для увеличения доли интерметаллидных фаз в композиционных покрытиях системы Cu-Al целесообразно увеличивать объемное содержание алюминиевого сплава. О растворении меди в алюминиевых прослойках, а также алюминия в медных прослойках на стадиях формирования покрытий свидетельствуют данные о значениях параметров кристаллических решеток Cu и Al. В частности, параметр кристаллической решетки меди ($a = 0,3620\text{--}0,3622\text{ нм}$), входящей в состав бронзовых прослоек композиционных покрытий, существенно превышает значения a для покрытия из бронзы БрКМц3-1 ($a = 0,3617\text{ нм}$), что свидетельствует о растворении алюминия в медных прослойках композита при газотермическом напылении покрытий. Кроме этого, параметр кристаллической решетки a алюминия в композиционных покрытиях составляет $0,4043\text{--}0,4045\text{ нм}$, а для газотермического монопокрытия из алюминиевого сплава АК12 $a = 0,4049\text{ нм}$, что в свою очередь связано с растворением в алюминиевых прослойках композиционного покрытия меди, имеющей пониженный атомный радиус ($0,128\text{ нм}$) по сравнению с алюминием ($0,143\text{ нм}$).

Твердость и микротвердость покрытия из «БрКМц3-1 (1,2 мм) + АК12 (1,6 мм)» составляют $190\text{ HV }1$ и $230\text{--}240\text{ HV }0,025$, а покрытия из «БрКМц3-1 (1,6 мм) + АК12 (1,6 мм)» — $180\text{ HV }1$ и $180\text{--}190\text{ HV }0,025$ соответственно. Различия в значениях данных показателей связаны с наличием в покрытиях мягких прослоек алюминиевого сплава АК12 ($100\text{ HV }1$) и бронзы БрКМц3-1 ($80\text{ HV }1$), а также с разным содержанием интерметаллидных соединений (таблица 2).

Отжиг композиционных покрытий «БрКМц3-1 + АК12» при температурах 175 и 225 °C не приводит к изменениям фазового состава покрытий, но способствует увеличению содержания в них интерметаллидных соединений (см. таблицу 1). Также необходимо отметить, что после отжига компози-

ционных покрытий регистрируется существенное снижение значений параметров кристаллических решеток меди, что связано с выделением интерметаллидных соединений. Кроме этого, в результате отжига композиционных покрытий при температуре 225 °C регистрируется незначительное повышение их пористости (до $12\text{ об.}\%$), что связано с диффузионным переносом атомов алюминия в прослойки бронзы и формированием диффузионной пористости [16] в объеме алюминиевых прослоек. Отжиг покрытий также обеспечивает повышение микротвердости композиционных покрытий «БрКМц3-1 + АК12» (см. таблицу 2). В частности, микротвердость композиционных покрытий после отжига при температуре 225 °C достигает значений $220\text{--}260\text{ HV }0,025$ (см. таблицу 2). Повышение микротвердости покрытий обусловлено выделением в них дополнительного количества твердых интерметаллидных соединений [17] (см. таблицу 1).

Триботехнические свойства газотермических покрытий системы Cu-Al. Результаты триботехнических испытаний композиционных покрытий «БрКМц3-1 + АК12» в исходном состоянии и после различных режимов отжига представлены в таблице 3 и на рисунках 3, 4. В качестве базовых антифрикционных материалов для сравнения триботехнических свойств выполнялись испытания образцов из бронзы БрОФ10-1, полученных центробежной индукционной наплавкой, газотер-

Таблица 2 — Микротвердость газотермических покрытий из композиционного материала на базе системы Cu-Al после напыления и отжига при температурах 175 и 225 °С в течение 2 ч

Table 2 — Microhardness of gas-thermal coatings made of composite material based on Cu-Al system after spraying and annealing at temperatures of 175 and 225 °C for 2 h

Материалы покрытий и диаметры проволочных материалов, использовавшихся для напыления	Микротвердость, HV 0,025		
	После напыления	Отжиг при 175 °C , 2 ч	Отжиг при 225 °C , 2 ч
БрКМц3-1 (1,2 мм) + АК12 (1,6 мм)	230–240	240–250	250–260
БрКМц3-1 (1,6 мм) + АК12 (1,6 мм)	180–190	205–215	220–230

