

DOI: <https://doi.org/10.18454/ENGIN.2024.2.2>**ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ МЕДНЫХ СПЛАВОВ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ**

Научная статья

**Григорчик А.Н.<sup>1,\*</sup>, Кукареко В.А.<sup>2</sup>, Белоцерковский М.А.<sup>3</sup>, Сосновский А.В.<sup>4</sup>**<sup>1</sup>ORCID : 0000-0002-1885-6590;<sup>1,2,3,4</sup> Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь

\* Корреспондирующий автор (grigorchikan[at]gmail.com)

**Аннотация**

Исследована структура, фазовый состав, твердость и износостойкость антифрикционных покрытий на основе медных сплавов. Показано, что покрытие, полученное центробежной индукционной наплавкой бронзы БрОФ10-1, содержит в своем фазовом составе интерметаллидные соединения  $\text{Cu}_{5,6}\text{Sn}$  и  $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$ ,  $\alpha$ -твердый раствор Sn в меди, а также  $\alpha$ -Fe. Твердость наплавленного слоя из бронзы составляет 135-140 HV 1. В фазовом составе газотермического покрытия из сварочной бронзы БрКМц3-1 регистрируется твердый раствор на основе Cu и менее 5 об.% оксидов CuO и  $\text{SiO}_2$ . Твердость покрытия составляет 80 HV 1. Пониженное содержание оксида меди в напыленном покрытии связано с раскисляющим действием кремния, входящего в элементный состав напыляемой проволоки БрКМц3-1. Установлено, что при трении в смазочных материалах И-20А и Литол-24 наплавленное покрытие из бронзы БрОФ10-1 имеет в  $\approx 1,5$ -2,0 раза более высокую износостойкость по сравнению с напыленным покрытием из бронзы БрКМц3-1, что связано с повышенной твердостью наплавленного слоя за счет наличия в нем интерметаллидов  $\text{Cu}_{5,6}\text{Sn}$  и  $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$ ,  $\alpha$ -твердого раствора Sn в меди и железа. При триботехнических испытаниях в условиях сухого трения напыленное газотермическое покрытие из бронзы БрКМц3-1 имеет пониженный коэффициент трения и более высокую износостойкость по сравнению с наплавленным покрытием из бронзы БрОФ10-1. Сделан вывод, что повышенная износостойкость газотермического покрытия из бронзы БрКМц3-1 в условиях трения без смазочного материала связана с наличием в нем оксидов CuO и  $\text{SiO}_2$ , способных выступать в качестве твердой смазки при сухом трении.

**Ключевые слова:** антифрикционные покрытия, медные сплавы, износостойкость, коэффициент трения.**WEAR RESISTANCE OF ANTIFRICTION COATINGS OF COPPER ALLOYS UNDER DIFFERENT FRICTION CONDITIONS**

Research article

**Grigorchik A.N.<sup>1,\*</sup>, Kukareko V.A.<sup>2</sup>, Belotserkovskii M.A.<sup>3</sup>, Sosnovskii A.V.<sup>4</sup>**<sup>1</sup>ORCID : 0000-0002-1885-6590;<sup>1,2,3,4</sup> Joint Institute of Mechanical Engineering of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

\* Corresponding author (grigorchikan[at]gmail.com)

**Abstract**

The structure, phase composition, hardness and wear resistance of antifricion coatings based on copper alloys have been studied. It is demonstrated that the coating obtained by centrifugal induction cladding of bronze BrOF10-1 contains in its phase composition intermetallic compounds  $\text{Cu}_{5,6}\text{Sn}$  and  $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$ ,  $\alpha$ -solid solution of Sn in copper, as well as  $\alpha$ -Fe. The hardness of the bronze clad layer is 135-140 HV 1. In the phase composition of gas-thermal coating from welding bronze BrКМц3-1, Cu-based solid solution and less than 5 vol.% of CuO and  $\text{SiO}_2$  oxides are registered. The hardness of the coating is 80 HV 1. The reduced content of copper oxide in the sprayed coating is related to the deoxidizing effect of silicon, which is a part of the elemental composition of the sprayed wire BrКМц3-1. It is established that at friction in lubricants I-20A and Litol-24 the clad coating from bronze BrOF10-1 has in  $\approx 1,5$ -2,0 times higher wear resistance in comparison with the sprayed coating from bronze BrКМц3-1 that is connected with the increased hardness of the clad layer due to the presence in it of intermetallides  $\text{Cu}_{5,6}\text{Sn}$  and  $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$ ,  $\alpha$ -solid solution of Sn in copper and iron. At tribotechnical tests under dry friction conditions, the sprayed gas-thermal coating from bronze BrКМц3-1 has a reduced friction coefficient and higher wear resistance in comparison with the clad coating from bronze BrOF10-1. It is concluded that the increased wear resistance of gas-thermal coating from bronze BrКМц3-1 under friction conditions without lubricant is related to the presence in it of CuO and  $\text{SiO}_2$  oxides capable of acting as a solid lubricant under dry friction.

