



МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.793:669.717

А.И. КОМАРОВ, канд. техн. наук

заведующий лабораторией технологий модифицирования конструкционных материалов¹

E-mail: al_kom@tut.by

Д.В. ОРДА

научный сотрудник лаборатории технологий модифицирования конструкционных материалов¹

E-mail: dmitry_orda@mail.ru

И.А. СОСНОВСКИЙ

старший научный сотрудник лаборатории газотермических методов упрочнения деталей машин¹

E-mail: sos3@tut.by

А.А. КУРИЛЁНОК, канд. техн. наук

старший научный сотрудник лаборатории газотермических методов упрочнения деталей машин¹

E-mail: akto13@mail.ru

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

Поступила в редакцию 23.02.2022.

ФОРМИРОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ Al-Cu С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ДОБАВКАМИ МЕТОДОМ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ

В статье представлены результаты металлографических и триботехнических исследований композиционных покрытий на основе алюминия с высоким содержанием меди, сформированных на внутренней поверхности заготовки методом центробежной индукционной наплавки (ЦИН). Согласно результатам исследования, при содержании в покрытии меди более 40 масс.% формируется композиционная структура на основе θ -фазы (Al_2Cu) с включениями зерен τ -фазы (Cu_3NiAl_6), частицами кремния, олова и железосодержащих фаз. Данная структура обладает высокой твердостью и близким к стали параметром коэффициента термического линейного расширения, благодаря чему покрытие не отслаивается от стальной основы. Показано также, что олово, введенное в расплав, не образует интерметаллидных соединений и выделяется в чистом виде, выступая в роли твердой смазки и обеспечивая снижение коэффициента трения до 0,03 при нагрузках до 20 МПа.

Ключевые слова: сплав Al-Cu, кремний, олово, индукционная наплавка, втулка, металлографический анализ, твердость, коэффициент трения

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-2-59-54-61>

Введение. Одним из известных и перспективных технологических приемов получения бесшовных подшипников скольжения является центробежная индукционная наплавка. Примером реализации данной технологии является комбинированная втулка системы «сталь — бронза» [1, 2]. Благодаря близким физико-термическим свойствам (коэффициент тер-

мического линейного расширения (КТЛР) для стали 20 — $14,1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, для бронзы — $18,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [3, 4]), на границе раздела фаз «сталь — бронза» формируется низкий уровень термических напряжений, а наличие областей взаимного растворения основных элементов обеспечивает насыщение приграничного слоя бронзы железом, дополнительно

снижая напряжения, что обеспечивает высокий уровень адгезионных свойств покрытия медного сплава и стальной основы [5, 6].

Однако, обладая высокими показателями прочности, нагрузочной способности и триботехническими характеристиками, изделия с покрытиями из бронз имеют высокую стоимость [7–10]. Альтернативным материалом покрытий выступают алюминиевые сплавы, которые дешевле, широко используются в машиностроении, имеют высокую удельную прочность и коррозионную стойкость, не дефицитны, а также обладают высокой технологичностью, что облегчает их применение на производстве.

На данный момент разработан широкий класс материалов триботехнического назначения на основе алюминиевых сплавов, высокий уровень свойств которых достигается легированием (Sn, Zn и др.) или модифицированием структуры сплава. Основная проблема проектирования комбинированных деталей с алюминиевым слоем заключается в низком уровне адгезии между алюминиевым сплавом и сталью, который обусловлен различием теплофизических свойств (КТЛР алюминиевых сплавов $20\text{--}26 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) [3, 4, 10], наличием оксидных пленок и возникновением диффузионных процессов на границе раздела соединений. Одним из способов повышения адгезии между алюминиевым покрытием и стальным основанием является формирование наплавленного слоя с композиционной структурой, насыщенной включениями. Анализ данных [11, 12] показал, что композиционные сплавы на основе системы Al-Si-Cu обладают пониженным КТЛР. Так при введении в сплав 20–30 масс.% кремния обеспечивается снижение КТЛР до значений $16\text{--}18 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, однако присутствующие в структуре крупные частицы первичного кремния негативно сказываются на триботехнических свойствах материала. При этом аналогичное воздействие оказывает легирование алюминиевого сплава медью за счет образования интерметаллидов типа Al_xCu_y . Еще больший эффект дает комплексное легирование алюминия кремнием и медью, которое обеспечивает снижение КТЛР до значений $8\text{--}10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и его стабилизацию в диапазоне температур до 500 °С. При этом следует отметить, что воздействие на КТЛР также оказывает дисперсность структуры, которая может быть достигнута ускоренным охлаждением или модифицированием. Так, соглас-

но данным [12], увеличение скорости охлаждения расплава обеспечивает снижение КТЛР сплавов Al-Si-Cu.

Из указанного выше следует, что комплексное легирование алюминиевого сплава и управление технологическими параметрами кристаллизации сплава покрытия позволяет управлять величиной КТЛР, что обеспечивает низкий уровень напряжений на границе раздела фаз.

В Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси разработана технология наплавки покрытий на внутреннюю поверхность детали методом ЦИН [13–17]. В процессе наплавки происходит полное расплавление шихтового материала с образованием единого расплава, что позволяет формировать сплав необходимого состава и проводить его модифицирование непосредственно в процессе наплавки.

Цель данной работы состоит в оценке возможности обеспечения высоких адгезионных и трибомеханических свойств наплавляемого методом ЦИН покрытия на алюминиевой основе за счет насыщения его интерметаллидными соединениями алюминия и меди, кремнием и кремнийсодержащими фазами.

Материалы и методы испытаний. В качестве материалов, на основе которых формировалось композиционное покрытие, использовались алюминий-кремниевый сплав АК12 (ГОСТ 1583-93) и самофлюсующийся порошок на основе меди ПР-БрОл8НСР (ГОСТ 28377-89). Составы сплавов приведены в таблице 1.