Таблица 3 — Интенсивность линейного изнашивания и коэффициенты трения композиционных покрытий в исходном состоянии и после различных режимов отжига, испытанных в смазочном материале И-20А

Table 3 — Linear wear intensity and friction coefficients of composite coatings in the initial state and after different annealing regimes tested in I-20A lubricant

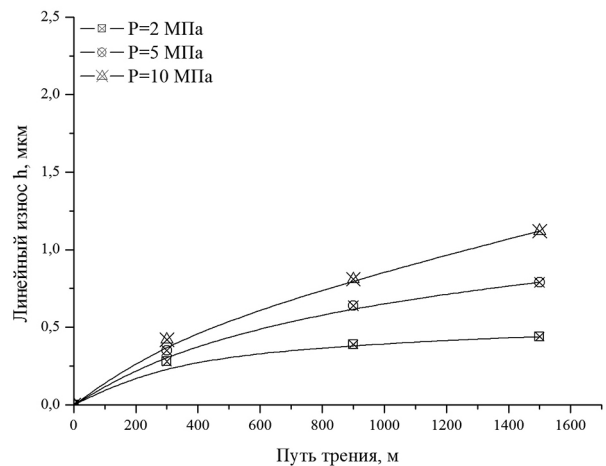
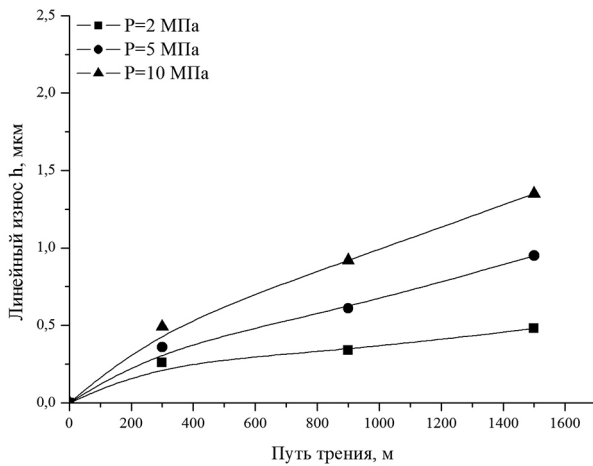
Материалы покрытий и диаметры проволочных материалов, использовавшихся для напыления	Давление испытаний p , МПа	Интенсивность линейного изнашивания $I_{лн}$, $\times 10^{-10}$	Коэффициент трения f
БрОФ10-1 (индукционная наплавка)	2	1,85	0,06–0,07
	5	4,90	0,06–0,07
	10	7,15	0,06–0,07
Газотермическое покрытие из АК12	2	19,50	0,05–0,06
	5	34,00	0,05–0,06
	10	75,10	0,05–0,06
Газотермическое покрытие из БрКМц3-1 (1,2 мм) + АК12 (1,6 мм)	2	1,35	0,07–0,08
	5	2,60	0,07–0,08
	10	4,25	0,07–0,08
Газотермическое покрытие из БрКМц3-1 (1,2 мм) + АК12 (1,6 мм) + ТО 175 °С, 2 ч	2	1,25	0,07–0,08
	5	2,25	0,07–0,08
	10	4,15	0,07–0,08
Газотермическое покрытие из БрКМц3-1 (1,2 мм) + АК12 (1,6 мм) + ТО 225 °С, 2 ч	2	1,10	0,07–0,08
	5	2,00	0,07–0,08
	10	4,10	0,07–0,08
Газотермическое покрытие из БрКМц3-1 (1,6 мм) + АК12 (1,6 мм)	2	1,80	0,05–0,06
	5	3,65	0,05–0,06
	10	5,85	0,05–0,06
Газотермическое покрытие из БрКМц3-1 (1,6 мм) + АК12 (1,6 мм) + ТО 175 °С, 2 ч	2	1,75	0,06–0,07
	5	3,35	0,06–0,07
	10	5,35	0,06–0,07
Газотермическое покрытие из БрКМц3-1 (1,6 мм) + АК12 (1,6 мм) + ТО 225 °С, 2 ч	2	1,75	0,05–0,06
	5	3,00	0,05–0,06
	10	4,25	0,05–0,06
Газотермическое покрытие из БрКМц3-1	2	4,35	0,05–0,06
	5	8,10	0,05–0,06
	10	11,60	0,05–0,06

мических покрытий из бронзы БрКМц3-1, а также алюминиевого сплава АК12. Из результатов триботехнических испытаний можно видеть, что минимальной износостойкостью в среде смазочного материала И-20А среди испытанных композиционных материалов характеризуется покрытие из алюминиевого сплава АК12 (см. таблицу 3). Низкая износостойкость покрытия связана с его невысокими дюротметрическими свойствами.

