

УДК 621.793:669.717

А.И. КОМАРОВ, канд. техн. наукзаведующий лабораторией технологий модифицирования конструкционных материалов¹

E-mail: al_kom@tut.by

И.А. СОСНОВСКИЙстарший научный сотрудник¹

E-mail: sos3@tut.by

Д.В. ОРДАмладший научный сотрудник¹

E-mail: dmitry_orda@mail.ru

А.А. КУРИЛЁНОК, канд. техн. наукстарший научный сотрудник¹

E-mail: AKTO13@mail.ru

Д.О. ИСКАНДАРОВАмладший научный сотрудник¹

E-mail: donata_i@mail.ru

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь*Поступила в редакцию 19.07.2019.*

ВЛИЯНИЕ ОЛОВА В МАТЕРИАЛЕ ПОДСЛОЯ НА СТРУКТУРУ AL-SI СПЛАВА, НАПЛАВЛЕННОГО ЦЕНТРОБЕЖНО ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Представлены результаты металлографических исследований, дюрометрических и триботехнических испытаний покрытий из силумина АК12, нанесенных на стальную основу центробежной индукционной наплавкой. Для обеспечения адгезии покрытия с основой при наплавке вводили баббит Б83С и припой ПОС61 для формирования переходного слоя. Установлено, что при использовании Б83С олово распределяется по всему объему покрытия с некоторой степенью ликвации к стальной основе, в структуре покрытия также присутствуют железосодержащие включения. Использование ПОС61 приводит к повышению однородности структуры, при этом отсутствуют включения оловянистого сплава. Полученные покрытия характеризуются высокими триботехническими свойствами. Среднее значение коэффициента трения для наплавленных с использованием баббита покрытий составляет 0,031–0,037, а в случае использования ПОС61 зафиксировано снижение коэффициента трения до 0,010–0,013 при увеличении нагрузки до 30 МПа. Установлено, что изменения в структуре покрытия в основном определяются содержанием олова в добавляемом сплаве, а присутствие свинца способствует увеличению скорости растворения железа в алюминии. Сделано предположение, что наличие железосодержащих включений способствует повышению триботехнических свойств за счет увеличения доли твердых частиц в мягкой матрице.

Ключевые слова: АК12, баббит Б83С, припой ПОС61, индукционная наплавка, структура, переходный слой, адгезионные свойства, рентгеноспектральный анализ, коэффициент трения, износостойкость

Введение. Индукционный нагрев является одним из видов электротермического нагрева, который сочетает в себе такие достоинства, как бесконтактная передача энергии от индуктора к детали, высокий КПД использования электроэнергии, возможность поверхностного и локального нагревания [1, 2].

Центробежный метод нанесения покрытий предусматривает обязательное вращение детали

(стальной заготовки) для обеспечения формирования наносимого материала. Покрытия могут быть образованы на внутренних, наружных, торцевых поверхностях цилиндрических и плоских деталей, методами одиночной или групповой обработки. Технология позволяет наносить покрытия в режимах припекания и наплавки, сочетать одновременно процессы сварки и наплавки [3–6].

Анализ технологии центробежной индукционной наплавки покрытий показывает, что основными конструктивными и технологическими параметрами, оказывающими влияние на качество биметаллических деталей являются следующие: конструктивные особенности наладок биметаллизирующей установки с технологической оснасткой, тип нагревательного оборудования, вид нагрева, метод формования, температурные параметры, время нагрева и охлаждения, время изотермической выдержки, частота и скорость нагрева, конструктивные параметры детали, частота вращения детали, состав наносимого материала [7, 8].

При наплавке, как известно, наносимый материал нагревают в заготовке и доводят до расплавления. Под воздействием центробежных сил расплав распределяется слоем равномерной толщины по внутренней цилиндрической поверхности и удерживается на ней до момента затвердевания при охлаждении. В этом случае осесимметричное формирование цилиндрического покрытия гарантируется правильным выбором скоростей вращения и центрированием оснастки [9].

Важным преимуществом рассматриваемого метода наплавки, обусловленным действием центробежных сил, является возможность получать композиционные покрытия за счет различной массы компонентов исходной шихты. Это позволяет формировать прочно связанные слои, различающиеся по структуре и свойствам [10, 11]. Перспективным направлением в технологии центробежной индукционной наплавки является получение покрытий из алюминиево-кремниевых сплавов. Такой подход, помимо экономии сплавов на основе меди, позволяет снизить массу изделий [12]. Однако существенной проблемой в этом случае остается обеспечение высокой адгезии алюминиевого покрытия со стальной основой. Решением данной задачи может явиться формирование подслоя из материала с большей массой, обеспечивающего приемлемый уровень адгезии как с алюминиевым сплавом, так и со стальной основой.