Адгезия покрытия к стальной основе достигалась путем формирования композиционной структуры, наполненной включениями кремния и интерметаллидных фаз. Количество материалов в шихте рассчитывалось для получения покрытия толщиной 4–5 мм.

Покрытие на внутренней поверхности цилиндрической стальной заготовки из стали 20 (ГОСТ 1050-2013) наплавлялось путем центробежного формования шихты, состоящей из сплава АК12, самофлюсующегося порошка ПР-БрОл8НСР и покровного флюса (таблица 2) в количестве 5% от массы наплавляемого сплава.

Нагрев производился ступенчато до температуры 800–820 °С при скорости вращения 1500 мин⁻¹. После достижения заданных параметров процесса производилась изотермическая выдержка в течение 5 мин с последующим динамическим охлаждением до температуры 500–550 °С.

Таблица 1 — Состав сплавов
Table 1 — Alloy composition

Сплав	Химический состав, масс. %							
	Si	Fe	Cu	Mn	Ti	Mg	Zn	Al
АК12	12,1	0,18	0,05–0,15	0,2–0,4	<0,01	0,08	<0,004	ост.
	Si	Fe	Cu	B	Sn	Ni	Cr	C
ПР-БрОл8НСР	0,8	<2,0	ост.	0,6	8,0	4,8	—	—

Таблица 2 — Состав покровного флюса (масс.%)
Table 2 — Covering flux composition (wt.%)

KCl	NaCl	NaF	Na ₃ AlF ₆
10	50	30	10

ЦИН осуществлялась на оборудовании, включающем генератор токов высокой частоты (ТВЧ) типа ЛПЗ-2-67М, мощностью 60 кВт, частотой 66 кГц, рамочный дугообразный индуктор, программный регулятор ТРМ 151 (ООО «Овен»), инфракрасный пирометр TemPro-2200 и установку центробежной индукционной наплавки (конструкции Объединенного института машиностроения НАН Беларуси) с регулируемой частотой вращения. Время нагрева контролировалось электронным секундомером ИВР-203М ТУ 4282-001-33865949-2009. Схема наплавки представлена на рисунке 1.

Структурно-фазовое состояние полученных образцов и поверхностей трения исследовали с помощью металлографического микроскопа МИМ-8 и сканирующего электронного микроскопа VegaТeskan (Чехия). Микротвердость композиционного покрытия измеряли на приборе ПМТ-3 (Россия) при нагрузках 0,196 и 0,49 Н.

Адгезионную прочность нанесенного покрытия к стальной основе оценивали методом сдвига с использованием универсальной гидравлической машины INSTRONSatеc 300LX. Испытания проводились путем выдавливания алюминиевой оболочки из стальной втулки. Скорость нагружения составляла 5 мм/мин. Прочность сцепления σ_a рассчитывалась по известному значению силы отрыва P_o (регистрировалась испытательной машиной) и параметрам исходной заготовки d и h :

$$\sigma_a = P_o / F = P_o / \pi d h,$$

где F — площадь контакта покрытия с основанием, которая была определена как произведение окружности стальной заготовки πd и высоты h испытательной втулки.

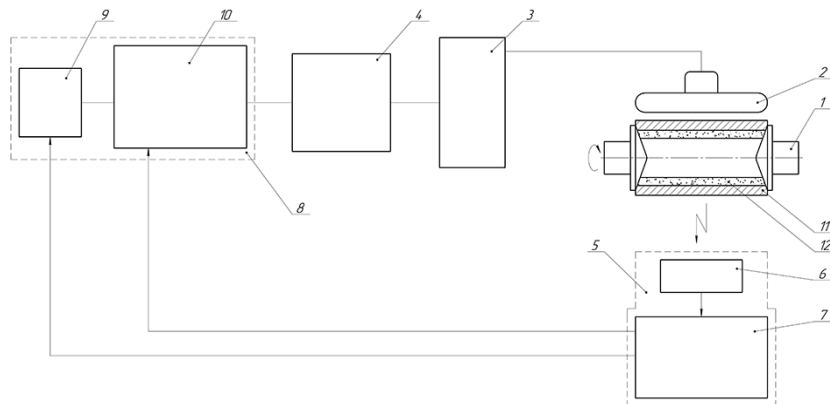


Рисунок 1 — Схема индукционной наплавки образцов: 1 — зажимные центры; 2 — рамочный дугообразный индуктор; 3 — источник нагрева; 4 — регулятор мощности; 5 — система измерения температуры; 6 — первичный пирометрический преобразователь; 7 — вторичный измерительный преобразователь; 8 — контроллер температурных режимов; 9 — цифровой преобразователь программатора; 10 — блок согласования; 11 — заготовка; 12 — наплавляемая порошковая шихта
Figure 1 — Scheme of induction surfacing of samples: 1 — clamping centers; 2 — frame arc-shaped inductor; 3 — heating source; 4 — power regulator; 5 — temperature measurement system; 6 — primary pyrometric converter; 7 — secondary measuring converter; 8 — temperature mode controller; 9 — digital programmer converter; 10 — matching unit; 11 — blank; 12 — surfaced powder charge

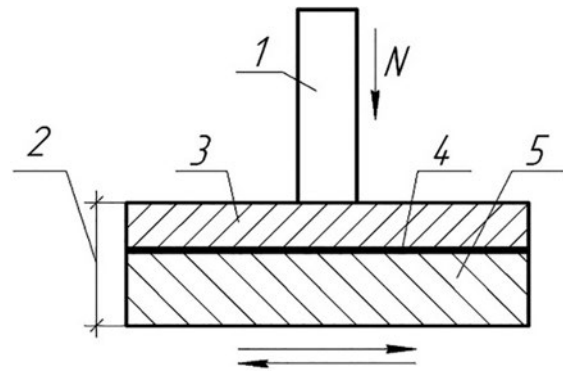


Рисунок 2 — Схема трибологических испытаний образцов: N — нагрузка; 1 — контртело; 2 — образец; 3 — композиционное покрытие; 4 — переходный слой железосодержащих включений; 5 — стальная основа