**Keywords:** antifricion coatings, copper alloys, wear resistance, friction coefficient.**Введение**

Одним из самых распространенных материалов для формирования антифрикционных покрытий являются медные сплавы [1], [2], [3]. Такие покрытия характеризуются пониженным коэффициентом трения, хорошей прирабатываемостью и износостойкостью, а также имеют высокое сопротивление к заеданию [1], [2], [3]. Наиболее распространенными способами получения антифрикционных покрытий на медной основе являются порошковая металлургия и индукционная наплавка [4], [5], [6]. Вместе с тем, данные технологии изготовления покрытий являются многостадийными, требуют предварительной подготовки наплавляемого материала и имеют относительно невысокую производительность. Альтернативным способом формирования покрытий является метод высокоскоростного газотермического напыления покрытий из металлических материалов, который отличается высокой

производительностью, пониженным коэффициентом расхода напыляемого материала, а также имеет невысокую стоимость [7]. Таким образом, применение технологии высокоскоростного напыления для формирования антифрикционных покрытий из медных проволочных материалов может позволить существенно снизить их стоимость. Вместе с тем, систематических данных о триботехнических свойствах газотермических покрытий из медных сплавов, полученных путем высокоскоростного распыления промышленных проволочных материалов, в литературе не представлено. В связи с этим целью настоящей работы являлось исследование структурно-фазового состояния и триботехнических характеристик антифрикционных газотермических покрытий из сварочной бронзы БрКМц3-1 напыленных методом высокоскоростной металлизации, а также сравнение их с триботехническими свойствами покрытия из бронзы БрОФ10-1, полученного центробежной индукционной наплавкой [4].

### Методы и принципы исследования

В качестве объектов исследований были выбраны антифрикционные покрытия на основе меди. В частности, осуществлялось газотермическое напыление покрытий из бронзы БрКМц3-1, а также проводилась центробежная индукционная наплавка покрытий из бронзы БрОФ10-1 [4]. Газотермическое напыление выполнялось методом высокоскоростной металлизации с использованием установки АДМ-10 [7]. При напылении образцов давление пропана составляло 0,35 МПа, а давление воздуха – 0,35 МПа. Дистанция напыления находилась в диапазоне от 125 до 140 мм. Покрытия формировались на пластине с размерами 50×50×5 мм, изготовленной из стали 35. Толщина сформированных покрытий составляла ≈ 0,5 мм. Для исследований структуры, фазового состава, а также определение дюрометрических свойств (твердости и микротвердости) и триботехнических характеристик покрытий вырезались образцы с размерами 8×5×5 мм. Металлографические исследования антифрикционных покрытий проводились на оптическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ. Исследование структуры напыленных покрытий осуществлялось без травления. Изучение фазового состава покрытий, выполнялось на дифрактометре POWDIX 600 в монохроматизированном кобальтовом ( $\text{CoK}_\alpha$ ) 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 антифрикционных покрытий проводились без смазочного материала, а также в среде смазок И-20А и Литол-24. Удельные нагрузки триботехнических испытаний составляли  $p = 2, 5$  и  $10$  МПа. В качестве контртела использовалась закаленная сталь У8 с твердостью 800 HV 10. Измерение величины износа призматических образцов осуществлялось путем измерения линейного износа [8]. Путь трения составлял ≈ 1500 м. Измерения твердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan20 при нагрузке на индентор  $P = 1$  кг.

### Основные результаты

Элементный состав полученных антифрикционных покрытий из бронз БрКМц3-1 и БрОФ10-1 представлен в таблице 1. Можно видеть, что наплавленное покрытие из бронзы БрОФ10-1 содержит повышенное количество железа, что связано с его диффузией из стальной подложки в материал покрытия при индукционной наплавке.

Таблица 1 - Элементный состав антифрикционных покрытий на основе меди, полученных центробежной индукционной наплавкой бронзы БрОФ10-1 и газотермическим напылением проволоки из бронзы БрКМц3-1

DOI: <https://doi.org/10.18454/ENGIN.2024.2.2.1>

Маркировка образцов	Массовое содержание, масс. %								
	Cu	Sn	Si	Mn	Fe	Ni	Pb	S	P
Наплавка БрОФ10-1	Ост.	8,919	2,039	-	6,250	0,306	0,055	0,006	0,658
ГТП БрКМц3-1	Ост.	-	3,588	0,868	0,088	-	-	0,032	0,065

На рисунке 1 приведены микроструктуры полученных антифрикционных покрытий на медной основе. Можно видеть, что газотермическое покрытие из бронзы БрКМц3-1 имеет плотную структуру и его пористость не превышает 5 об.% (рисунок 1, а). В то же время пористость наплавленного покрытия из бронзы БрОФ10-1 не превышала 3 об.% (рисунок 1, б).