Целью работы является исследование структуры и триботехнических характеристик покры-

тия из силумина АК12, полученного центробежной индукционной наплавкой на стальную основу с использованием в качестве материала подслоя сплавов с различным содержанием олова.

Материалы и методика исследования. В качестве материала для наплавки покрытия был выбран алюминиево-кремниевый сплав АК12 (ГОСТ 1583-93), поскольку он имеет повышенный уровень литейных и механических свойств, а также обладает удовлетворительной коррозионной стойкостью при температурах до 200 °С. Состав сплава АК12 приведен в таблице 1.

Высокий процент кремния в сплаве (10–13 масс.%) обеспечивает хорошую жидкотекучесть и литейные свойства (дает малую усадку и практически не образует трещин), позволяя понижать температуру литья, а также обеспечивая повышенные теплостойкость и износостойкость [13]. При этом отливки из сплава АК12 обладают небольшой пористостью.

Для обеспечения адгезии наплавки из силумина АК12 со стальной основой в состав шихты вводился оловянистый сплав, обеспечивающий формирование переходной зоны. Количество материала выбиралось из расчета получения переходного слоя толщиной 0,5–1 мм, а покрытия из силумина — 5–6 мм.

В качестве материала для формирования переходного слоя использовались два сплава на основе олова с различной долей основного компонента: баббит Б83С (ГОСТ 1320-74) и припой ПОС61 (ГОСТ 21930-76), составы которых приведены в таблице 2. Выбор оловянистых сплавов в качестве материала подслоя был сделан с учетом низкой взаимной растворимости олова, алюминия и железа. При этом железо и олово образуют интерметаллиды типа $FeSn_2$ (при высоких концентрациях железа), что способствует повышению адгезионных свойств за счет формирования диффузионной зоны.

Для получения антифрикционного покрытия на внутренней поверхности стальной цилиндрической заготовки использовали метод центробежной индукционной наплавки [14].

Центробежная индукционная наплавка осуществлялась на оборудовании, включающем

Таблица 1 — Состав сплава АК12 (масс.%)
Table 1 — Composition of alloy AlSi12 (wt.%)

Si	Fe	Cu	Mn	Ti	Mg	Zn	Al
10–13	до 1,5	до 0,6	до 0,5	до 0,01	до 0,1	до 0,3	ост.

Таблица 2 — Химический состав оловянных сплавов, масс.%.
Table 2 — Chemical composition of tin alloys, wt.%

Сплав	Sb	Cu	Pb	Fe	As	Zn	Sn
Б83С	9,0–11,0	5,0–6,0	1,0–1,5	0,1	0,1	0,01	ост.
ПОС61	0,10	0,05	38-39	0,02	0,02	–	ост.

генератор токов высокой частоты (ТВЧ) типа ЛПЗ-2-67М, мощностью 60 кВт, частотой 66 кГц, рамочный 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 до 3000 мин⁻¹. Температура нагрева определялась пирометром TemPro-2200, время нагрева контролировалось электронным секундомером ИВПр-203М ТУ 4282-001-33865949-2009. При наплавке шихта размещалась в полости стальной втулки, изготовленной из стали 20 (ГОСТ 1050-88).

Структурно-фазовое состояние полученных образцов и поверхностей трения исследовалось методом металлографического анализа на микроскопах ХМ300 и МИМ-8. Микротвердость алюминиевого покрытия композиционных образцов определялась на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0,196 и 0,49 Н.

Триботехнические испытания образцов проводились на многофункциональном трибометре MFT-5000 (Rtec Instruments, США) по схеме возвратно-поступательного перемещения образца (рисунок 1) относительно неподвижного стального контртела, в качестве которого использовался торец стального ролика из сплава ШХ15 (60–62 HRC) диаметром 3 мм. Испытание выполнялось при давлениях 10, 20, 30 МПа, амплитуда перемещения составляла 5 мм при частоте 10 Гц, длительность испытания составляла 2 ч. По результатам испытаний находили коэффициент трения f , интенсивность изнашивания Iq ($Iq = \Delta m/L$, где L — суммарный путь трения), массовый износ Δm , который определяли путем взвешивания образцов на аналитических весах ВЛР-200, а также суммарный линейный износ пары трения.

Результаты эксперимента и их обсуждение.

Результаты металлографических исследований.