Figure 2 — Scheme of tribological tests of samples: N — load; 1 — counterbody; 2 — sample; 3 — composite coating; 4 — transition layer of iron-containing inclusions; 5 — steel base

Триботехнические испытания образцов проводили на многофункциональном трибометре MFT-5000 (Rtec Instruments, США) по схеме возвратно-ступательного перемещения образца 2 (рисунок 2) относительно неподвижного стального контртела 1. Контртелом служила торцевая поверхность цилиндра, изготовленного из стали 100Cr6 (твердость 60–62 HRC), диаметром 3 мм. Триботехнические испытания покрытия проводились после механической обработки образцов покрытий. Испытания проводились при нагрузках 40, 80 и 120 Н. Амплитуда движения составляла 5 мм, а частота — 10 Гц. Продолжительность испытаний в нагруженном состоянии составила 2 ч. По результатам испытаний определялся коэффициент трения f .

Результаты исследований и их обсуждение.
Результаты металлографических исследований. Анализ структуры наплавленного покрытия показал, что при полном расплавлении шихтового материала происходит диффузионное перемешивание компонентов шихты с образованием алюминий-медного сплава, легированного кремнием,

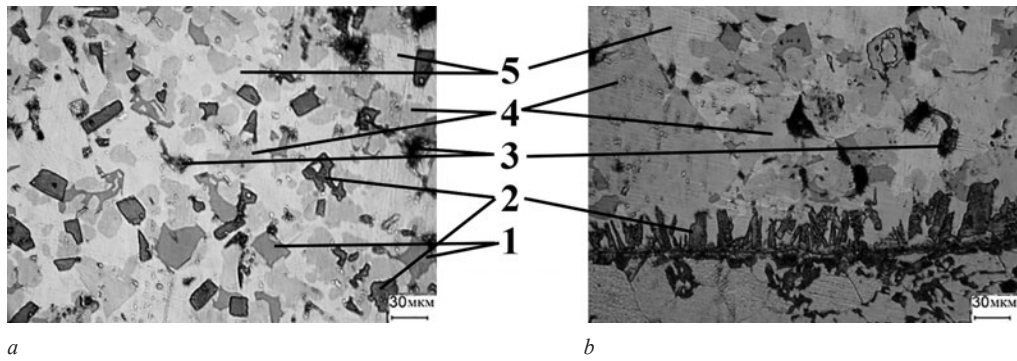


Рисунок 3 — Структура наплавленного покрытия Cu45Al41Si6Sn4Ni3 в середине слоя (a) и границы раздела фаз со стальной втулкой (b): 1 — Si; 2 — (Fe, Al, Si); 3 — Sn; 4 — τ -фаза (Cu_3NiAl_6); 5 — θ -фаза (Al_2Cu)
 Figure 3 — Structure of the deposited Cu45Al41Si6Sn4Ni3 coating in the middle of the layer (a) and the phase interface with the steel sleeve (b): 1 — Si; 2 — (Fe, Al, Si); 3 — Sn; 4 — τ -phase (Cu_3NiAl_6); 5 — θ -phase (Al_2Cu)

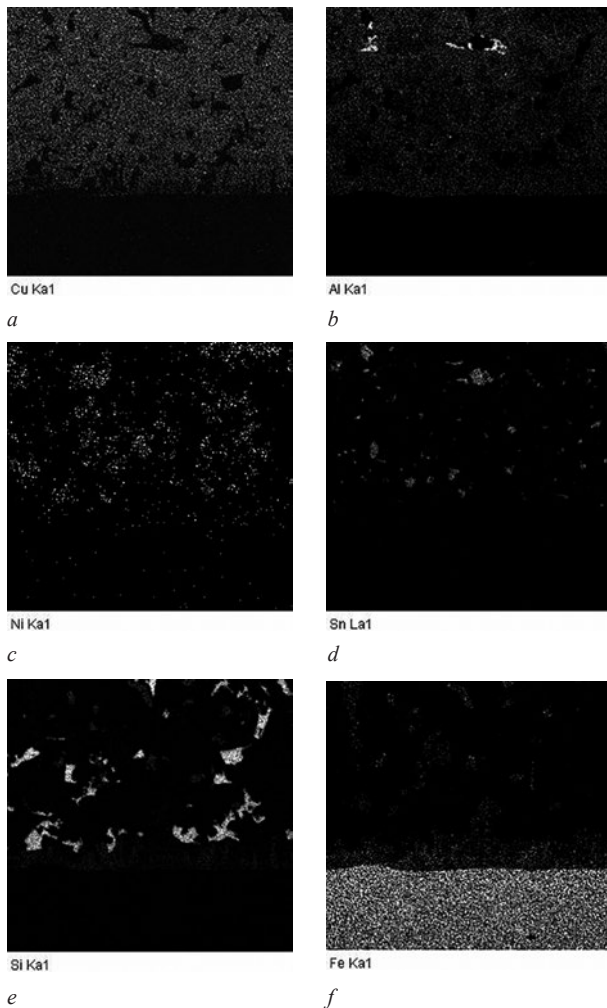


Рисунок 4 — Карты распределения основных химических элементов в покрытии
 Figure 4 — Distribution maps of the main chemical elements in the coating

никелем и оловом. При этом, в зависимости от количества вводимого порошка самофлюсующейся бронзы, изменяется матрица композиционного сплава. Так, при содержании меди в составе шихты (40–45 масс.%) основу сплава составляет θ -фаза (Al_2Cu) с включениями зерен τ -фазы (Cu_3NiAl_6) и частицами кремния, олова, железосодержащих фаз (рисунок 3). Размер включений кремния и оло-

ва не превышает 30 мкм. По мере приближения к стальной основе размер зерен τ -фазы (Cu_3NiAl_6) увеличивается (см. рисунок 3 b), что связано с ликвацией более плотных частиц под действием центробежных сил. При этом на поверхности стальной втулки формируется зона столбчатых частиц из железосодержащих соединений.

