

УДК 621.793

**А. И. Комаров**, канд. техн. наук, **М. А. Белоцерковский**, д-р техн. наук, доцент,  
**И. А. Сосновский**, **Д. В. Орда**, **А. А. Курилёнок**, канд. техн. наук  
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, РБ,  
Тел.: 284-15-42, факс: 284-08-90, E-mail: sos3@tut.by;

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ СИЛУМИНА АК12, НАНЕСЕННЫХ НА СТАЛЬНУЮ ОСНОВУ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

*В статье представлены результаты металлографических и триботехнических исследований композиционной втулки, полученной совмещением метода центробежного формования с индукционным нагревом при наплавке силумина АК12 на стальную основу. Удовлетворительные адгезионные свойства между наплавленным покрытием и стальной основой обеспечивались за счет введения в состав шихты дополнительного материала для формирования переходной зоны между покрытием и стальной основой, в качестве которого использовали баббит марки Б83С. Согласно полученным данным, на границе раздела фаз формируется переходная зона состоящая из сплава АК12 и олова, насыщенная включениями железа и сурьмы, тогда как на стальной поверхности образуется алитированный слой. Результаты триботехнических испытаний показали, что полученное покрытие из сплава АК12 обладает более низким коэффициентом трения (0,031–0,037), чем покрытие из бронзы БрОФ10-1, при равном уровне интенсивности изнашивания*

**Ключевые слова:** центробежная индукционная наплавка, АК12, переходный слой, структура адгезионные свойства, коэффициент трения

**A. I. Komarov, M. A. Belotserkovsky, I. A. Sosnovsky, D. V. Orda, A. A. Kurilyonok**

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF ANTI-FRICTION COATINGS FROM SILUMIN ALSI12, APPLIED ON THE STEEL BASIS BY THE CENTRIFUGAL INDUCTION METHOD

*The article presents the results of metallographic and tribotechnical studies of a composite sleeve obtained by combining the centrifugal molding method with induction heating when welding silumin AK12 onto a steel base. Satisfactory adhesive properties between the deposited coating and the steel substrate were ensured by introducing additional material into the charge composition to form a transition zone between the coating and the steel substrate, using B83C grade babbitt. According to the data obtained, at the phase boundary a transition zone is formed consisting of an alloy of AK12 and tin, saturated with inclusions of iron and antimony, while an aluminized layer is formed on the steel surface. The results of tribotechnical tests showed that the obtained AK12 alloy coating has a lower coefficient of friction (0.031–0.037) than the BrOF10-1 bronze coating with an equal level of wear rate*

**Keywords:** centrifugal induction surfacing, AlSi12, transition layer, structure, adhesive properties, friction coefficient

### 1. Введение

Повышение конструкционной прочности, надежности и долговечности высоконагруженных узлов трения является актуальной проблемой для современного машиностроения. При этом особое значение придается повышению надежности и долговечности трибосопряжений, эксплуатирующихся в условиях как низких, так и высоких удельных механических нагрузок, сопряженных с тепловыми воздействиями. Зачастую такие узлы эксплуатируются под действием постоянных нагрузок при трении без смазочных материалов или в условиях ограниченной смазки.

Как показывают мировые научные тенденции [1-4], данная проблема может быть решена путем использования композиционных материалов на металлической ос-

нове, обладающих уникальным сочетанием таких свойств, как относительно высокая твердость, жесткость, прочность, теплопроводность, а также вязкость разрушения.

Так для деталей триботехнического назначения необходимым сочетанием свойств обладают металломатричные композиционные материалы, которые представляют собой пластичную матрицу с равномерно распределенной упрочняющей фазой в виде тонкодисперсных или ультра- и нанодисперсных твердых включений [1-6]. Однако, изготовление таких изделий сопряжено с высокими затратами, поэтому большой интерес представляют изделия с покрытиями из антифрикционных композиционных материалов [7-12].

К числу таких перспективных композитных материалов можно отнести изделия, в которых на стальную основу наносится функциональное покрытие на основе медных или алюминиевых сплавов и их композитов [7-8]. С учетом энергоэффективности существующих процессов наплавки [9-12], при получении таких покрытий, целесообразно использовать технологию электротермической наплавки, к разновидности которой относится индукционная наплавка.