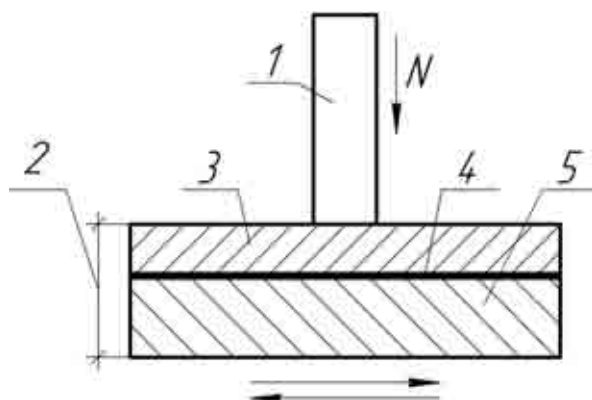


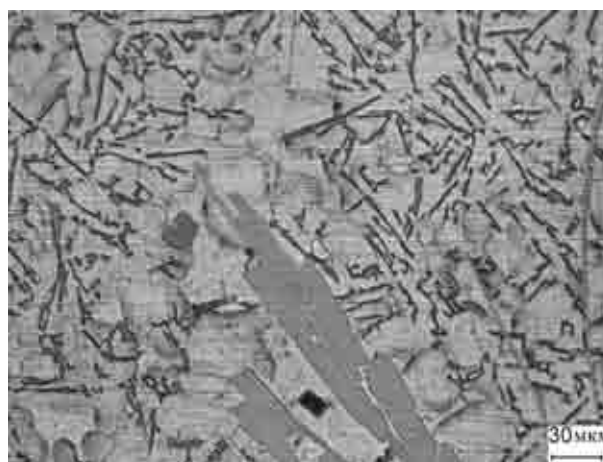
Рисунок 1 — Схема триботехнических испытаний образцов:

N — прикладываемая нагрузка; 1 — контртело; 2 — образец; 3 — покрытие из сплава АК12; 4 — переходный слой; 5 — стальная основа

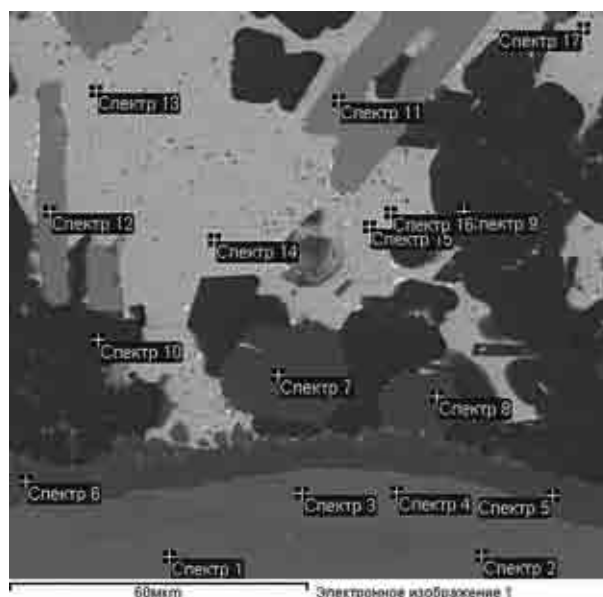
Figure 1 — Scheme of tribological tests of samples: N — applied load; 1 — counterbody; 2 — sample; 3 — coating made of alloy AlSi12; 4 — transition layer; 5 — steel base

Структура сплава АК12 после литья представляет собой эвтектику, состоящую из α -твердого раствора алюминия, в котором присутствуют включения кремния иглообразной формы. Обеспечение адгезионных свойств наплавленного на стальную основу покрытия из сплава АК12 достигалось за счет формирования подслоя из оловянного сплава. Этим объясняется присутствие олова в материале основного покрытия.

Согласно результатам металлографического анализа и СЭМ (рисунок 2), при использовании баббита в качестве материала для формирования подслоя, олово (с примесью свинца и сурьмы до 8 масс.%) распределяется по всему объему наплавленного слоя с некоторой степенью ликвации вблизи стальной основы. Такое распределение объясняется высокой плотностью олова и воздей-



a



b

Рисунок 2 — Структура наплавленного покрытия из сплава АК12 в середине (*a*) и на границе со стальной основой (*b*) с подслоем из баббита B83C

Figure 2 — Structure of deposited coating made of alloy AlSi12 in the middle (*a*) and at the interface with steel base (*b*) with underlayer made of babbitt B83S

Таблица 3 — Химический состав структурных фаз покрытия АК12 и подслоя Б83С на границе раздела со стальной основой
 Table 3 — Chemical composition of structural phases of coating AlSi12 and underlayer B83S at the interface with steel base