Согласно данным микрорентгеноспектрального анализа, включения равномерно распределены по структуре слоя (рисунок 4) за исключением зерен τ -фазы (Cu_3NiAl_6), размер которых возрастает к границе раздела фаз. Олово и кремний выделяется в форме частиц неправильной формы (см. рисунки 4 d, e), тогда как никель (см. рисунок 4 c) участвует в образовании зерен τ -фазы (Cu_3NiAl_6).

Более детальный спектральный анализ подтвердил наличие включений олова, железосодержащих включений (рисунок 5 (спектры 9–11), таблица 3), а также частиц кремния (см. рисунок 5 (спектры 6–8), таблицу 3). Алюминий при этом в чистом виде не присутствует, поскольку весь расходится на образование θ -фазы.

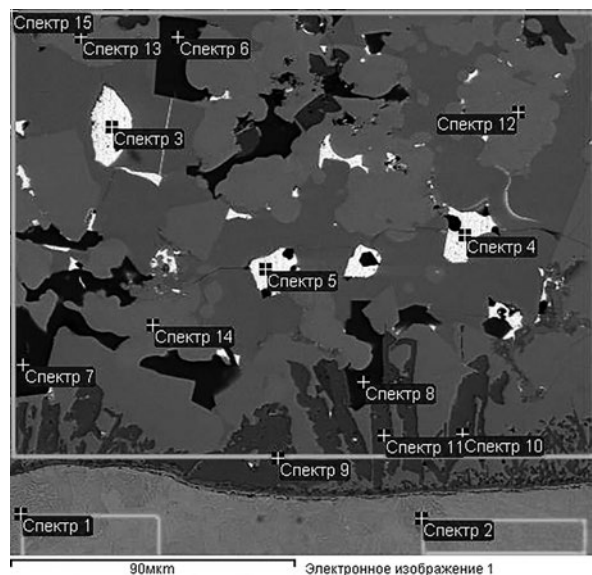


Рисунок 5 — СЭМ-изображение микроструктуры покрытия с участками микрорентгеноспектрального анализа
 Figure 5 — SEM image of the coating microstructure with sections of microrentgenospectral analysis

Таблица 3 — Результаты спектрального анализа границы раздела фаз покрытия и стальной втулки
Table 3 — Results of spectral analysis of the interface of the coating and steel sleeve phases

Спектр	C	O	Al	Si	Mn	Fe	Ni	Cu	Sn
Спектр 1	8,47				0,62	90,92			
Спектр 2	5,25				0,76	93,99			
Спектр 3	5,92		0,57					3,17	90,34
Спектр 4	13,15	5,57	0,48					2,74	78,05
Спектр 5	9,60	3,95						2,85	83,60
Спектр 6	28,81			68,71			0,30	1,14	1,04
Спектр 7	25,04		0,17	72,16		0,41		0,97	1,25
Спектр 8	26,08		0,51	70,68		0,76		0,70	1,29
Спектр 9	23,61	3,61	26,20	15,28		28,69	1,20	1,41	
Спектр 10	23,36		27,41	16,50		30,66	1,12	0,96	
Спектр 11	21,93	3,80	26,53	15,85		29,28	1,57	1,04	
Спектр 12	14,49		29,81	0,41		2,98	11,40	40,91	
Спектр 13	15,29		29,94			1,99	6,95	45,84	
Спектр 14	13,43		30,90	0,38		3,03	12,58	39,69	
Спектр 15	6,21		30,43	15,17		6,77	2,67	34,90	3,85

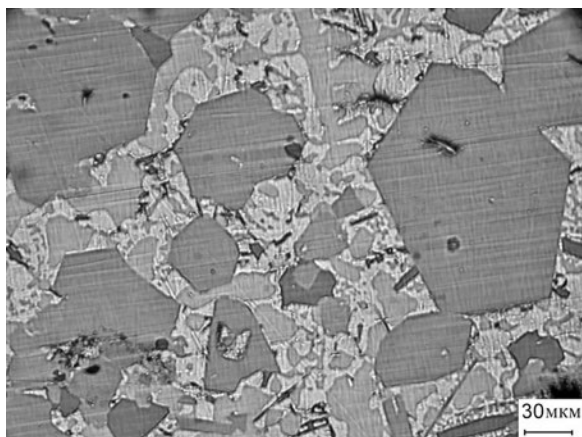


Рисунок 6 — Структура наплавленного покрытия Al60Cu27Si8Sn3Ni2 в середине слоя
Figure 6 — Structure of the deposited coating Al60Cu27Si8Sn3Ni2 in the middle of the layer

При уменьшении доли меди (<30 масс.%) структура покрытия состоит из зерен θ -фазы (CuAl_2), частиц кремния, тройной эвтектики Al-CuAl₂-Si и железосодержащих включений (рисунок 6). Размер железосодержащих включений состава (Fe, Si, Al) изменяется в широком диапазоне значений: от 30 до 120 мкм. Однако данная структура хоть и насыщена интерметаллидными частицами, не обладает необходимыми термофизическими свойствами, это приводит к высокому уровню напряжений в процессе кристаллизации и вызывает образование дефектов и отслаивание покрытия от стальной основы.

Согласно результатам испытаний (представленным далее) подобная структура не обладает высокими триботехническими свойствами. Для улучшения трибологических свойств было принято решение дополнительного введения олова в количестве 12 масс.%, в результате чего его суммарная доля составила 16 масс.%. Анализ

структуры показал, что олово не образует соединений с другими компонентами сплава и выделяется в виде включений от 5 до 60 мкм (рисунок 7) и равномерно распределяется по толщине покрытия.