Максимальную износостойкость в среде смазочного материала И-20А при всех давлениях испытаний имеет композиционное газотермическое покрытие из «БрКМц3-1 (1,2 мм) + АК12 (1,6 мм)», что обусловлено наличием в нем большого количества твердых интерметаллидных соединений [17] (см. таблицу 1). В частности, его износостойкость в 2 раза превышает износостойкость наплавленного покрытия из бронзы БрОФ10-1 и в 3 раза выше сопротивления изнашиванию газотермического монопокрытия из бронзы БрКМц3-1 (см. таблицу 3).

Также необходимо отметить, что дополнительный отжиг покрытий из композиционного материала «БрКМц3-1 + АК12» при температурах 175 и 225 °С в течение 2 ч позволяет повысить их износостойкость до 30 % по сравнению с исходным состоянием (после напыления). Повышение износостойкости покрытий, подвергнутых отжигу, связано с выделением в них интерметаллидных соединений (см. таблицу 1), обуславливающих увеличение их микротвердости. Коэффициенты трения для всех исследуемых покрытий находились в пределах от 0,05 до 0,08 (см. таблицу 3).

Таким образом, можно сделать вывод, что метод высокоскоростной металлизации позволяет формировать экономичные композиционные покрытия системы Cu-Al путем распыления промышленных проволочных материалов. Данные композиционные покрытия могут быть использованы в качестве антифрикционных материалов и выступать альтернативой традиционным дорогостоящим

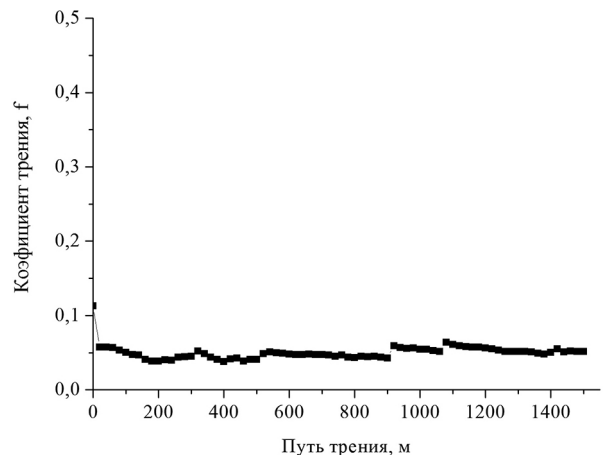
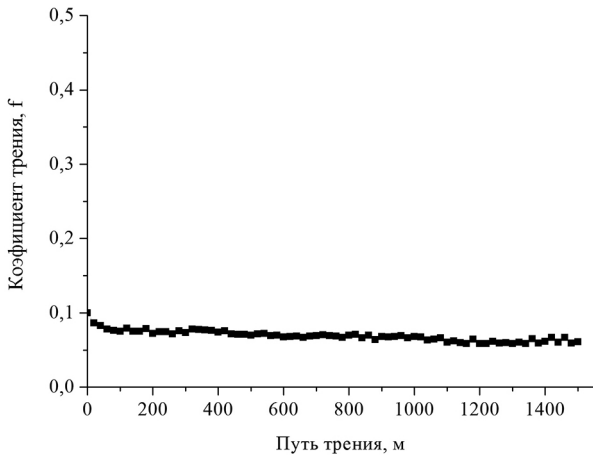


a

b

Рисунок 3 — Характерные кривые зависимостей линейного износа от пути трения для антифрикционного покрытия из бронзы БрОФ10-1 (a), полученного центробежной индукционной наплавкой, и газотермического покрытия из композиционного материала «БрКМц3-1 (1,6 мм) + АК12 (1,6 мм)» (b), испытанных в смазочном материале И-20А при различных удельных давлениях испытаний