№ спектра	C	O	Al	Si	Mn	Fe	Cu	Sn	Sb	Pb
Спектр 1–4	10,4–16,0				0,4–0,7	83,3–89,2				
Спектр 5–6	19,8–22,4		32,2–42,4	9,6–10,8		28,2–34,6				
Спектр 7–8	20,5–23,0		40,5–41,8	10,0–10,2		26,3–27,1	0,2–0,4			
Спектр 9–10	29,8–30,9		66,9–68,4	0,4–0,6			1,2–1,6			
Спектр 11–12	7,4–8,2	17,6–19,2	12,3–12,4						60,1–61,9	
Спектр 13–17	4,3–7,3		0,4–0,7					88,4–93,4		1,9–3,6

ствием центробежных сил при осевом вращении заготовки в процессе наплавки. В структуре покрытия помимо включений олова также выявлено присутствие железосодержащих включений, которые представляют собой крупные вытянутые частицы длиной до 150 мкм и шириной до 30 мкм (см. рисунок 2 а).

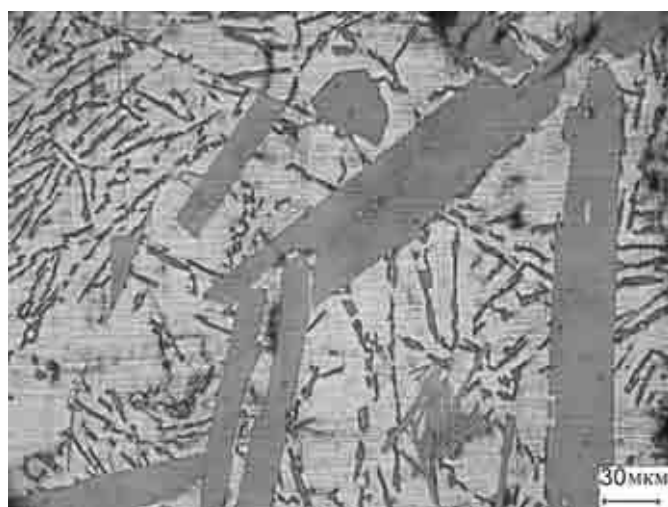
Более детальный анализ структуры образца позволил выявить на границе раздела наплавки алюминиевого сплава АК12 со стальной основой алитированный слой (см. рисунок 2 б, спектр 5–6, таблица 3) толщиной 6–8 мкм, на поверхности которого формируются сферические частицы системы Al-Fe-Si-Cu. Можно полагать, что указанные частицы по достижении некоторого критического размера переносятся в расплав, растворяются в нем и насыщают его железом (см. рисунок 2 б, спектр 7–8, таблица 3), которое при кристаллизации выделяется в виде железосодержащих фаз (см. рисунок 2 а).

Полученные данные показывают, что использование в качестве материала подслоя сплава с высоким содержанием олова сопровождается вклю-

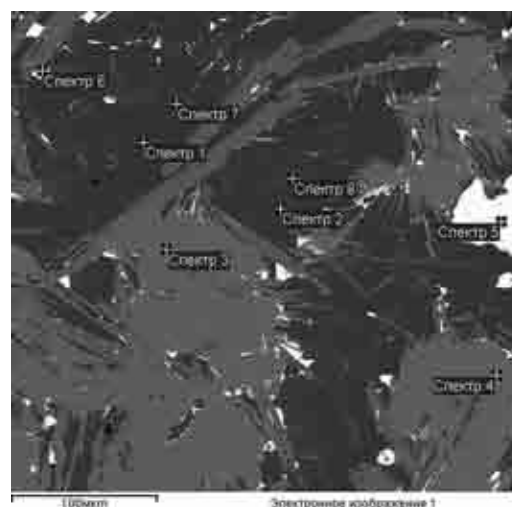
чением в алюминий-кремниевый расплав как железа, так и олова, что приводит к повышению гетерогенности структуры наплавки.

При использовании в качестве материала подслоя сплава с меньшей долей олова (ПОС61) в структуре наплавки отсутствуют включения оловянистого сплава, но сохраняется тенденция насыщения расплава железом. Согласно результатам металлографического анализа, объемная доля включений системы Fe-Si-Al в структуре возрастает в 2 раза. Частицы имеют вытянутую форму длиной до 200 мкм и шириной до 50 мкм (рисунок 3 а).