Результаты дюрометрических исследований.

Анализ структуры покрытия показал, что формируемый сплав Cu45Al41Si6Sn4Ni3 имеет высокую твердость 328–381 HV5, тогда как введение 16% олова приводит к снижению твердости до 190–214 HV5. Анализ микротвердости структурных фаз наплавленного сплава показал, что твердость θ -фазы (Al_2Cu), которая является основной, составляет 4,35–5,22 ГПа, зерен τ -фазы (Cu_3NiAl_6) — 10,3–11,5 ГПа, частиц кремния — 11,6–13,3 ГПа, железосодержащих фаз (Fe, Al, Si) — 6,1–8,5 ГПа, а олово имеет низкую твердость — 0,18–0,25 ГПа.

Результаты триботехнических испытаний.

Испытания образца покрытия Cu45Al41Si6Sn4Ni3 показали, что при нагрузке 120 Н (30 МПа) коэффициент трения равен 0,095–0,120 (рисунок 8, кривая 1). Увеличение доли олова в составе композиционного покрытия Cu39Al35Sn16Si5 обеспечивает повышение триботехнических свойств (см. рисунок 8). Так, при испытаниях образца при нагрузке 120 Н коэффициент трения снижается до 0,070–0,073 (см. рисунок 8, кривая 4), при нагрузке испытаний 80 Н (20 МПа) — до уровня 0,030–0,032, а при 40 Н (10 МПа) наблюдается снижение коэффициента трения до 0,019–0,021 (см. рисунок 8, кривая 2).

Анализ поверхностей трения показал, что даже при добавлении олова в структуру покрытия в процессе трения преобладает окислительно-абразивный механизм изнашивания, который формируется за счет скалывания хрупких фаз (наличие царапин

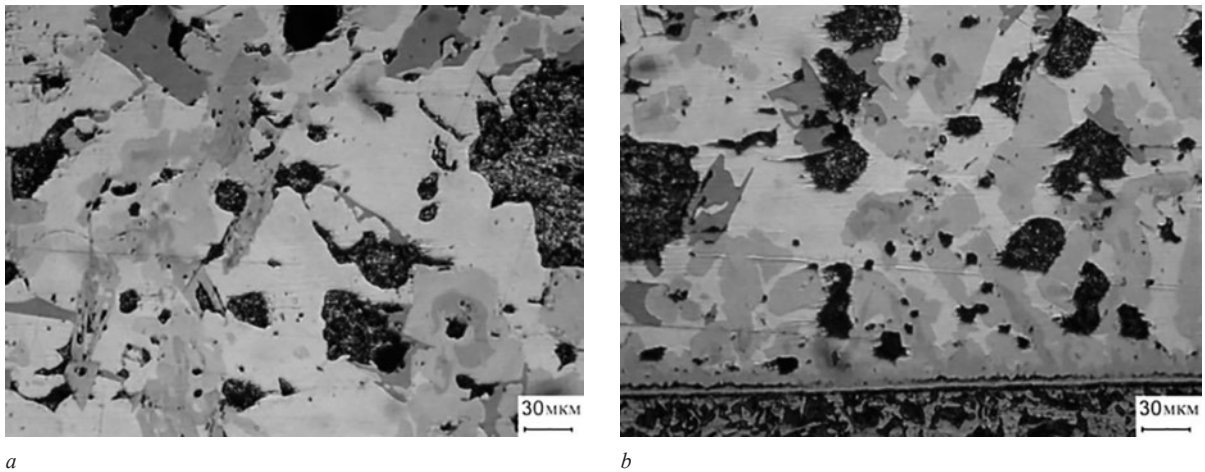


Рисунок 7 — Структура наплавленного покрытия $\text{Cu}_{39}\text{Al}_{35}\text{Sn}_{16}\text{Si}_5$ в середине слоя (a) и у границы раздела фаз со стальной втулкой (b)

Figure 7 — Structure of the deposited coating $\text{Cu}_{39}\text{Al}_{35}\text{Sn}_{16}\text{Si}_5$ in the middle of the layer (a) and at the interface with the steel sleeve (b)

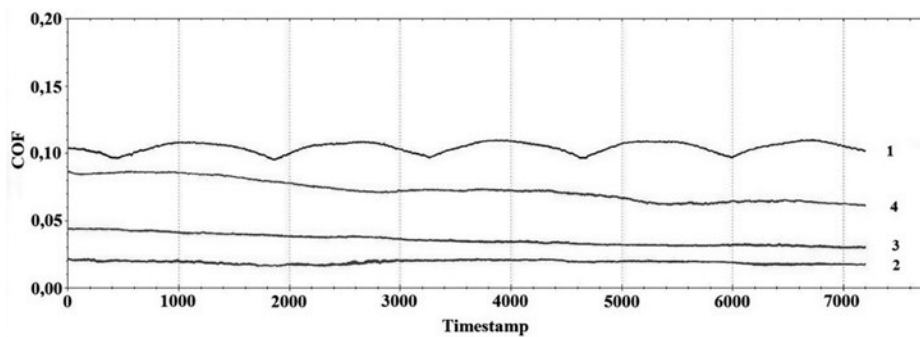


Рисунок 8 — Изменение коэффициента трения в процессе испытаний покрытия из сплава $\text{Cu}_{45}\text{Al}_{41}\text{Si}_6\text{Sn}_4\text{Ni}_3$ (1) и $\text{Cu}_{39}\text{Al}_{35}\text{Sn}_{16}\text{Si}_5$ (2–4) в паре со стальным пальцем при различной нагрузке: 1, 4 — 120 Н; 2 — 40 Н; 3 — 80 Н

Figure 8 — Change in the friction coefficient during testing of the $\text{Cu}_{45}\text{Al}_{41}\text{Si}_6\text{Sn}_4\text{Ni}_3$ (1) and $\text{Cu}_{39}\text{Al}_{35}\text{Sn}_{16}\text{Si}_5$ (2–4) alloy coating paired with a steel pin at different loads: 1, 4 — 120 N; 2 — 40 N; 3 — 80 N

и следов выкрашивания, рисунок 9), однако присутствие достаточного количества олова в зоне контакта обеспечивает снижение коэффициента трения.