Целью работы является разработка технологических подходов, обеспечивающих получения композиционных втулок с высокой адгезией материала покрытия из алюминиевого сплава АК12 и стальной основы, при центробежной индукционной наплавке.

## 2. 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.

Таблица 1. – Состав сплава АК12 (в мас.%)

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.

Высокий процент кремния (10-13 мас.%) в сплаве обеспечивает хорошую жидкотекучесть и литейные свойства (дает малую усадку и практически не образует трещин), позволяя понижать температуру литья, а также делает сплав АК12 более теплоустойчивым и износостойким, по сравнению с бронзой. При этом за счет малого интервала кристаллизации, отливки из сплава АК12 обладают небольшой пористостью.

Формирование антифрикционного покрытия на внутренней поверхности цилиндрической стальной заготовки проводилось совмещением метода центробежного формования предварительно подготовленной шихты с нагревом токами высокой частоты до температуры 780–800 °С, с последующей изотермической выдержкой при данной температуре в течение 6 мин. С целью обеспечения хороших адгезионных свойств между стальной основой и наплавляемым покрытием из силумина АК12, в состав шихты вводился материал обеспечивающий формирование переходной зоны.

В качестве материала переходной зоны был выбран оловянистый баббит Б83С (таблица 2), поскольку основной его компонент – олово, то его взаимная растворимость с алюминием и с железом низкая, но при этом он способен обеспечить высокие адгезионные характеристики. С железом олово образует интерметаллид типа FeSn<sub>2</sub> (при вы-

соких концентрациях железа), что способствует повышению адгезионных свойств за счет образования диффузионной зоны.

Таблица 2. – Состав сплава Б83С (ГОСТ 13220-74), в мас. %.

Sb	Cu	Pb	Fe	As	Zn	Al	Sn
9.0-11.0	5.0-6.0	1.0-1.5	0.1	0.1	0.01	0.005	ост.

Таким образом, состав шихты для наплавки был следующим: материал покрытия – силумин АК12, материал для формирования переходной зоны – баббит Б83С, а также смеси порошков флюсующих материалов. Количество материала рассчитывалось таким образом, чтобы обеспечить толщину наплавляемого слоя 5–6 мм.

Индукционная центробежная наплавка осуществлялась на оборудовании, включающем 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 ОИМ НАН Беларуси) с регулируемой частотой вращения до 3000 мин<sup>-1</sup>. Температура нагрева контролировалась 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). Для последующих исследований полученные образцы подвергались токарной обработке (рис. 1).



Рисунок 1. Образец с наплавленным покрытием из сплава АК12

Структурно-фазовое состояние полученных образцов и поверхностей трения исследовались методом металлографического анализа на микроскопах ХJM300 и МИМ-8, оснащенных цифровой регистрацией изображений. Микротвердость алюминиевого покрытия композиционных образцов определялась на приборе ПМТ-3 путем вдавливания алмазного индентора, согласно требованиям ГОСТ 9450-76. В зависимости от размера исследуемых структурных фаз нагрузка составляла 0,196 или 0,49 Н.

Триботехнические испытания образцов проводились на многофункциональном трибометре MFT-5000 (Rtec Instruments, США) по схеме возвратно-поступательного перемещения образца (рис. 2) относительно неподвижного стального контртела, в

качестве которого использовался торец стального ролика из сплава ШХ15 (твердость 60-62 HRC) диаметром 3 мм. Испытание проводилось при давлениях ( $p$ ) 10, 20 и 30 МПа. Амплитуда перемещения составляла 5 мм с частотой 10 Гц. Длительность испытания в нагруженном состоянии составляла 2 часа. По результатам испытаний определялся коэффициент трения ( $f$ ), массовый износ  $\Delta m$ , интенсивность изнашивания  $Iq$  ( $Iq = \Delta m/L$ , где  $L$  – суммарный путь трения), а также суммарный линейный износ пары трения. Потеря массы  $\Delta m$  образцов определялась путем взвешивания на аналитических весах ВЛР-200.