Figure 3 — Characteristic curves of dependences of linear wear on friction path for antifriction coating made of bronze CuSn10P1 (a), obtained by centrifugal induction cladding, and gas-thermal coating made of composite material CuSi3Mn1 (1.6 mm) + AlSi (1.6 mm), tested in lubricant I-20A at different specific test pressures



a

b

Рисунок 4 — Характерные кривые зависимостей коэффициентов трения от пути трения для антифрикционного покрытия из бронзы БрОФ10-1 (a), полученного центробежной индукционной наплавкой, и газотермического покрытия из композиционного материала «БрКМц3-1 (1,6 мм) + АК12 (1,6 мм)» (b), испытанных в смазочном материале И-20А при удельной нагрузке испытаний $p = 2$ МПа

Figure 4 — Characteristic curves of dependences of friction coefficients on friction path for antifriction coating made of bronze CuSn10P1 (a), obtained by centrifugal induction cladding, and gas-thermal coating made of composite material CuSi3Mn1 (1.6 mm) + AlSi (1.6 mm), tested in lubricant I-20A at specific test load $p = 2$ MPa

антифрикционным бронзам БрОЦС, БрОФ. При этом повышенная пористость композиционных покрытий Cu-Al (рисунок 5), по сравнению с монопокрытиями и наплавленными материалами, оказывает положительное влияние на их износостойкость за счет повышенного смазкоудерживающего эффекта. Кроме этого, отжиг композиционных покрытий при пониженных температурах 175 и 225 °С позволяет повысить их пористость, микротвердость и износостойкость без изменения прочностных свойств сердцевины обрабатываемого изделия.

Заключение. Исследовано структурно-фазовое состояние, дюрOMETрические и триботехнические свойства экономичных композиционных газотер-

мических покрытий системы Cu-Al, полученных путем распыливания проволочных материалов из сварочной бронзы БрКМц3-1 и алюминийевого сплава АК12. Показано, что фазовый состав напыленных композиционных покрытий включает Cu, Al, Cu₉Al₄, CuAl₂, Cu₃Al, Si, Al₂O₃. Микротвердость покрытий составляет 180–240 HV 0,025. Показано, что отжиг композиционных покрытий при 175 и 225 °С приводит к увеличению содержания в них интерметаллидных соединений до 43 об.%, что сопровождается незначительным повышением пористости покрытий, а также возрастанием их микротвердости до 250–260 HV 0,025. Установлено, что максимальная износостойкость при трении со смазочным материалом И-20А регистрируется у композиционного га-