Выводы. Анализ структуры покрытий показал, что в процессе наплавки происходит полное расплавление шихтового материала с образованием единого расплава. Присутствие никеля в составе шихты приводит к образованию зерен тройной θ -фазы

(Cu_3NiAl_6) с высокой твердостью 10,3–11,5 ГПа. В процессе наплавки протекает интенсивное растворение железа и насыщение им расплава, в результате чего в структуре покрытия формируются включения (Fe, Al, Si). Следует отметить, что при содержании в составе шихты не менее 50 масс.% бронзового порошка основной структуры сплава является θ -фаза (Al_2Cu). В этом случае не наблюдаются образование

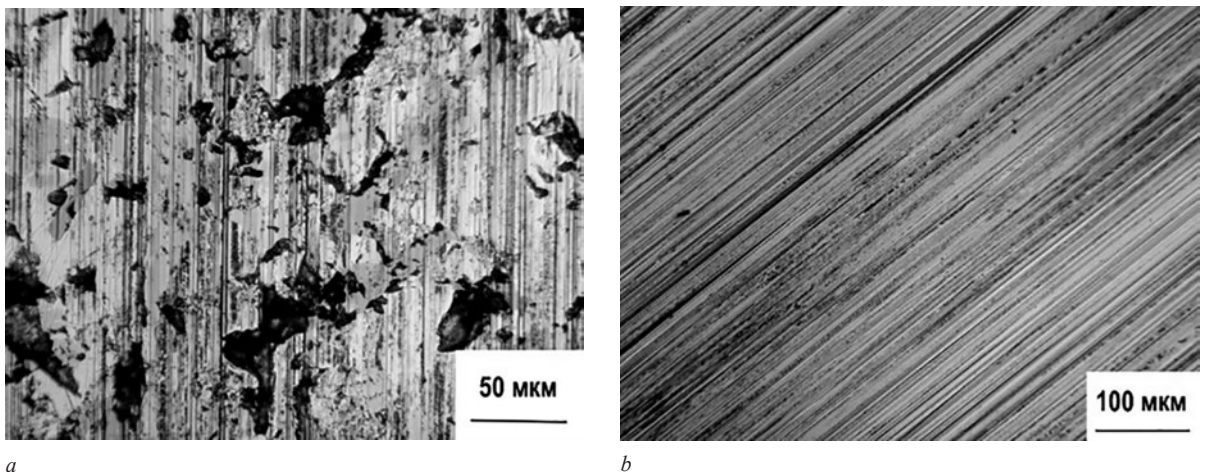


Рисунок 9 — Структура поверхностей трения после испытаний покрытия из сплава $\text{Cu}_{39}\text{Al}_{35}\text{Sn}_{16}\text{Si}_5$ (a) в паре со стальным пальцем (b)

Figure 9 — Structure of friction surfaces after testing of $\text{Cu}_{39}\text{Al}_{35}\text{Sn}_{16}\text{Si}_5$ alloy coating (a) paired with steel pin (b)

трещин на границе со стальной основой и отслоения покрытия. Полученные результаты позволяют заключить, что включение в структуру алюмоматричного покрытия интерметаллидных соединений и кремния является перспективным направлением обеспечения повышенных адгезионных свойств наплавленных на сталь покрытий на основе алюминия.

Триботехнические испытания показали, что покрытия $\text{Cu}_{45}\text{Al}_{41}\text{Si}_6\text{Sn}_4\text{Ni}_3$ имеют композиционную структуру с высокой твердостью (328–381 HV5) и обладают повышенным коэффициентом трения — 0,08–0,10. Введение олова в состав покрытия приводит к некоторому снижению твердости сплава (190–214 HV5) и заметному снижению коэффициента трения до 0,032 при давлении 20 МПа.

Выполнено при финансовой поддержке БРФФИ по договорам № T20M-020 и № T20MC-023.