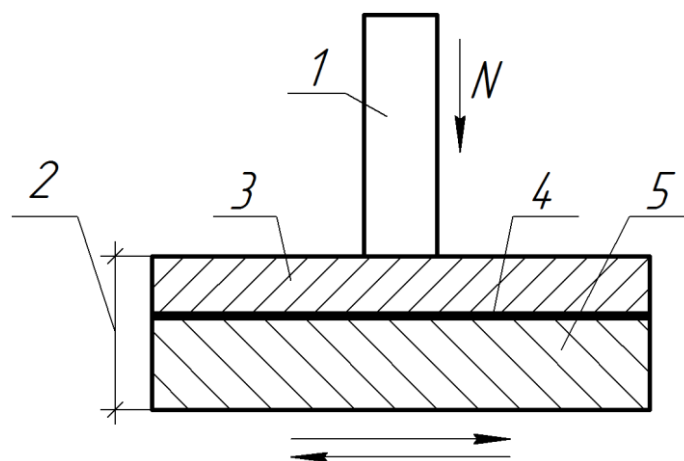


Рисунок 2. Схема триботехнических испытаний образцов  
 $N$  – направление прикладываемой нагрузки; 1 – контртело; 2 – образец;  
 3 – покрытие из сплава АК12; 4 – переходный слой; 5 – стальная основа

### 3. Результаты эксперимента и их обсуждение.

**Результаты металлографических исследований.** Металлографический анализ структуры покрытия из сплава АК12 проводился по всей толщине функционального слоя начиная от рабочей поверхности и до стальной основы (рис. 3).

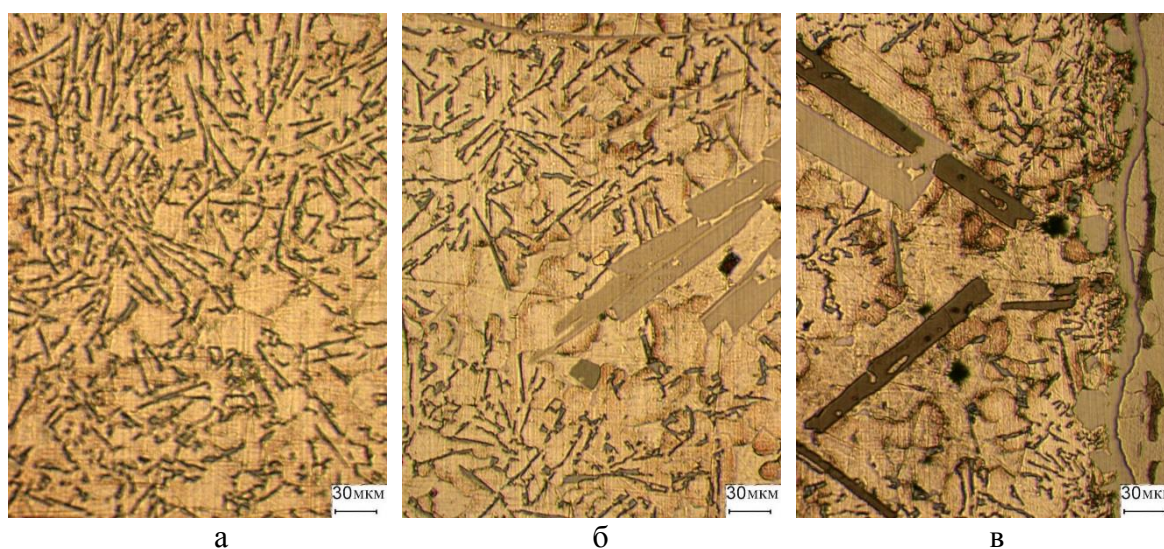


Рисунок 3. Структура основных зон наплавленного покрытия из сплава АК12

На основании полученных данных можно выявить три основные зоны: основная – сплав АК12 (рис. 3а), переходная зона у границы раздела фаз покрытия со стальной основой (рис. 3б и 3в) и диффузионный подслоя на стальной втулке (рис. 3в).

Основная доля наплавленного покрытия (около 60% от толщины наплавленного слоя) имеет эвтектическую структуру и представлена равномерно распределенными иглами кремния в  $\alpha$ -твердом растворе алюминия. В структуре присутствуют также области твердого раствора, которые идентифицированы как скопления оловянного сплава (рис. 4б). Согласно результатам сканирующей микроскопии (рис. 4) и рентгеноспектрального анализа, участки скопления олова легированны свинцом и сурьмой (рис. 4в и 4г). Указанные области имеют неравномерное распределение по структуре сплава, что связано с оттеснением более тяжелого сплава к стальной подложке под действием центробежных сил.

