

## СТРУКТУРА И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ ИЗ СПЛАВА БАББИТА В83, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОРАЗМЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ БОРА

М.Л. Хейфец<sup>3</sup>, И.Е. Калашников<sup>1</sup>, Л.К. Болотова<sup>1</sup>, Л.И. Кобелева<sup>1</sup>,  
А.Г. Колмаков<sup>1</sup>, Р.С. Михеев<sup>2</sup>, П.А. Витязь<sup>3</sup>, С.А. Чижик<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН

<sup>2</sup>МГТУ имени Н.Э. Баумана

г. Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup>Президиум Национальной академии наук Беларуси

г. Минск, Республика Беларусь

*Проведены сравнительные трибологические испытания покрытий, сформированных методом дуговой наплавки на стальной подложке из баббита В83 и В83, содержащего наноразмерные частицы бора ( $B_{\text{нано}}$ ). Полученные результаты проанализированы на основе металлографического анализа структуры покрытий.*

**Ключевые слова:** сплав баббита, наноразмерные частицы, износостойкость

## STRUCTURE AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF COATING FROM BABBIT B83 ALLOYS, MODIFIED BY NANO-DIMENSIONAL PARTICLES OF BORON

M.L. Kheifetz<sup>3</sup>, I.E. Kalashnikov<sup>1</sup>, L.K. Bolotova<sup>1</sup>, L.I. Kobeleva<sup>1</sup>,  
A.G. Kolmakov<sup>1</sup>, R.S. Mikheev<sup>2</sup>, P.A. Vityaz<sup>3</sup>, SA Chizhik<sup>3</sup>

<sup>1</sup>FGBUN Institute of Metallurgy and Materials Science

named after A.A. Baikov Institute of Physics

<sup>2</sup>MSTU named after N.E. Bauman

Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus,

Minsk, Republic of Belarus

*Comparative tribological tests of coatings formed by the arc-surfacing method on a steel substrate made of babbitt B83 and B83 containing nano-sized boron particles ( $B_{\text{nano}}$ ) are carried out. The results obtained are analyzed on the basis of metallographic analysis of the coating structure.*

**Keywords:** babbitt alloy, nano-sized particles, wear resistance

**E-mail:** kalash2605@mail.ru, mikheev.roman@mail.ru, mlk-z@mail.ru

Эффективность и надежность эксплуатации крупных и ответственных агрегатов, широко применяющихся в энергетическом оборудовании, мощных насосах, компрессорах, электродвигателях и т.д. напрямую связана с использованием подшипников скольжения. Рабочая поверхность подшипника непосредственно подвергается износу, приводящему оборудование в неработоспособное состояние. С одной стороны, поверхностный слой должен обладать твердостью для повышения износостойкости, а с другой – должен быть мягким для снижения коэффициента трения. Таким противоречивым требованиям частично удовлетворяют антифрикционные сплавы, самыми распространенными из которых являются сплавы на основе меди, алюминия и олова.

Для подшипников скольжения широко используется высокооловянистый баббит Б83. Этот сплав обладает структурными особенностями: в мягкой матрице  $\alpha$ -фазы расположены крупные кристаллы твердой  $\beta$ -фазы (SnSb) и игольчатые частицы  $\gamma$ -фазы ( $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ). Эти интерметаллидные соединения оказывают существенное влияние на трибологические свойства баббита: наличие легко выкрашивающихся крупных и остроугольных частиц  $\beta$ -фазы и иглообразных частиц  $\gamma$ -фазы обуславливает невысокую износостойкость сплава [1–2].

Измельчение структурных составляющих положительно влияет на повышение износостойкости подшипника из баббита [2–3]. Так в работе [4] показано, что уменьшение размера  $\beta$ -фазы от 150 до 5 мкм приводит к снижению интенсивности износа на 25 %. Известно, что в результате измельчения крупных твердых частиц интерметаллидных фаз в результате жидкой штамповки удалось существенно снизить интенсивность изнашивания баббита Б83 в условиях трения скольжения без смазки [5]. Это согласуется с результатами работ, свидетельствующих, что образование однородной мелкозернистой структуры в виде ультрадисперсных частиц второй фазы позволяет достигать у износостойких цветных сплавов повышенного уровня трибологических и других физико-механических характеристик [6–8].

При изготовлении и ремонте подшипниковых узлов широкое применение находят технологии плазменного напыления и наплавки. Высокие скорости кристаллизации при применении этих технологий приводят к формированию структуры с мелкокристаллической интерметаллидной фазой, равномерно распределенной по всему объёму покрытия [9–11].

Еще одним способом измельчения структуры является модифицирование сплавов субмикронными или наноразмерными добавками [8, 12, 13]. Модификаторы, влияющие на морфологию структурных составляющих при кристаллизации, способствуют значительному их измельчению и, как правило, равномерному распределению по всему объёму. Модификаторы первого рода – поверхностно-активные – избирательно адсорбируются на гранях зародышей, замедляют рост зерен и препятствуют их слиянию. Модификаторы второго рода увеличивают число центров кристаллизации, уменьшая работу образования зародышей [14, 15].