Железосодержащие включения равномерно распределены по структуре сплава, однако в приграничной зоне со стальной основой их морфология несколько изменяется (см. рисунок 3 б). Наблюдается формирование частиц сферической формы, которые окружены вытянутыми включениями и частицами свинцово-оловянистого сплава (таблица 4, спектр 5). Анализ сферических частиц показал, что они относятся к типу $FeSiAl_2$ (см. таблицу 4, спектр 3–4) и содержат больше же-



а



б

Рисунок 3 — Структура наплавленного покрытия из сплава АК12 в середине (а) и возле границы со стальной основой (б) с подслоем из припоя ПОС61

Figure 3 — Structure of deposited coating made of alloy AlSi12 in the middle (а) and near the interface with steel base (б) with underlayer made of solder POS61

Таблица 4 — Химический состав структурных фаз покрытия АК12 и подслоя ПОС61 на границе со стальной основой, масс.%
Table 4 — Chemical composition of structural phases of coating AlSi12 and underlayer POS61 at the interface with steel base, wt.%

№ спектра	C	O	F	Na	Al	Si	Fe	Ag	Sn	Pb
Спектр 1	11,14		0,78		80,67	6,82		0,58		
Спектр 2	7,80				90,94	1,26				
Спектр 3	10,18				49,98	8,92	30,93			
Спектр 4	7,71				51,52	9,34	31,43			
Спектр 5	7,99	2,59	4,57	0,52	1,72				15,93	66,67
Спектр 6	13,00		0,83		85,40	0,78				
Спектр 7	8,36				53,48	38,16				
Спектр 8	10,24				88,22	1,05		0,49		

леза в сравнении с частицами вытянутой формы, относящимися к типу Fe_2SiA_6 .

Согласно результатам сканирующей электронной микроскопии, свинец, входящий в состав материала подслоя, не образует с алюминием соединений и выделяется в двух формах: крупные области на границе раздела со стальной основой и частицы диаметром до 10 мкм на поверхности железосодержащих включений (см. рисунок 3 б).

Согласно полученным данным, структура основного слоя претерпевает меньшие изменения при использовании материала для подслоя с пониженным содержанием олова. При этом повышается степень насыщения наплавки включениями железа, что может способствовать повышению триботехнических свойств за счет увеличения доли твердых частиц в мягкой матрице. Также можно отметить, что свинец увеличивает скорость растворения железа в алюминии.

Результаты дюрометрических и триботехнических испытаний. Согласно результатам дюрометрических испытаний, материал подслоя не оказывает воздействия на микротвердость Al-Si эвтектики, значение которой варьируется в диапазоне 700–750 МПа. Микротвердость железосодержащих включений изменяется в диапазоне от 5,5 до 7 ГПа, при этом сферические частицы имеют более высокую твердость за счет повышенного содержания в их составе железа. Таким образом, при достаточном количестве в структуре твердых включений можно ожидать более высоких триботехнических свойств наплавленного материала.

Согласно результатам триботехнических испытаний, коэффициент трения образца покрытия из сплава АК12 с подслоем из баббита Б83С в исследуемом диапазоне давлений (10, 20, 30 МПа) практически не зависит от нагрузки и варьируется в диапазоне 0,031–0,037 (рисунок 4, кривые 1–3).

При использовании в качестве подслоя припоя ПОС61 аналогичное значение коэффициента трения наблюдается только при давлении 10 МПа (см. рисунок 4, кривая 4), а с увеличением нагруз-

ки коэффициент трения постепенно снижается. Так, при давлении 20 МПа коэффициент трения составляет 0,027–0,030 (см. рисунок 4, кривая 5), а при 30 МПа он равен 0,010–0,013 (см. рисунок 4, кривая 6). Следует отметить, что в начальный период испытаний при давлении 30 МПа величина коэффициента трения растет, а затем резко снижается (см. рисунок 4, кривая 6). Такое поведение может быть связано с наличием на поверхности железосодержащих включений и частиц свинца, которые при повышенной нагрузке участвуют в процессе трения, формируя благоприятную поверхностную структуру.

Металлографические исследования поверхности трения образца с подслоем из припоя ПОС61 подтвердили наличие слоя переноса, а также выявили незначительные следы выкрашивания железосодержащих фаз (рисунок 5 а). Исследования образца трения с подслоем из баббита Б83С показали, что на поверхности присутствуют не только следы выкрашивания железосодержащих включений (см. рисунок 5 б), но и множественные микрократеры (после испытаний при давлении 30 МПа).