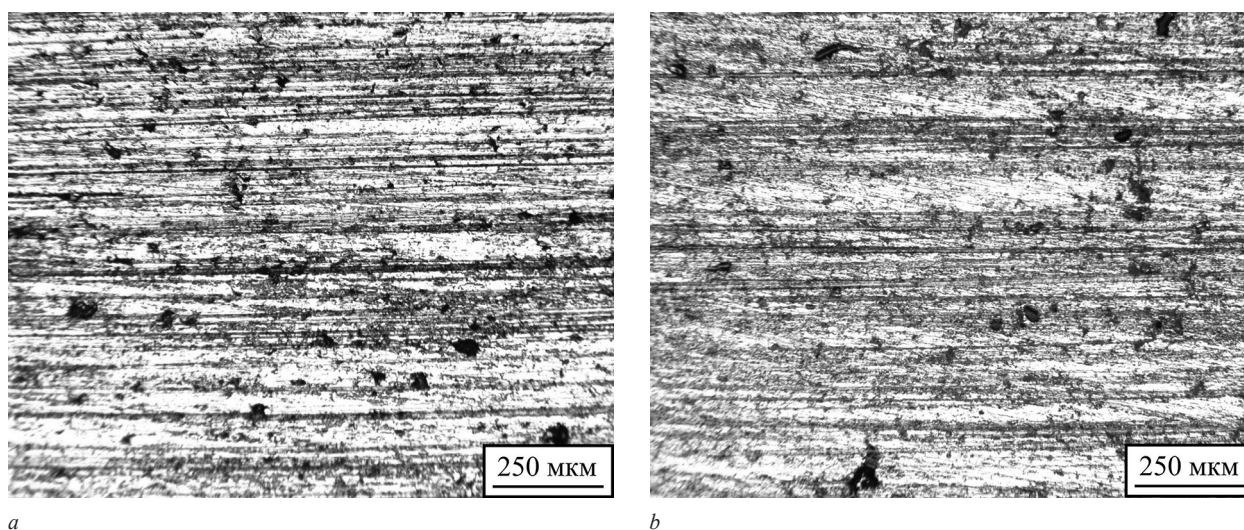


Рисунок 5 – Характерные микрофотографии поверхностей трения композиционных материалов «БрКМц3-1 (1,2 мм) + АК12 (1,6 мм)» (a) и «БрКМц3-1 (1,2 мм) + АК12 (1,6 мм)» (b)
 Figure 5 — Characteristic microphotographs of friction surfaces of composite materials CuSi3Mn1 (1.2 mm) + AlSi (1.6 mm) (a) and CuSi3Mn1 (1.2 mm) + AlSi (1.6 mm) (b)

зотермического покрытия из «БрКМц3-1 + АК12», содержащего повышенное количество твердых и прочных интерметаллидных соединений. Показано, что износостойкость композиционного покрытия «БрКМц3-1 + АК12» до 2 раз выше износостойкости покрытия из бронзы БрОФ10-1, полученного центробежной индукционной наплавкой. Дополнительный отжиг покрытий из композиционных материалов «БрКМц3-1 + АК12» позволяет увеличить их износостойкость до 30 % по сравнению с необработанными покрытиями. Сделан вывод, что метод высокоскоростной металлизации является перспективным способом получения экономичных антифрикционных материалов из распространенных проволочных материалов.

Работа выполнена в рамках проекта БРФФИ № T23M-041 (2023–2025 гг.).

Список литературы

1. Филиппов, М.А. Трение и антифрикционные материалы: учеб. пособие / М.А. Филиппов, О.Ю. Шешуков. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. — 204 с.
2. Триботехника: конспект лекций / Е.И. Кордилова. — Минск: Изд-во БГТУ, 2013. — 150 с.
3. Рыбакова, Л.М. Структура и износостойкость металла / Л.М. Рыбакова, Л.И. Куксенова. — М.: Машиностроение, 1982. — 212 с.
4. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 2003. — 576 с.
5. Микроскопия в исследовании поверхности антифрикционных многокомпонентных алюминиевых сплавов / О.О. Столярова [и др.] // Физическая мехомеханика. — 2016. — Т. 19, № 5. — С. 105–114.
6. Формирование триботехнических покрытий Al-Cu с функциональными добавками методом центробежной индукционной наплавки / А.И. Комаров [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2022. — № 2(59). — С. 54–61. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-2-59-54-61>.
7. Спеченный композиционный материал на основе меди: пат. RU 2112068 C1 / Н.М. Русин, А.И. Турова. — Оpubл. 27.05.1998.
8. Спеченный антифрикционный материал на основе алюминиевой бронзы: пат. RU 2155241 C2 / Е.Н. Коростелева, А.П. Савицкий, Н.М. Русин. — Оpubл. 27.08.2000.
9. Композиты, армированные квазикристаллическими частицами Al-Cu-Fe, с медной матрицей и их триботехнические свойства / Д.С. Шайтура [и др.] // Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2010. — № 11. — С. 87–91.
10. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. — Минск: Технопринт, 2004. — 200 с.
11. Влияние алюминия на структурно-фазовое состояние, коррозионную стойкость и трибомеханические свойства композиционных покрытий, полученных высокоскоростной металлизацией / А.Н. Григорчик [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2022. — № 1(205). — С. 18–23. — DOI: <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2022-18-1-18-23>.
12. Влияние отжига на структурно-фазовое состояние и свойства газотермического покрытия из псевдосплава Al-Fe-Cr-Ni, полученного методом высокоскоростного распыления проволочных материалов / Е.В. Астрашаб [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2021. — № 4(57). — С. 71–77. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-4-57-71-77>.
13. Структурно-фазовое состояние и коррозионная стойкость покрытий из псевдо-сплавов Fe-Al, Fe-Cr-Ni-Al и Ni-Cr-Al, напыленных методом гиперзвуковой металлизации / Е.В. Астрашаб [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. / ред. кол.: В.Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. — Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2022. — Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. Обработка металлов давлением. — С. 8–15.
14. Structure and Tribological Properties of a Ti-TiN Coating Obtained by Hypersonic Metallization / V.A. Kukareko [et al.] // Journal of Friction and Wear. — 2022. — Vol. 43, iss. 5. — Pp. 300–304. — DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366622050075>.
15. Ионно-модифицированные субмикроструктурные титановые и циркониевые сплавы для медицины и механики / А.Г. Кононов [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2013. — № 1(22). — С. 47–53.
16. Гегузин, Я.Е. Диффузионная зона / Я.Е. Гегузин. — М.: Наука, 1979. — 344 с.
17. Металловедение алюминия и его сплавов / А.И. Беляев [и др.]. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1983. — 280 с.