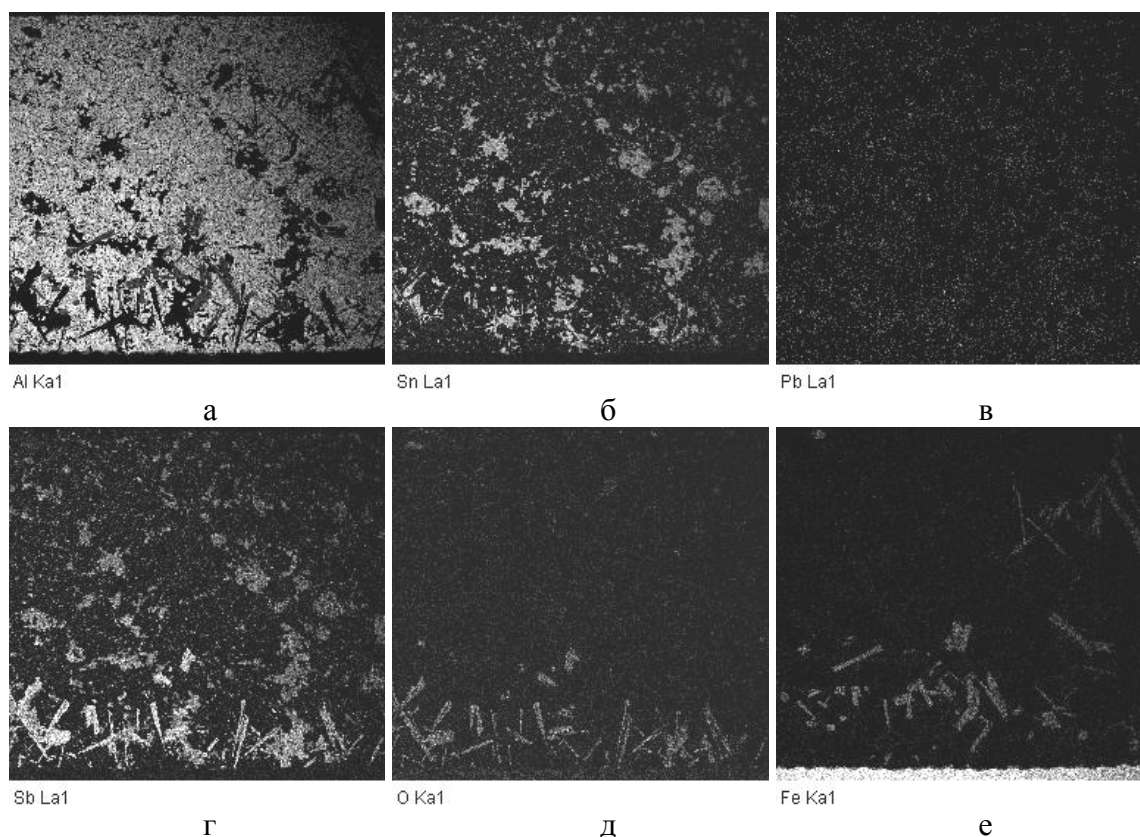


Рисунок 4. Распределение по структуре наплавленного слоя основных компонентов сплава

Структура переходной зоны включает помимо Al-Si эвтектики включения двух видов: железо- и сурьмасодержащих. Обе фазы представляют собой крупные вытянутые частицы длиной до 150 мкм и шириной до 30 мкм (рис. 3б и 3в). Согласно картам распределения, включения сурьмы содержат в своем составе кислород (рис. 4д) и располагаются ближе к стальной основе, оттесняя железосодержащие включения к середине наплавленного покрытия (рис. 4е).

Формирование железосодержащих включений происходит за счет растворения поверхностного слоя стальной втулки, а именно при растворении алитированного слоя (спектр 5–6, рис. 5, таблица 3), толщина которого составляет 6–8 мкм. На поверхности диффузионного слоя формируются сферические частицы системы Al-Fe-Si-Cu, которые

по достижении некоторого критического размера переносятся в расплав, растворяются в нем и насыщают железом (спектр 7–8, рис. 5, таблица 3). В результате чего, при кристаллизации расплава происходит формирование железосодержащих включений.