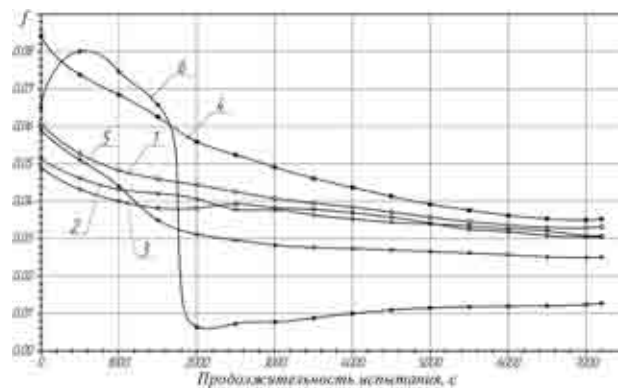
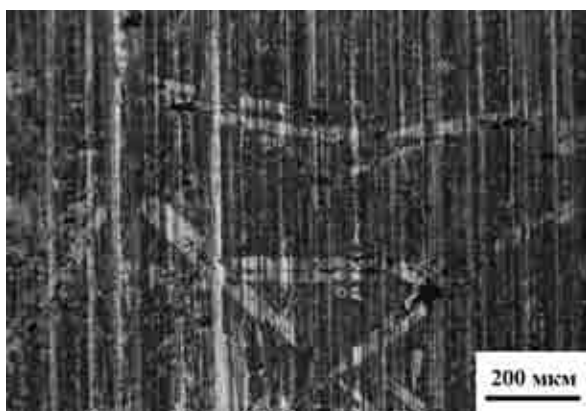
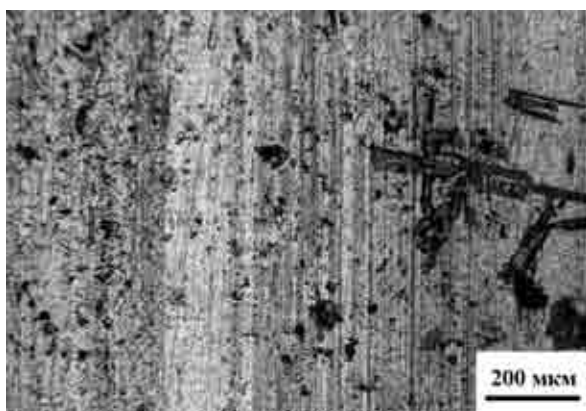


Рисунок 4 — Изменение коэффициента трения в ходе испытаний образцов покрытий из сплава АК12 с подслоем, содержащим различное количество олова, при различных давлениях: кривые 1, 4 — 10 МПа; кривые 2, 5 — 20 МПа; кривые 3, 6 — 30 МПа

Figure 4 — Variation of coefficient of friction during testing of coatings samples made of alloy AlSi12 with underlayer containing different amount of tin at different pressures: curves 1, 4 — 10 MPa; curves 2, 5 — 20 MPa; curves 3, 6 — 30 MPa



a



b

Рисунок 5 — Микроструктура поверхности трения образцов наплавленного покрытия из сплава АК12 с подслоем из припоя ПОС61 (а) и баббита В83С (b)
Figure 5 — Microstructure of friction surface of samples of deposited coating made of alloy AlSi12 with underlayer made of solder POS61 (a) and babbitt B83S (b)

При увеличении давления происходит ускорение процесса приработки сопрягаемых поверхностей, при этом суммарный линейный износ на образцах изменяется в диапазоне 2,05–2,25 мкм/ч, а средняя величина интенсивности изнашивания после испытаний при всех исследуемых давлениях составила $4,6 \cdot 10^{-5}$ мг/м, что сопоставимо с данными для бронзового сплава БрОФ10-1.

Основываясь на результатах испытаний, можно заключить, что покрытие из сплавов алюминий-кремниевой группы можно рассматривать в качестве замены бронзового покрытия при эксплуатации в триботехнических узлах, работающих при давлениях до 30 МПа.

Заключение. В результате проведенных исследований было установлено, что использование оловянистых сплавов баббита В83С и припоя ПОС61 в качестве материала для формирования переходного слоя обеспечивает адгезию покрытия из силумина АК12 со стальной основой.

Металлографический анализ показал, что при использовании В83С олово распределяется по всему объему наплавленного слоя с некоторой

степенью ликвации к стальной основе, при этом в структуре покрытия присутствуют железосодержащие включения. При использовании ПОС61 возрастает однородность структуры, отсутствуют включения оловянистого сплава, однако сохраняется тенденция насыщения расплава железом, что объясняет наличие включений системы Fe-Si-Al в структуре покрытия. На границе раздела фаз АК12–Сталь20 формируется алитированный слой, на его поверхности образуются сферические частицы системы Al-Fe-Si-Cu, которые после достижения критической массы переносятся в расплав и насыщают его железом.

Коэффициент трения полученных покрытий составил 0,031–0,037, а в случае использования ПОС61 зафиксировано его снижение с увеличением прикладываемой нагрузки. Так, при давлении 30 МПа коэффициент трения составил 0,010–0,013. Такое изменение обусловлено наличием на поверхности железосодержащих включений и свинца, которые при повышенной нагрузке участвуют в процессе трения, формируя поверхность структуры.