GRIGORCHIK Alexander N., Ph. D. in Eng.

Deputy Head of the Center of Structural Research and Tribomechanical Testing of Materials and Mechanical Engineering Products of Collective Use of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”¹
E-mail: GrigorchikAN@gmail.com

KUKAREKO Vladimir A., D. Sc. in Phys. and Math., Prof.

Chief of the Center of Structural Research and Tribomechanical Testing of Materials and Mechanical Engineering Products of Collective Use of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”¹
E-mail: v_kukareko@mail.ru

BELOTSEKOVSKY Marat A., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Components Hardening of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”¹
E-mail: mbelotser@gmail.com

SOSNOVSKIY Aleksey V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Leading Researcher of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Component Hardening of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”¹
E-mail: sosnovskij@inbox.ru

ASTRASHAB Evgeniy V.

Researcher of the Center of Structural Research and Tribomechanical Testing of Materials and Mechanical Engineering Products of Collective Use of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”¹
E-mail: astrashabev@mail.ru

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 12 September 2023.

WEAR RESISTANCE OF ANTIFRICTION GAS-THERMAL COATINGS BASED ON THE Cu-Al SYSTEM UNDER BOUNDARY FRICTION

The paper studies the structure, phase composition, durometric and tribological properties of sprayed composite gas-thermal coatings based on the Cu-Al system. It is shown that the sprayed coatings include Cu, Al, Cu₉Al₄, CuAl₂, Cu₃Al, Si, Al₂O₃ phases. It is established that additional annealing of composite coatings at 175 and 225 °C for 2 h leads to an increase in the content of intermetallic compounds in them up to ≈ 43 vol.%, which contributes to an increase in the microhardness of the composites up to ≈ 20 % compared to the initial state. It is noted that the coating of “CuSi3Mn1+AlSi12” is characterized by increased wear resistance in the environment of the lubricant I-20A and its wear resistance is up to 2 times higher than the wear resistance of the sprayed coating of bronze CuSn10P1. It is shown that additional annealing of coatings made of “CuSi3Mn1+AlSi12” leads to an increase in their wear resistance up to 30 % compared to the initial state.

Keywords: composite materials, antifriction coatings, phase composition, intermetallic compounds, wear resistance

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-4-65-54-62>

References

1. Filippov M.A., Sheshukov O.Yu. *Trenie i antifriktsionnye materialy* [Friction and anti-friction materials]. Ekaterinburg, Ural'skiy universitet Publ., 2021. 204 p. (in Russ.).
2. Kordikova E.I. *Tribotekhnika* [Tribotechnics]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet Publ., 2013. 150 p. (in Russ.).
3. Rybakova L.M., Kuksenova L.I. *Struktura i iznosostoykost metalla* [Structure and wear resistance of metal]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 212 p. (in Russ.).
4. Chichinadze A.V., et al. *Trenie, iznos i smazka (tribologiya i tribotekhnika)* [Friction, wear and lubrication (tribology and tribotechnics)]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 576 p. (in Russ.).
5. Stolyarova O.O., Muraveva T.I., Zagorskiy D.L., Belov N.A. *Mikroskopiya v issledovanii poverkhnosti antifriktsionnykh mnogokomponentnykh alyuminiyevykh splavov* [Microscopy in the study of the surface of antifriction multicomponent aluminum alloys]. *Fizicheskaya mekhomekhanika*, 2016, vol. 19, no. 5, pp. 105–114 (in Russ.).
6. Komarov A.I., Orda D.V., Sosnovsky I.A., Kurilyonok A.A. *Formirovanie tribotekhnicheskikh pokrytiy Al-Cu s funktsionalnymi dobavkami metodom tsentrovezhnoy induktsionnoy naplavki* [Formation of tribotechnical Al-Cu coatings with functional additives by centrifugal induction surfacing]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2022, no. 2(59), pp. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-2-59-54-61> (in Russ.).
7. Rusin N.M., Turova A.I. *Spechennyy kompozitsionnyy material na osnove medi* [Sintered composite material based on copper]. Patent RU, no. 2112068 C1, 1998 (in Russ.).