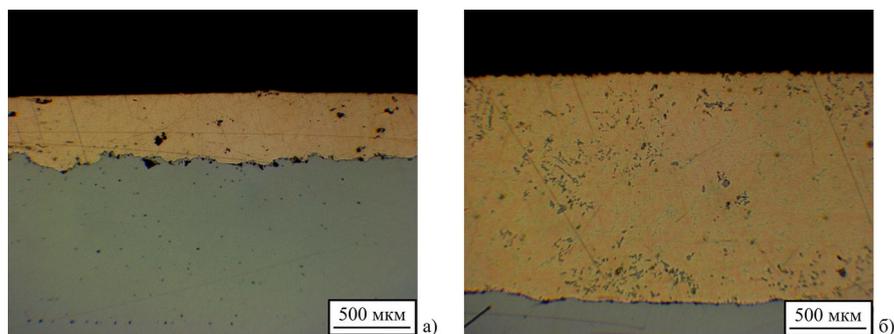


Рисунок 1 - Характерные микроструктуры антифрикционных покрытий на основе меди, полученных методом высокоскоростного напыления бронзы БрКМц3-1 (а) и методом центробежной индукционной направки бронзы БрОФ10-1 (б)

DOI: <https://doi.org/10.18454/ENGIN.2024.2.2.2>

В фазовом составе наплавленного покрытия из бронзы БрОФ10-1 регистрируются интерметаллидные соединения  $Cu_{5,6}Sn$  и  $Cu_{41}Sn_{11}$ ,  $\alpha$ -твердый раствор Sn в меди, а также  $\alpha$ -Fe (рисунок 2, б). В свою очередь, в фазовом составе напыленного газотермического покрытия из бронзы БрКМц3-1 регистрируется матричная фаза Cu и незначительное количество оксидов CuO (PDF 74-1021: моноклинная кристаллическая решетка с параметрами  $a = 0,4653$  нм,  $b = 0,3410$  нм,  $c = 0,5108$  нм) и  $SiO_2$  (PDF 33-1161: гексагональная плотноупакованная кристаллическая решетка с параметрами  $a = 0,4913$  нм,  $c = 0,5405$  нм) (менее 5 об.%) (рисунок 2, а). Необходимо отметить, что при газотермическом напылении стальных покрытий в них регистрируется повышенное количество оксидов, которое может достигать  $\approx 20$ -25 об. % [9]. Относительно низкое содержание оксидов в газотермических покрытиях из бронзы БрКМц3-1 связано с образованием в поверхностных слоях распыляемых бронзовых капель тонкой пленки оксида кремния  $SiO_2$  за счет более высокого сродства кремния к кислороду по сравнению с медью [10], [11]. Образовавшаяся оксидная пленка из  $SiO_2$  на поверхности бронзовых частиц предотвращает их глубокое окисление и формирование большого объема оксидов меди.