Список литературы

1. Способ изготовления биметаллических изделий: пат. RU 2017586 С1 / Н.Н. Дорожкин, Л.П. Кашицин, И.А. Сосновский, Ю.Н. Гафо. — Оpubл. 15.08.94.
2. Белявин, К.Е. Индукционный нагрев в процессах центробежного нанесения покрытий / К.Е. Белявин, И.А. Сосновский, А.Л. Худoley // Вестник фонда фундаментальных исследований. — 2013. — № 3(36) — С. 70–87.
3. Материалы в машиностроении. Выбор и применение: в 5 т. / под общ. ред. Кудрявцева И.В. — М.: Машиностроение, 1967. — Т. 1. Цветные металлы и сплавы / под ред. Лужникова Л.П. — 304 с.
4. Материалы в машиностроении. Выбор и применение: в 5 т. / под общ. ред. Кудрявцева И.В. — М.: Машиностроение, 1967. — Т. 2. Конструкционная сталь / под ред. Е.П. Могилевского. — 496 с.
5. Patel, P.S. A Review of tribological and mechanical investigation of aluminum bronze C95500 cast by horizontal centrifugal casting international / P.S. Patel, J.V. Patel // International research journal of engineering and technology, 2019. — Vol. 6, iss. 6. — Pp. 2625–2628.
6. Barron, M.A. Analysis of molten metal distribution in the mold of a horizontal centrifugal casting / M.A. Barron, D.Y. Medina, J. Reyes // Open journal of applied sciences. — 2020. — Vol. 10, no. 7. — Pp. 444–454. — DOI: <https://doi.org/10.4236/ojapps.2020.107031>.
7. Шалунов, Е.П. Пути повышения надежности подшипников скольжения дизель-генераторных установок для аварийного энергоснабжения систем безопасности атомных электростанций / Е.П. Шалунов, В.М. Смирнов, А.В. Воронин // Вестник Чувашского университета. — 2017. — № 1. — С. 200–212.
8. Совершенствование материалов для подшипников скольжения двигателей внутреннего сгорания (обзор) / Н.П. Бурковская [и др.] // Труды ВИАМ. — 2020. — № 1(85). — С. 78–91. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-1-78-91>.
9. Черняков, Д.С. Долговечность подшипников скольжения двигателя внутреннего сгорания и методы ее повышения [Электронный ресурс] / Д.С. Черняков, А.С. Птицын, Н.А. Зарипова // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. — 2018. — № 1(12). — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/dolgovечnost-podshipnikov-skolzheniya-dvigatelya-vnutrennego-sgoraniya-i-metody-ee-povysheniya/viewer>.
10. Применение твердого антифрикционного композитного материала в конструкции подшипников скольжения / Б.Н. Нуралин [и др.] // Известия ОГАУ. — 2016. — № 6(62). — С. 61–64.
11. Попова, М.В. Научно-технологические основы разработки заэвтектических силуминов с регулируемым температурным коэффициентом линейного расширения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 / М.В. Попова; Сибирский гос. индустриальный ун-т. — Новосибирск, 2004. — 40 с.
12. Малюх, М.А. Разработка составов легких сплавов системы Al-Si-Cu с регламентированным температурным коэффициентом линейного расширения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / М.А. Малюх; Новосибирский гос. индустриальный ун-т. — Новокузнецк, 2019. — 20 с.
13. Creation of AlSi12 alloy coating by centrifugal induction surfacing with the addition of low-melting metals / A.I. Komarov [et. al.] // Materials. — 2021. — Vol. 14, iss. 13. — DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14133555>.
14. Способ нанесения двухслойного покрытия на внутреннюю поверхность детали: пат. ВУ 23365 / М.А. Белоцерковский, А.И. Комаров, И.А. Сосновский, Д.В. Орда, А.А. Куриленок, Д.О. Искандарова. — Оpubл. 30.04.2021. — 6 с.
15. Структура и триботехнические свойства алюминиевых покрытий, получаемых методом центробежной индукционной наплавки / К.Е. Белявин [и др.] // Перспективные материалы и технологии / под ред. В.В. Рубаника. — Минск: Изд. центр БГУ, 2021. — Гл. 11. — С. 140–155.
16. Изучение влияния технологических режимов многослойной индукционной наплавки на структурообразование антифрикционных покрытий из сплава АК12 / М.А. Белоцерковский [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. научных трудов: в 3 кн. / ФТИ НАН Беларуси; редкол.: В.Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. — Минск, 2020. — Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. — С. 234–242.
17. Особенности получения биметаллических втулок с антифрикционным покрытием из сплава АК12 / М.А. Белоцерковский [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2019. — Вып. 8. — С. 320–324.

KOMAROV Aleksandr I., Ph. D. in Eng.

Head of the Laboratory of Modification Techniques of Structural Materials¹

E-mail: al_kom@tut.by

ORDA Dmitriy V.

Researcher of the Laboratory of Modification Techniques of Structural Materials¹

E-mail: dmitry_orda@mail.ru

SOSNOVSKY Igor A.

Senior Researcher of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Component Hardening¹

E-mail: sos3@tut.by

KURILYONOK Artem A., Ph. D. in Eng.

Senior Researcher of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Component Hardening¹

E-mail: AKTO13@mail.ru

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

Received 23 February 2022.

FORMATION OF TRIBOTECHNICAL Al-Cu COATINGS WITH FUNCTIONAL ADDITIVES BY CENTRIFUGAL INDUCTION SURFACING

The article presents the results of metallographic and tribotechnical studies of composite coatings based on aluminum with a high copper content formed on the inner surface of the workpiece by centrifugal induction surfacing. According to the results of the study, with a copper content of more than 40 wt.% a composite structure is formed based on the θ -phase (Al_2Cu) with inclusions of τ -phase grains (Cu_3NiAl_6), particles of silicon, tin and iron-containing phases. This structure has a high hardness and a parameter of the coefficient of thermal linear expansion close to steel, so that the coating does not peel off from the steel base. It is also shown that tin introduced into the melt does not form intermetallic compounds and is released in its pure form, acting as a solid lubricant and reducing the coefficient of friction to 0.03 at loads up to 20 MPa.

Keywords: Al-Cu alloy, silicon, tin, induction surfacing, sleeve, metallographic analysis, hardness, coefficient of friction