Показано, что структура основного слоя претерпевает меньшие изменения при использовании материала для подслоя с пониженным содержанием олова. Высказано предположение, что включения железа повышают триботехнические свойства за счет увеличения доли твердых частиц в мягкой матрице, а наличие свинца способствует увеличению скорости растворения железа в алюминии.

Список литературы

1. Индукционная наплавка твердых сплавов / В.Н. Ткачев [и др.]. — М.: Машиностроение, 1970. — 184 с.
2. Слухоцкий, А.Е. Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. — Л.: Энергия, 1974. — 264 с.
3. Центробежное припекание порошковых покрытий при переменных силовых воздействиях / Н.Н. Дорожкин [и др.]. — Минск: Наука и техника, 1993. — 160 с.
4. Восстановление зубчатых колес типа шестерня-полумуфта / Л.П. Кашицин [и др.] // Наука — производству. — 1999. — № 6. — С. 18–20.
5. Сосновский, И.А. Термические параметры центробежного индукционного нанесения порошковых покрытий / И.А. Сосновский, Ю.Н. Гафо // Инженерно-физический журнал. — 2011. — Т. 84, № 6. — С. 1135–1142.
6. Рябцев, И.А. Индукционная наплавка / И.А. Рябцев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2005. — № 11. — С. 37–40.
7. Gafo, Yu.N. Thermal parameters for centrifugal induction sintering of powder coatings / Yu.N. Gafo, I.A. Sosnovskij // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. — 2009. — Vol. 48, No. 1–2. — Pp. 105–111.
8. Дорожкин, Н.Н. Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками / Н.Н. Дорожкин. — Минск: Наука и техника, 1975. — 152 с.
9. Лисовский, А.Ф. Формирование структуры композиционных материалов при обработке металлическими расплавами / А.Ф. Лисовский. — Киев: Наук. думка, 2008. — 198 с.
10. К вопросу формирования контакта между порошковыми покрытиями и основой / И.А. Сосновский [и др.] // Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития: материалы III междунар. науч.-техн. конф., Гродно, 16–17 мая 2013 г. / ГрГУ им. Я. Купалы; редкол.: В.А. Струк (гл. ред.) [и др.]. — Гродно: ГрГУ, 2013. — С. 189–193.

11. Особенности технологии создания двухслойных антифрикционных изделий ходовых сопряжений рабочих органов путевых машин / И.А. Сосновский [и др.] // Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. науч. тр. / БГИТА; под общ. ред. Е.А. Памфилова. — Брянск: БГИТА, 2014. — Вып. 20. — С. 88–92.
12. Ильин, В.А. Алюминиевые покрытия и способы их получения / В.А. Ильин, А.В. Панарин // Авиационные материалы и технологии. — 2014. — № 4. — С. 37–42.
13. Технологические процессы и оборудование для нанесения покрытий центробежным методом с использованием двухступенчатого индукционного нагрева / И.А. Сосновский [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. — Минск, 2012. — Вып. 1. — С. 401–405.
14. Материалы в машиностроении. Выбор и применение: справ.: в 5 т. / Л.П. Лужников [и др.]; под ред. Л.П. Лужникова. — М.: Машиностроение, 1967. — Т. 1. Цветные металлы и сплавы. — 304 с.

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

Head of the Laboratory of Modification Technologies of Engineering Materials¹

E-mail: al_kom@tut.by

SOSNOVSKIY Igor A.

Senior Researcher¹

E-mail: sos3@tut.by

ORDA Dmitriy V.

Junior Researcher¹

E-mail: dmitry_orda@mail.ru

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

Senior Researcher¹

E-mail: AKTO13@mail.ru

ISKANDAROVA Donata O.

Junior Researcher¹

E-mail: donata_i@mail.ru

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

Received 19 July 2019.

INFLUENCE OF TIN IN UNDERLAYER MATERIAL ON AL-SI ALLOY STRUCTURE DEPOSITED USING CENTRIFUGAL INDUCTION METHOD

The results of metallographic studies, durometric and tribotechnical tests of coatings made of silumin AlSi12, deposited on a steel base by centrifugal induction surfacing are presented. To ensure the adhesion of the coating with the base during surfacing, babbitt B83S and tin–lead solder POS61 were introduced to form a transition layer. It is established that when using B83S, tin is distributed throughout the coating with a certain degree of segregation to the steel base, and iron-containing inclusions are also present in the coating structure. The use of POS61 leads to increase in the homogeneity of the structure, while there are no inclusions of tin alloy. The obtained coatings are characterized by high tribotechnical properties. The average value of the coefficient of friction for the surfaced coatings using babbitt is 0.031–0.037, and in the case of POS61, a decrease in the coefficient of friction to 0.010–0.013 with an increase in the load to 30 MPa is recorded. It is established that changes in the structure of the coating are mainly determined by the content of tin in the added alloy, and the presence of lead increases the rate of dissolution of iron in aluminum. It is assumed that the presence of iron-containing inclusions contributes to the tribotechnical properties improvement by increasing the proportion of solid particles in the soft matrix.