8. Korosteleva E.N., Savitskiy A.P., Rusin N.M. *Spechenny anti-friktsionnyy material na osnove alyuminievoy bronzy* [Sintered antifriction material based on aluminum bronze]. Patent RU, no. 2155241 C2, 2000 (in Russ.).
9. Shaytura D.S., et al. Kompozity, armirovannye kvazikristallicheskimy chastitsami Al-Cu-Fe, s mednoy matritsey i ikh tribotekhnicheskie svoystva [Composites reinforced by Al-Cu-Fe quasi-crystalline particles with a copper matrix and their tribological properties]. *Poverkhnost, rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytromnye issledovaniya*, 2010, no. 11, pp. 87–91 (in Russ.).
10. Belotserkovskiy M.A. *Tekhnologii aktivirovannogo gazoplamennogo napyleniya antifriktsionnykh pokrytiy* [Technologies of activated flame spraying of antifriction coatings]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2004. 200 p. (in Russ.).
11. Grigorichik A.N., Kukareko V.A., Astrashab E.V., Belotserkovskiy M.A., Sosnovskiy A.V. Vliyaniye alyuminiya na strukturno-fazovoe sostoyaniye, korrozionnuyustoykosti i tribomekhanicheskie svoystva kompozitsionnykh pokrytiy, poluchennykh vysokoskorostnoy metallizatsiyey [Influence of aluminum on structural-phase state, corrosion resistance and tribomechanical properties of composite coatings obtained by hypersonic metallization]. *Strengthening technologies and coatings*, 2022, no. 1(205), pp. 18–23. DOI: <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2022-18-1-18-23> (in Russ.).
12. Astrashab E.V., Belotserkovskiy M.A., Grigorichik A.N., Kukareko V.A. Vliyaniye otzhiga na strukturno-fazovoe sostoyaniye i svoystva gazotermicheskogo pokrytiya iz psevdosplava Al-Fe-Cr-Ni, poluchennogo metodom vysokoskorostnogo raspyleniya provolochnykh materialov [Influence of annealing on the structural-phase state and properties of gas-thermal Al-Fe-Cr-Ni pseudoalloy coating obtained by the method of high-speed spraying of wire materials]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2021, no. 4(57), pp. 71–77. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-4-57-71-77> (in Russ.).
13. Astrashab E.V., Grigorichik A.N., Belotserkovskiy M.A., Kukareko V.A., Posylkina O.I. Strukturno-fazovoe sostoyaniye i korrozionnaya stoykost pokrytiy iz psevdosplavov Fe-Al, Fe-Cr-Ni-Al i Ni-Cr-Al, napylennykh metodom giperzvukovoy metallizatsii [Structural-phase state and corrosion resistance of coatings made of pseudo-alloys Fe-Al, Fe-Cr-Ni-Al and Ni-Cr-Al, sprayed by hypersonic metallization]. *Sovremennyye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov. Kniga 2. Tekhnologii i oborudovaniye mekhanicheskoy i fiziko-tekhnicheskoy obrabotki. Obrabotka metallov davleniem*, 2022, pp. 8–15 (in Russ.).
14. Kukareko V.A., Belotserkovskiy M.A., Grigorichik A.N., Sosnovskiy A.V. Structure and tribological properties of a Ti-TiN coating obtained by hypersonic metallization. *Journal of friction and wear*, 2022, vol. 43, iss. 5, pp. 300–304. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366622050075>.
15. Kononov A.G., Kukareko V.A., Beli A.V., Sharkeev Yu.P. Ionno-modifitsirovannyye submikrokristallicheskie titanovyye i tsirkonievyye splavy dlya meditsiny i mekhaniki [Ion-modified nanostructured titanium and zirconium alloys for medicine and industry]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2013, no. 1(22), pp. 47–53 (in Russ.).
16. Geguzin Ya.E. *Diffuzionnaya zona* [Diffusion zone]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 344 p. (in Russ.).
17. Belyaev A.I., et al. *Metallovedeniye alyuminiya i ego splavov* [Metallurgical science of aluminum and its alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 280 p. (in Russ.).