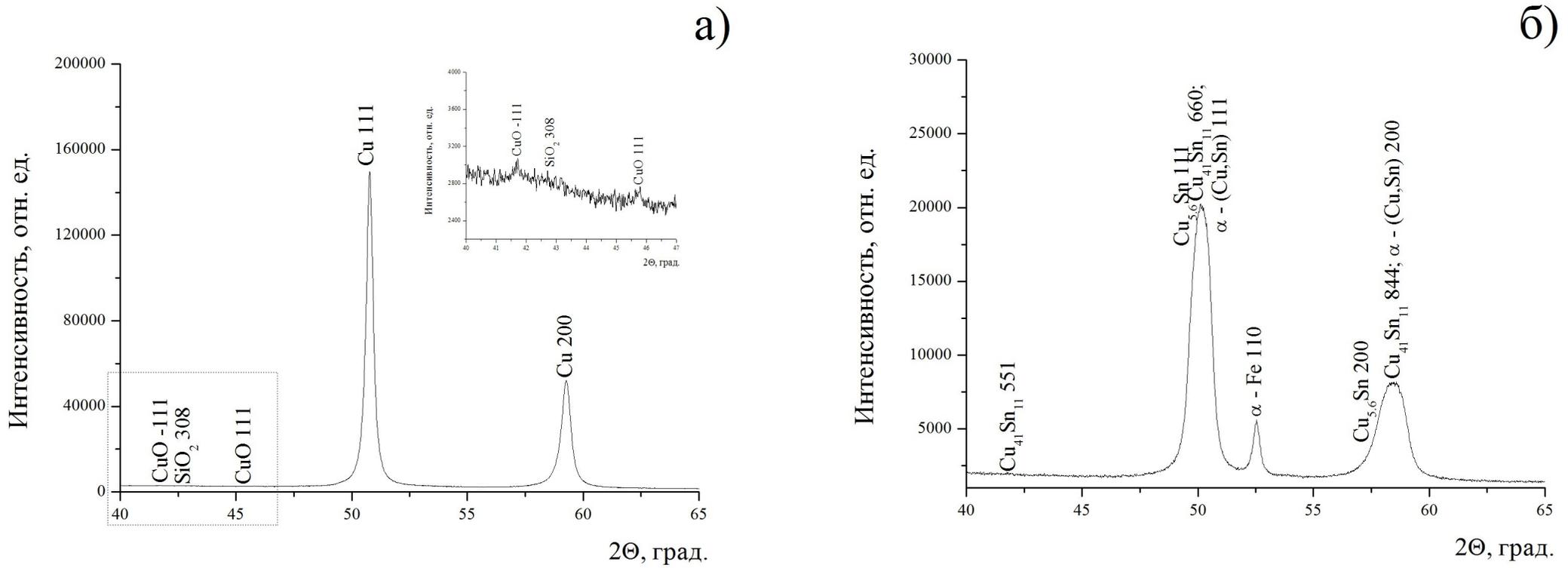


Рисунок 2 - Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK $\alpha$ ) от поверхностных слоев антифрикционных покрытий на основе меди, полученных методом высокоскоростного напыления бронзы БрКМц3-1 (а) и методом центробежной индукционной направки бронзы БрОФ10-1 (б)  
DOI: <https://doi.org/10.18454/ENGIN.2024.2.2.3>

Твердость напыленного газотермического покрытия из бронзы БрКМц3-1 составляет 80 HV 1, а твердость наплавленного покрытия из бронзы БрОФ10-1 – 135-140 HV 1. Повышенные значения твердости наплавленного покрытия обусловлены наличием в его фазовом составе твердого раствора Sn в меди, интерметаллидных соединений, а также присутствием  $\alpha$ -Fe (рисунок 2, б).

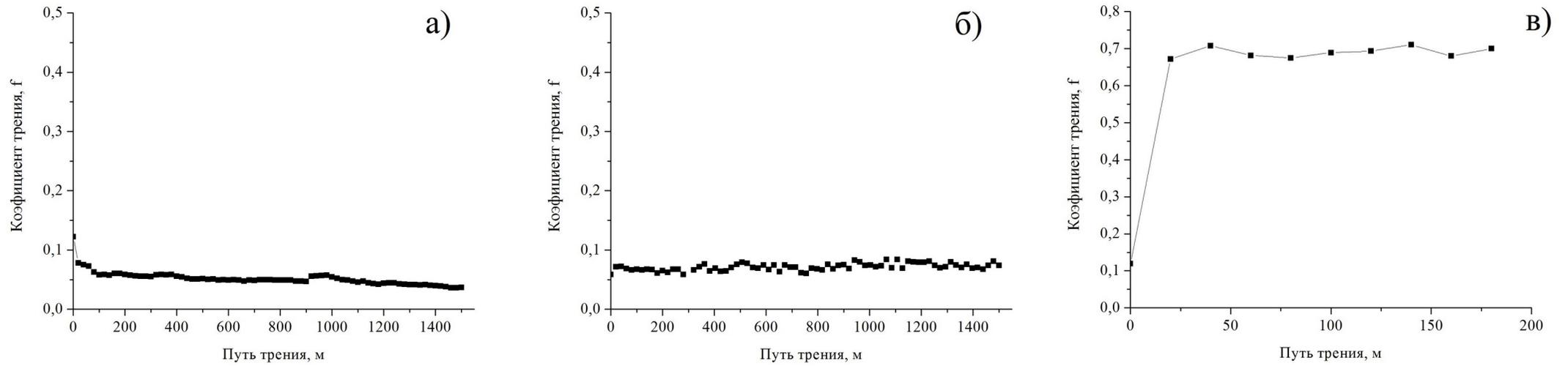


Рисунок 3 - Зависимости коэффициентов трения для наплавленных покрытий из бронзы БрОФ10-1 от пути трения в различных условиях испытаний:  
 а – со смазочным материалом И-20А; б – со смазочным материалом Литол-24; в – без смазочного материала  
 DOI: <https://doi.org/10.18454/ENGIN.2024.2.2.4>

Примечание:  $p = 5 \text{ МПа}$

Результаты триботехнических испытаний антифрикционных покрытий на основе меди представлены на рисунках 3, 4 и в таблице 2.