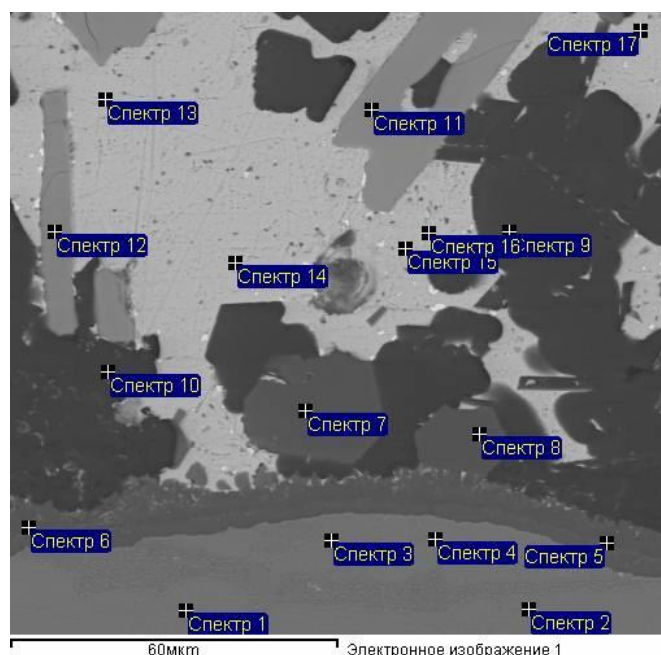


Рисунок 5. Структура наплавленного покрытия на границе раздела со стальной втулкой

Таблица 3. – Химический состав структурных фаз наплавленного покрытия на границе раздела со стальной втулкой

№ 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

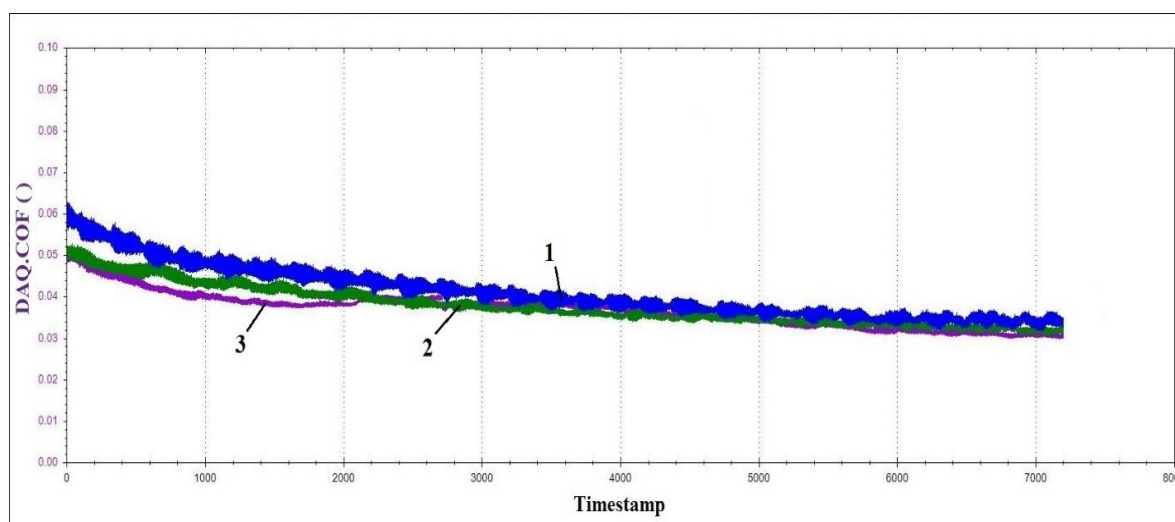
Согласно представленным данным, баббит не образует четкой переходной зоны (с явной границей раздела фаз) между наплавляемым покрытием из алюминиевого сплава АК12 и стальной втулкой. Однако формируемый на границе раздела фаз подслои, с высоким содержанием интерметаллидных включений и олова, беспечивает близкие коэффициенты термического расширения, снижая внутренние напряжения и

обеспечивая достаточно высокие адгезионные свойства между наплавленным покрытием и стальной втулкой.