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-2-59-54-61>

References

- Dorozhkin N.N., Kashitsin L.P., Sosnovsky I.A., Gafo Yu.N. *Sposob izgotovleniya bimetallicheskih izdeliy* [Method of manufacturing bimetallic products]. Patent RU, no. 2017586 C1, 1994 (in Russ.).
- Belyavin K.E., Sosnovsky I.A., Khudoley A.L. Induktsionnyy nagrev v protsessakh tsentrobezhnogo naneseniya pokrytiy [Induction heating in the process of centrifugal coating deposition]. *Vestnik of the foundation for fundamental research*, 2013, no. 3(36), pp. 70–87 (in Russ.).
- Aleksakhin I.A., Glazunov S.G., Kolobnev I.V., et al. *Materialy v mashinostroenii. Vybór i primeneniye. T. 1. Tsvetnyye metally i splavy* [Materials in mechanical engineering. Selection and application. Vol. 1. Non-ferrous metals and alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 304 p. (in Russ.).
- Bogdanov N.A., Burova N.I., Golub L.V., et al. *Materialy v mashinostroenii. Vybór i primeneniye. T. 2. Konstruktsionnaya stal* [Materials in mechanical engineering. Selection and application. Vol. 2. Structural steel]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 496 p. (in Russ.).
- Patel P.S., Patel J.V. A review of tribological and mechanical investigation of aluminum bronze C95500 cast by horizontal centrifugal casting international. *Research journal of engineering and technology*, 2019, vol. 6, iss. 6, pp. 2625–2628.
- Barron M.A., Medina D.Y., Reyes J. Analysis of molten metal distribution in the mold of a horizontal centrifugal casting. *Open journal of applied sciences*, 2020, vol. 10, no. 7, pp. 444–454. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojapps.2020.107031>.
- Shalunov E.P., Smirnov V.M., Voronin A.V. Puti povysheniya nadezhnosti podshipnikov skolzheniya dizel-generatornykh ustanovok dlya avariynogo energosnabzheniya sistem bezopasnosti atomnykh elektrostantsiy [Ways to improve the reliability of slide bearings diesel generator sets for emergency power supply of nuclear power stations safety system]. *Bulletin of the Chuvash University*, 2017, no. 1, pp. 200–212 (in Russ.).
- Burkovskaya N.P., Sevostyanov N.V., Bolsunovskaya T.A., Efimochkin I.Yu. Sovershenstvovanie materialov dlya podshipnikov skolzheniya dvigatelya vnutrennego sgoraniya (obzor) [Improvement of materials for sliding bearings of internal combustion engines (review)]. *Proceedings of VIAM*, 2020, no. 1(85), pp. 78–91. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-1-78-91> (in Russ.).
- Chernyakov D.S., Ptitsyn A.S., Zaripova N.A. Dolgovechnost podshipnikov skolzheniya dvigatelya vnutrennego sgoraniya i metody ee povysheniya [Durability of the sliding bearings of the internal combustion engine and method for its increasing]. *Research and scientific electronic journal of Omsk SAU*, 2018, no. 1(12). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/dolgovechnost-podshipnikov-skolzheniya-dvigatelya-vnutrennego-sgoraniya-i-metody-ee-povysheniya/viewer> (in Russ.).
- Nuralin B.N., Kuanyshv K.M., Kuanyshv M.K. Primeneniye tverdogo antifriktsionnogo kompozitnogo materiala v konstruktsii podshipnikov skolzheniya [Application of solid antifriction composite material in the construction of plain bearings]. *Izvestiya of Orenburg State Agrarian University*, 2016, no. 6(62), pp. 61–64 (in Russ.).
- Popova M.V. *Nauchno-tehnologicheskoye osnovy razrabotki zaevticheskikh siluminov s reguliruemym temperaturnym koeffitsientom lineynogo rasshireniya*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Scientific and technological bases for the development of hypereutectic silumin with adjustable temperature coefficient of linear expansion. Extended Abstract of D. Sc. Thesis]. Novosibirsk, 2004. 40 p. (in Russ.).
- Malyukh M.A. *Razrabotka sostavov legkikh splavov sistemy Al-Si-Cu s reglamentirovannym temperaturnym koeffitsientom lineynogo rasshireniya*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Development of compositions of light alloys of the Al-Si-Cu system with a regulated temperature coefficient of linear expansion. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Novokuznetsk, 2019. 20 p. (in Russ.).
- Komarov A.I., Kyzioł L., Orda D.V., Iskandarova D.O., Sosnovskiy I.A., Kurilyonok A.A., Zuk D. Creation of AlSi12 alloy coating by centrifugal induction surfacing with the addition of low-melting metals. *Materials*, 2021, vol. 14, iss. 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14133555>.
- Belotserkovskiy M.A., Komarov A.I., Sosnovskiy I.A., Orda D.V., Kurilyonok A.A., Iskandarova D.O. *Sposob naneseniya dvukhsloynogo pokrytiya na vnutrennyuyu poverkhnost detali* [A method of applying a two-layer coating on the inner surface of the part]. Patent BY, no. 23365, 2021 (in Russ.).
- Belyavin K.E., Komarov A.I., Sosnovskiy I.A., Orda D.V. Struktura i tribotekhnicheskiye svoystva alyuminiyevykh pokrytiy, poluchaemykh metodom tsentrobezhnoy induktsionnoy naplavki [Structure and tribotechnical properties of aluminum coatings obtained by centrifugal induction surfacing]. *Perspektivnyye materialy i tekhnologii*, 2021, ch. 11, pp. 140–155 (in Russ.).
- Belotserkovskiy M.A., Komarov A.I., Sosnovskiy I.A., Orda D.V., Kurilyonok A.A., Iskandarova D.O. Izucheniye vliyaniya tekhnologicheskikh rezhimov mnogoslownoy induktsionnoy naplavki na strukturoobrazovanie antifriktsionnykh pokrytiy iz splava AK12 [Study of the influence of technological modes of multilayer induction surfacing on the structure formation of antifriction coatings made of AK12 alloy]. *Sovremennyye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov. Kn. 2. Tekhnologii i oborudovanie mekhanicheskoy i fiziko-tekhnicheskoy obrabotki*, 2020, pp. 234–242 (in Russ.).
- Belotserkovskiy M.A., Komarov A.I., Sosnovskiy I.A., Orda D.V., Kurilyonok A.A., Iskandarova D.O. Osobennosti polucheniya bimetallicheskih vtulok s antifriktsionnym pokrytiem iz splava AK12 [Technological features of obtaining bimetallic sleeves with antifriction coating from AlSi12 alloy]. *Aktualnyye voprosy mashinovedeniya*, 2019, iss. 8, pp. 320–324 (in Russ.).