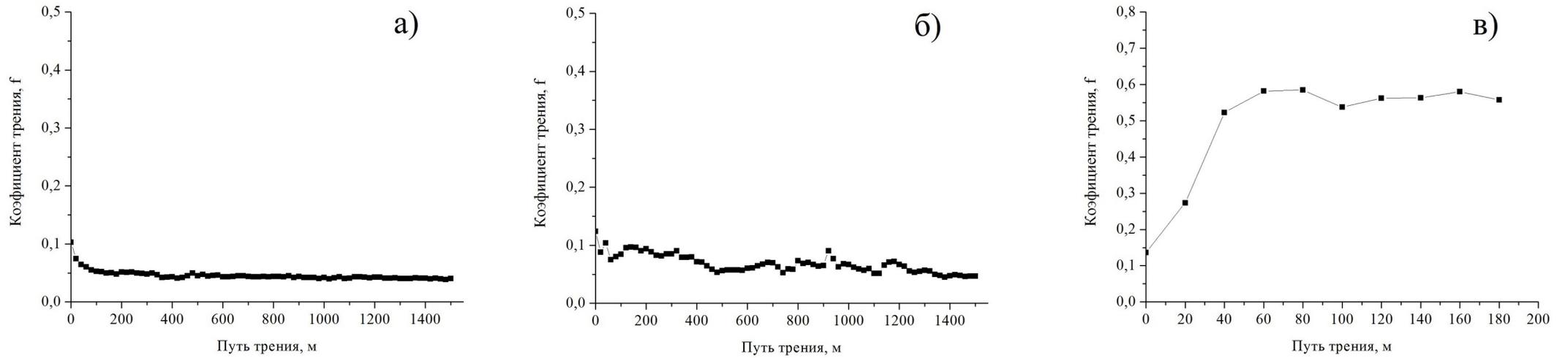


Рисунок 4 - Зависимости коэффициентов трения для газотермических покрытий из бронзы БрКМц3-1 от пути трения в различных условиях испытаний:  
 а – со смазочным материалом И-20А; б – со смазочным материалом Литол-24; в – без смазочного материала  
 DOI: <https://doi.org/10.18454/ENGIN.2024.2.2.5>

Примечание:  $p = 5$  МПа

Таблица 2 - Интенсивность линейного изнашивания и коэффициенты трения антифрикционных покрытий на основе меди в различных условиях испытаний

DOI: <https://doi.org/10.18454/ENGIN.2024.2.2.6>

Материал покрытий	Давление испытаний Р, МПа	Интенсивность линейного изнашивания $I_h$ / Коэффициент трения, $f$					
		И-20А		Литол-24		Сухое трение	
		$I_h, \times 10^{-10}$	$f$	$I_h, \times 10^{-10}$	$f$	$I_h, \times 10^{-7}$	$f$
Наплавка БрОФ10-1	2	2,10	0,06-0,07	2,25	0,07-0,08	2,35	0,60-0,70
	5	4,50	0,06-0,07	5,25	0,07-0,08	9,55	0,60-0,70
	10	7,15	0,06-0,07	10,30	0,07-0,08	20,30	0,60-0,70
ГТП БрКМц3-1	2	4,35	0,05-0,06	4,85	0,06-0,08	2,45	0,55-0,60
	5	8,10	0,05-0,06	8,75	0,06-0,08	4,20	0,55-0,60
	10	11,60	0,05-0,06	16,60	0,06-0,08	14,20	0,55-0,60