**Результаты дюрометрических и триботехнических испытаний.** Согласно результатам дюрометрических испытаний, микротвердость основной структурной фазы, Al-Si эвтектики, варьируется в диапазоне 700–750 МПа, тогда как микротвердость железосодержащих включений изменяется от 5,5 до 7 ГПа. Таким образом, при достаточном количестве в структуре твердых включения будет соблюдаться принцип Шарпи, что обеспечит в процессе трения более высокие триботехнические свойства наплавленного материала.

Перед проведением триботехнических исследований образцов, втулки с полученными покрытиями подвергалась механической обработке для удаления дефектного слоя, после чего из них вырезались и шлифовались образцы для триботехнических испытаний. В результате такой обработки триботехнические испытания проводили на образцах, структура которых сочетала Al-Si эвтектику с включениями железосодержащих частиц (рис. 3б).

Согласно полученным данным, коэффициент трения покрытия в исследуемом диапазоне давлений практически не зависит от нагрузки и варьируется в диапазоне 0,031–0,037 (рис. 6).



1 – 10 МПа; 2 – 20 МПа; 3 – 30 МПа

Рисунок 6. Изменение коэффициента трения наплавленного покрытия в ходе триботехнических испытаний при различных давлениях

При увеличении давления происходит снижение времени приработки сопрягаемых поверхностей, при этом суммарный линейный износ на всех давлениях также не изменяется и равен 2,05–2,25 мкм/ч (рис. 7). Как видно из графика, основная доля износа протекает на этапе приработки образца. Средняя величина интенсивности изнашивания образца после испытаний при давлениях исследуемого диапазона, равна  $4,6 \cdot 10^{-5}$  мг/м, что сопоставимо с данными для бронзового сплава БрОФ10-1.

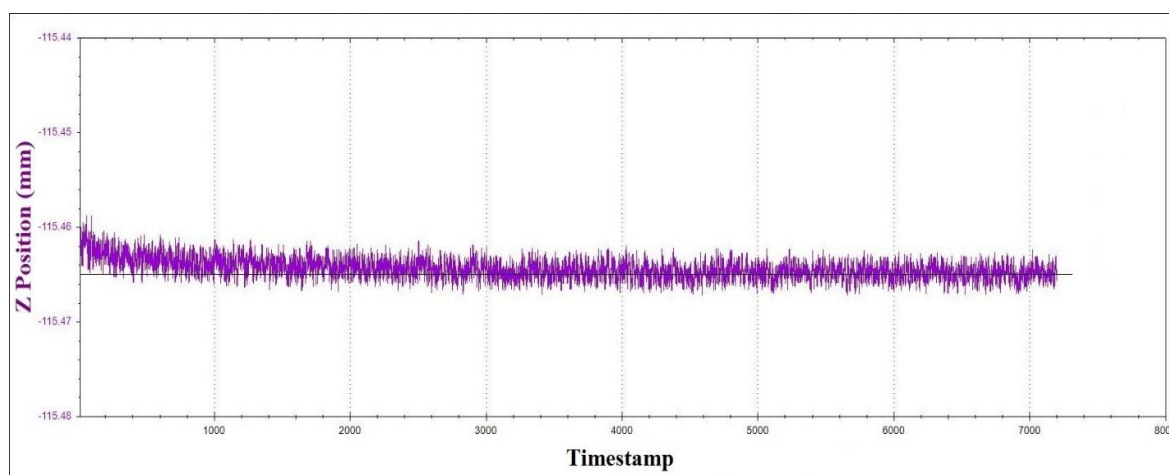


Рисунок 7. Изменение положения датчика нагрузки за период испытаний образца с наплавленным покрытием при давлении 30 МПа

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.

#### 4. Заключение

Разработаны технологические подходы для получения композиционных втулок с покрытием из сплава АК12, при которых адгезионные свойства между наплавленным слоем и стальной основой обеспечиваются введением в шихту материала, формирующего переходную зону. Согласно проведенным исследованиям, в качестве такого материала может быть использован баббит марки Б83С, который обеспечивает удовлетворительные адгезионные свойства как с силумином, так и со стальной основой.