Keywords: AlSi12, babbitt B83S, POS61 tin-lead solder, induction surfacing, structure, transition layer, adhesive properties, X-ray spectral analysis, friction coefficient, wear resistance

References

1. Tkachev V.N., Fishteyn B.Ch., Kazintsev N.V., Aldyrev D.A. *Induktsionnaya naplavka tverdykh splavov* [Induction surfacing of hard alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 184 p.
2. Slukhotskiy A.E., Ryskin C.E. *Induktory dlya induktsionnogo nagreva* [Inductors for induction heating]. Leningrad, Energiya Publ., 1974. 264 p.
3. Dorozhkin N.N., Kashitsin L.P., Abramovich A.A., Kirpichenko I.A. *Tsentrobezhnoe pripekanie poroshkovykh pokrytiy pri peremennykh silovykh vozdeystviyakh* [Centrifugal sintering of powder coatings with varying force effects]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1993. 160 p.
4. Kashitsin L.P., Sosnovskiy I.A., Khudoley A.L., Gafo Yu.N. *Vosstanovlenie zubchatykh koles tipa shesternya-polumufta*

- [Restoration of gears of the gear-coupling type]. *Nauka – proizvodstvu* [Science for production], 1999, no. 6, pp. 18–20.
5. Sosnovskiy I.A., Gafo Yu.N. Termicheskie parametry tsentrobezhnogo induktsionnogo naneseniya poroshkovykh pokrytiy [Thermal parameters of centrifugal induction powder coating]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal* [Journal of engineering physics and thermophysics], 2011, vol. 84, no. 6, pp. 1135–1142.
 6. Ryabtsev I.A. Induktsionnaya naplavka [Induction welding]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair. Restoration. Modernization], 2005, no. 11, pp. 37–40.
 7. Gafo Yu.N., Sosnovskiy I.A. Thermal parameters for centrifugal induction sintering of powder. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2009, vol. 48, no. 1–2, pp. 105–111.
 8. Dorozhkin N.N. *Uprochnenie i vosstanovlenie detaley mashin metallicheskim poroshkami* [Hardening and restoration of machine parts with metal powders]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1975. 152 p.
 9. Lisovskiy A.F. *Formirovanie struktury kompozitsionnykh materialov pri obrabotke metallicheskim rasplavami* [Formation of the structure of composite materials in the processing of metal melts]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2008. 198 p.
 10. Sosnovskiy I.A., Belyavin K.E., Belotserkovsky M.A. K voprosu formirovaniya kontakta mezhdu poroshkovymi pokrytiyami i osnovoy [To the problem of formation of contact between powder coatings and the base]. *Promyshlennost regiona: problemy i perspektivy innovatsionnogo razvitiya* [Industry of the region: problems and prospects of innovative development], 2013, pp. 189–193.
 11. Sosnovskiy I.A., Belotserkovsky M.A., Kurilyonok A.A., Grudko I.I., Trembitskiy I.P., Klimovich A.F. Osobennosti tekhnologii sozdaniya dvukhsloynnykh antifriktsionnykh izdeliy khodovykh sopryazheniy rabochikh organov putevykh mashin [Features of the double-layer technology antifriction products way of working conjugation track]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii* [New materials and technologies in mechanical engineering], 2014, no. 20, pp. 88–92.
 12. Ilin V.A., Panarin A.V. Alyuminievye pokrytiya i sposoby ikh polucheniya [Aluminum coating and methods of their production]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2014, no. 4, pp. 37–42.
 13. Sosnovskiy I.A., Belotserkovsky M.A., Gafo Yu.N., Kurilyonok A.A. Tekhnologicheskie protsessy i oborudovanie dlya naneseniya pokrytiy tsentrobezhnym metodom s ispolzovaniem dvukhstuppenchatogo induktsionnogo nagreva [Technological processes and equipment for coating by centrifugal method using two-stage induction heating]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya* [Topical issues of mechanical engineering], issue 1, pp. 401–405.
 14. Luzhnikov L.P. *Materialy v mashinostroenii. Vybory i primeneniye. T. 1. Tsvetnye metally i splavy* [Materials in mechanical engineering. Selection and application Vol.1. Non-ferrous metals and alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 304 p.