Из представленных результатов триботехнических испытаний в смазочных материалах И-20А и Литол-24 можно видеть, что наплавленное покрытие из бронзы БрОФ10-1 имеет в  $\approx 1,5-2,0$  раза более высокую износостойкость по сравнению с напыленным покрытием из бронзы БрКМц3-1 (таблица 2). При этом коэффициенты трения покрытий приблизительно одинаковы и составляют 0,05-0,07 при испытаниях в масле И-20А и 0,06-0,08 в смазочном материале Литол-24 (таблица 2, рисунок 3, 4). В условиях сухого трения при удельной нагрузке 2 МПа интенсивность линейного изнашивания напыленного и наплавленного покрытий приблизительно одинаковы (таблица 2). Вместе с тем, при испытаниях в условиях сухого трения при повышенных удельных давлениях 5 и 10 МПа износостойкость газотермического покрытия в  $\approx 1,5-2,0$  раза выше износостойкости наплавленного покрытия из бронзы БрОФ10-1 (таблица 2). При этом, коэффициент трения наплавленного покрытия из бронзы БрОФ10-1 в условиях сухого трения составляет 0,60-0,70, а напыленного покрытия из бронзы БрКМц3-1 – 0,55-0,60 (таблица 2, рисунок 3, 4). Таким образом интенсивность изнашивания и коэффициент трения для напыленного покрытия из бронзы БрКМц3-1 существенно ниже, чем у наплавленного слоя из бронзы БрОФ10-1, имеющего более высокую твердость. Пониженные значения коэффициента трения газотермического покрытия и его более высокая износостойкость могут быть связаны с наличием в нем оксидов меди  $CuO$  и кремния  $SiO_2$ , выступающих в качестве твердой смазки при сухом трении. Кроме этого, необходимо отметить, что в результате сухого трения покрытий происходит повышение микротвердости их поверхностных слоев (таблица 3), что обусловлено повышенной плотностью дислокаций, образующихся в покрытиях в процессе трения. О повышении плотности дислокаций в поверхностных слоях антифрикционных покрытий после триботехнических испытаний свидетельствует также возрастание значений физического уширения дифракционных линий  $Cu\ 111$  и  $Cu\ 222$  (таблица 3). При этом величина отношения  $\beta_{222}/\beta_{111}$  соответствует соотношению  $tg\theta_{222}/tg\theta_{111}$  (таблица 4), что указывает на увеличение плотности линейных дефектов кристаллической решетки при трении. Незначительное понижение значений соотношения  $tg\theta_{222}/tg\theta_{111}$  для матричной фазы  $Cu$  покрытий из бронзы БрКМц3-1, испытанных при 2 и 5 МПа, свидетельствует о начальных стадиях формирования ячеистых дислокационных субструктур при трении с высоким удельным давлением.

Таблица 3 - Микротвердость антифрикционных покрытий и физическое уширение дифракционных линий  $Cu\ 111$  и  $Cu\ 222$  в исходном состоянии и после сухого тренияDOI: <https://doi.org/10.18454/ENGIN.2024.2.2.7>

Материал покрытия	Воздействие на поверхность	Микротвердость, HV 0,025	Физическое уширение линий $\beta, 10^{-3}$ рад	
			$Cu\ 111$	$Cu\ 222$
ГТП БрКМц3-1	Исходное состояние	145	4,00	14,16
	Сухое трение при 2 МПа	165	7,63	24,28
	Сухое трение при 5 МПа	180	7,52	24,23
Наплавка БрОФ10-1	Исходное состояние	200	10,42	36,08
	Сухое трение при 2 МПа	215	16,00	52,75
	Сухое трение при 5 МПа	240	16,12	54,68

Таблица 4 - Отношение углов отражения и физического уширения для дифракционных линий Cu111 и Cu 222 антифрикционных покрытий на основе меди

DOI: <https://doi.org/10.18454/ENGIN.2024.2.2.8>

Материал покрытия	Воздействие на поверхность	$\sec\theta_{222}/\sec\theta_{111}$	$\text{tg}\theta_{222}/\text{tg}\theta_{111}$	$\beta_{222}/\beta_{111}$
ГТП БрКМц3-1	Исходное состояние	1,75	3,50	3,54
	Сухое трение при 2 МПа			3,18
	Сухое трение при 5 МПа			3,22
Наплавка БрОФ10-1	Исходное состояние	1,72	3,42	3,46
	Сухое трение при 2 МПа			3,29
	Сухое трение при 5 МПа			3,27

На основании проведенных исследований можно заключить, что газотермические покрытия напыленные методом высокоскоростной металлизации за счет распыления экономичных промышленных бронзовых проволочных материалов могут быть использованы в качестве антифрикционных материалов в различных условиях трения в широком диапазоне удельных давлений.