Согласно данным структурного анализа, введение бabbита приводит к частичному растворению железа, которое при кристаллизации выделяется в форме включений вытянутой формы, твердость которых достигает 7 ГПа.

Триботехнические испытания показали, что коэффициент трения сплава АК12 с включениями железосодержащих частиц в 2 раза ниже, чем у бронзы БрОФ10-1, и составляет 0,031–0,037 при равном уровне интенсивности изнашивания. Таким образом, композиционные втулки с покрытием из сплава АК12 могут использоваться в качестве альтернативы бронзовым втулкам в узлах триботехнического назначения, работающих при давлениях до 30 МПа.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Михеев, Р. С. Алюмоматричные композиционные материалы с карбидным упрочнением для решения задач новой техники / Р.С. Михеев, Т. А. Чернышова. – Москва: ООО ИПЦ "Маска", 2013. – 356 с.
2. Borodianskiy, K. Mechanical Properties and Microstructure Characterization of Al-Si Cast Alloys Formation Using Carbide Nanoparticles / Konstantin Borodianskiy, Michael Zinigrad // Journal of Materials Sciences and Applications. – 2015. – Vol. 1, No 3. – P. 85–90.



3. Verresh Kumar, G. B. Studies on Al6061-SiC and Al7075-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix composites / G.B. Verresh Kumar, C.S.P. Rao, N. Selvaraj, M.S. Bha-gyashakar // Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineer-ing. – 2010. – Vol. 9, No. 1. – P. 43–55.

4. Properties of ceramic-reinforced aluminum matrix composites – a review / Dipti Kanta Das, Purna Chandra Mishra, Saranjit Singh, Ratish Kumar Thakur // International Journal of Mechanical and Materials engineering, 2014. – Vol. 1, No 12. – P. 1–16.

5. Комаров, А. И. Синтез наноструктурированных тугоплавких наполнителей, их влияние на структуру и свойства силуминов / А. И. Комаров // Перспективные материалы и технологии: монография: в 2 т.; под ред. В. В. Клубовича. – Витебск: УО "ВГТУ", 2015. – Т.2 – Гл. 12. – С. 202–223.

6. Комаров, А. И. Синтез карбидо-корундового наполнителя и его воздействие на структуру и свойства поршневого сплава АК12М2МгН / А. И. Комаров, В. И. Комарова, Д. В. Орда // Механика машин, механизмов и материалов, 2016. – №1 (34). – С. 81 - 86.

7. Белявин, К. Е. Импульсные электрофизические технологии получения покрытий и модифицирования поверхности материалов / К. Е. Белявин, Д. В. Минько, О.О. Кузнечик, В. В. Макеев // Металлургия. Респ. межвед. сб. науч. трудов, 2013. – Вып. 34, ч. 2. – С. 58 - 71.

8. Пат. 2017586 РФ, МКИ5 В 22 F 7/04. Способ изготовления биметаллических изделий: / Дорожкин Н. Н., Кашицин Л. П., Сосновский И. А., Гафо Ю. Н.; заявитель Ин-т проблем надежности и долговечности машин АН БССР. – № 4902218/02; заявл. 14.01.91; опубл. 15.08.94. Бюл. № 15.

9. Белявин, К. Е. Индукционный нагрев в процессах центробежного нанесения покрытий / К. Е. Белявин, И. А. Сосновский, А. Л. Худoley. // Вестник фонда фундаментальных исследований. — Минск, 2013. – № 3 (36). – С. 70 - 87.

10. Сосновский, И. А. Термические параметры центробежного индукционного нанесения порошковых покрытий / И. А. Сосновский, Ю. Н. Гафо // Инженерно-физический журнал. – Т. 84 – 2011. –№ 6. – С. 1135–1142.

11. Белявин, К. Е. Теория и практика электроимпульсного спекания пористых порошковых материалов / К. Н. Белявин [и др.]. – Минск: ООО «Ремико», 1997. – 180 с.

12. Сосновский, И. А. Моделирование процессов индукционной наплавки порошковых покрытий, содержащих наноразмерные модификаторы / И. А. Сосновский [и др.] // Вестник ПГУ, 2016. – Серия В. – № 3. – С. 66 - 74.

Поступила в редколлегию 18.01.2020 г.