#### Заключение

Исследовано структурно-фазовое состояние, твердость и износостойкость антифрикционных покрытий, полученных методом центробежной индукционной наплавки бронзы БрОФ10-1, а также методом высокоскоростной металлизации проволочной бронзы БрКМц3-1. Показано, что сформированные покрытия имеют пониженную пористость, которая не превышает 3-5 об.%. Наплавленное покрытие из бронзы БрОФ10-1 содержит интерметаллидные фазы  $\text{Cu}_{5,6}\text{Sn}$  и  $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$ ,  $\alpha$ -твердый раствор Sn в меди и  $\alpha$ -Fe, а твердость покрытия составляет 135-140 HV 1. Напыленное газотермическое покрытие из бронзы БрКМц3-1 содержит в своем фазовом составе матричную фазу на основе твердого раствора Si и Mn в Cu и небольшое количество оксидов CuO и  $\text{SiO}_2$ , а его твердость составляет 80 HV 1. Сделан вывод, что пониженное содержание оксидов меди в газотермическом покрытии связано с раскисляющим действием кремния, входящего в состав напыляемой бронзовой проволоки. В результате триботехнических испытаний антифрикционных покрытий на основе меди было установлено, что наплавленное покрытие из бронзы БрОФ10-1 при трении в смазочных материалах И-20А и Литол-24 имеет в  $\approx 1,5$ -2,0 раза более высокую износостойкость по сравнению с напыленным покрытием из бронзы БрКМц3-1. Относительно низкая интенсивность изнашивания покрытия из бронзы БрОФ10-1 обусловлена его высокой твердостью вследствие присутствия в фазовом составе покрытия интерметаллидных соединений  $\text{Cu}_{5,6}\text{Sn}$  и  $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$ ,  $\alpha$ -твердого раствора Sn в меди и  $\alpha$ -Fe. В то же время в условиях трения без смазочного материала, износостойкость твердого наплавленного покрытия БрОФ10-1 в  $\approx 1,5$ -2,0 раза ниже износостойкости напыленного покрытия из бронзы БрКМц3-1. При этом коэффициент трения наплавленного покрытия из бронзы БрОФ10-1 в условиях сухого трения составляет 0,60-0,70, а напыленного покрытия из бронзы БрКМц3-1 – 0,55-0,60. Сделано заключение, что пониженный коэффициент трения и повышенная износостойкость в условиях трения без смазочного материала напыленного покрытия связаны с наличием в нем частиц оксидов меди CuO и кремния  $\text{SiO}_2$ , которые в условиях сухого трения выступают в качестве твердого смазочного материала, предотвращающего адгезионное схватывание элементов пары трения.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

#### Список литературы / References

1. Филиппов М.А. Трение и антифрикционные материалы / М.А. Филиппов, О.Ю. Шешуков. — 2021. — 204 с. — URL: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/105769> (дата обращения: 23.01.2024)

2. Колесников В.И. Исследование новых материалов триботехнического назначения / В.И. Колесников, Ю.Ф. Мигаль, А.П. Сычев // Труды южного научного центра Российской академии наук. — 2022. — Т.10. — С. 179-186. — DOI: 10.23885/1993-6621-2022-10-179-186
3. Бирюков В.П. Влияние содержания упрочняющей фазы на триботехнические характеристики спеченных материалов / В.П. Бирюков // Современные проблемы теории машин — 2022. — № 13. — С. 15-18. — DOI: 10.26160/2307-342X-2022-13-15-18
4. Комаров А.И. Формирование триботехнических покрытий Al-Cu с функциональными добавками методом центробежной индукционной наплавки / А.И. Комаров, Д.В. Орда, И.А. Сосновский [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2022. — №2. — С. 54-61. — DOI: 10.46864/1995-0470-2022-2-59-54-61
5. Русин Н.М. Спеченный композиционный материал на основе меди. патент. RU 2061581 / Н.М. Русин, А.И. Турова. — URL: <https://www.freepatent.ru/patents/2112068> (дата обращения: 23.01.2024)
6. Шайтура Д.С. Композиты, армированные квазикристаллическими частицами Al-Cu-Fe, с медной матрицей и их трибологические свойства / Д.С. Шайтура, А.А. Теплов, Е.А. Чикина // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2010. — №11. — С. 87-91. — URL: <https://www.crys.ras.ru/rsne/rsne-2009/rsnereports2009.html> (дата обращения: 23.01.2024)
7. Белоцерковский М.А. Технологии активированного газопламенного напыления анти-фрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. — 2004. — 200 с. — URL: <https://koha.lib.tsu.ru/cgi-bin/koha/opac-MARCdetail.pl?biblionumber=503249> (дата обращения: 23.01.2024)
8. Кононов А.Г. Ионно-модифицированные субмикроструктурные титановые и циркониевые сплавы для медицины и механики / А.Г. Кононов, В.А. Кукареко, А.В. Белый [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2013. — № 1 (22). — С. 47-53. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20180599> (дата обращения: 23.01.2024)
9. Astrashab E.V. Effect of Heat Treatment on the Structure, Phase Composition, and Wear Resistance of Thermal Spray Coatings of the Pseudoalloy 08G2S+AK12 / E.V. Astrashab, A.N. Grigorchik, V.A. Kukareko [et al.] // Journal of Friction and Wear. — 2020. — Vol. 41. — №1. — P. 6-11. — DOI: 10.3103/S1068366620010031
10. Гасик М.И. Теория и технология электрометаллургии ферросплавов / М.И. Гасик, Н.П. Лякишев. — 1999. — 764 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000614913> (дата обращения: 23.01.2024)
11. Абрамович В.Р. Сварка плавлением меди и сплавов на медной основе / В.Р. Абрамович, В.П. Демянцевич, Л.А. Ефимов. — 1988. — 215 с. — URL: <https://themechanic.ru/svarka-plavleniem-medi-i-splavov> (дата обращения: 23.01.2024)

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Filippov M.A. Trenie i antifrikcionnye materialy [Friction and Antifriction Materials] / M. A. Filippov, O. Yu. Sheshukov. — 2021. — 204 p. — URL: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/105769> (accessed: 23.01.2024) [in Russian]
2. Kolesnikov V.I. Issledovanie novyh materialov tribotekhnicheskogo naznacheniya [Research of New Materials for Tribotechnical Purposes] / V.I. Kolesnikov, Yu.F. Migal, A.P. Sychev // Trudy yuzhnogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk [Proceedings of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. — 2022. — Vol.10. — P. 179-186. — DOI: 10.23885/1993-6621-2022-10-179-186 [in Russian]
3. Biryukov V.P. Vliyanie sodержaniya uprochnyayushchej fazy na tribotekhnicheskie harakteristiki spechennyh materialov [Influence of the Content of the Strengthening Phase on the Tribological Characteristics of Sintered Materials] / V.P. Biryukov // Sovremennye problemy teorii mashin [Modern Problems of Machine Theory]. — 2022. — № 13. — P. 15-18. — DOI: 10.26160/2307-342X-2022-13-15-18 [in Russian]
4. Komarov A.I. Formirovanie tribotekhnicheskikh pokrytij Al-Cu s funkcional'nymi dobavkami metodom centrobezhnoj indukcionnoj naplavki [Formation of Tribological Al-Cu Coatings with Functional Additives Using the Method of Centrifugal Induction Surfacing] / A.I. Komarov, D.V. Orda, I.A. Sosnovsky [et al.] // Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials]. — 2022. — № 2. — P. 54-61. — DOI: 10.46864/1995-0470-2022-2-59-54-61 [in Russian]
5. Rusin N.M. Spechennyj kompozicionnyj material na osnove medi [Sintered Copper-Based Composite Material]. Patent. RU 2061581 / N.M. Rusin, A.I. Turov. — URL: <https://www.freepatent.ru/patents/2112068> (accessed: 23.01.2024) [in Russian]
6. Shaitura D.S. Kompozity, armirovannye kvazikristallicheskimy chasticami Al-Cu-Fe, s mednoj matricej i ih tribologicheskie svojstva [Composites Reinforced with Quasicrystalline Al-Cu-Fe Particles with a Copper Matrix and Their Tribological Properties] / D.S. Shaitura, A.A. Teplov, E.A. Chikina // Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovaniya [Surface. X-ray, Synchrotron and Neutron Studies]. — 2010. — № 11. — P. 87-91. — URL: <https://www.crys.ras.ru/rsne/rsne-2009/rsnereports2009.html> (accessed: 23.01.2024) [in Russian]
7. Belotserkovsky M.A. Tekhnologii aktivirovannogo gazoplamnogo napyleniya anti-frikcionnyh pokrytij [Technologies of Activated Flame Spraying of Anti-friction Coatings] / M.A. Belotserkovsky. — 2004. — 200 p. — URL: <https://koha.lib.tsu.ru/cgi-bin/koha/opac-MARCdetail.pl?biblionumber=503249> (accessed: 23.01.2024) [in Russian]
8. Kononov A.G. Ionno-modifitsirovannye submikrokristallicheskie titanovye i cirkonievye splavy dlya mediciny i mekhaniki [Ion-modified Submicrocrystalline Titanium and Zirconium Alloys for Medicine and Mechanics] / A.G. Kononov, V.A. Kukareko, A.V. Bely et al. // Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials]. — 2013. — № 1 (22). — P. 47-53. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20180599> (accessed: 23.01.2024) [in Russian]
9. Astrashab E.V. Effect of Heat Treatment on the Structure, Phase Composition, and Wear Resistance of Thermal Spray Coatings of the Pseudoalloy 08G2S+AK12 / E.V. Astrashab, A.N. Grigorchik, V.A. Kukareko [et al.] // Journal of Friction and Wear. — 2020. — Vol. 41. — №1. — P. 6-11. — DOI: 10.3103/S1068366620010031

10. Gasik M.I. Teoriya i tekhnologiya elektrometallurgii ferrosplavov [Theory and Technology of Electrometallurgy of Ferroalloys] / M.I. Gasik, N.P. Lyakishev. — 1999. — 764 p. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000614913> (accessed: 23.01.2024) [in Russian]
11. Abramovich V.R. Svarka plavlениem medi i splavov na mednoj osnove [Melting Welding of Copper and Copper-based Alloys] / V.R. Abramovich, V.P. Demyantsevich, L.A. Efimov. — 1988. — 215 p. - URL: <https://themechanic.ru/svarka-plavlениem-medi-i-splavov> (accessed: 23.01.2024) [in Russian]