Таким образом, модифицирующая способность субмикронных и нанодобавок основана на их большом энергетическом потенциале и огромной удельной поверхности, позволяющей при незначительных концентрациях частиц перекрыть всю площадь границ раздела в расплаве и служить барьерами на поверхности растущих кристаллов, либо выполнять роль искусственных центров кристаллизации [16–17].

**Цель работы** – разработка технологии получения, исследование структуры и трибологических свойств покрытий на основе сплава баббита Б83, армированного частицами  $B_{\text{нано}}$ .

Для нанесения покрытий были изготовлены наплавочные прутки методом экструзии порошка баббита Б83 (10–12 % Sb, 5,5–6,5 % Cu, основа – Sn) и порошка баббита с добавлением 0,25 масс. % частиц  $B_{\text{нано}}$  размером менее 100 нм.

Порошок баббита изготавливали путем размола стружки, полученной механической обработкой литой заготовки, а композиционную смесь – путем размола порошка баббита Б83 совместно с частицами бора (рис. 1, а) в планетарной мельнице “RETSCH-PM100” при скорости вращения 200 об/мин в течение 60 мин.

Порошки баббита и композиционной смеси прессовали вхолдную при усилии 320–340 МПа в пресс-форме, которую затем помещали в муфельную печь, нагревали до температуры  $310 \pm 10$  °С, выдерживали в течение 30 мин, и при этой же температуре экструдировали на механическом прессе ОМА ( $P_{\text{max}} = 15$  т) при усилии  $320 \pm 5$  МПа. Использовали фильеру диаметром 3 мм для получения прутков, которые являлись расходоуемыми электродами в процессе дуговой наплавки.

На рис. 1, б представлена структура наплавочного прутка из баббита Б83, содержащего 0,25 масс. %  $B_{\text{нано}}$ . Видно, что частицы В достаточно равномерно распределены в матрице, в том числе и в виде отдельных конгломератов.

Наплавленные слои из полученных прутков наносили на поверхность массивной подложки (толщина 8 мм) из стали марки СтЗсп (ГОСТ 380). Дуговую наплавку производили на переменном токе неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона на режиме: сварочный ток –  $I = (160–170)$  А, напряжение на дуге –  $U_{\text{д}} = (16–18)$  В, скорость наплавки –  $V_{\text{н}} = 4,2$  м/ч, расход защитного газа (аргона) – (12–14) л/мин. Для сравнения структуры и свойств полученных образцов изучали образец промышленного сплава баббита Б83 в виде шайбы размером: диаметр 20 мм, толщина 8 мм при тех же режимах.

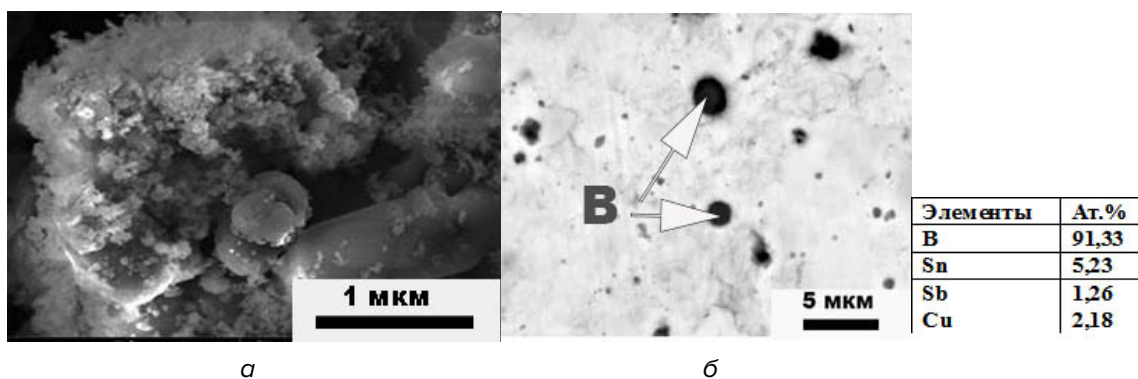


Рис. 1. Внешний вид порошка  $B_{\text{нано}}$  (а), структура и МРСА наплавочного прутка состава Б83 + 0,25 масс. %  $B_{\text{нано}}$  после экструзии (б)

Структуру наплавленных слоев анализировали на электронных микроскопах LEO 430i и VEGA3 SB, а также на оптическом микроскопе Лейка DMILM, оснащенный программой Qwin для анализа изображений. С помощью данного программного обеспечения определяли размеры структурных составляющих КМ. Статистический анализ структуры образцов проводили по пяти отдельно взятым полям. Для сравнения структуры и свойств полученных образцов изучали образец промышленного сплава баббита Б83 в виде шайбы размером: диаметр 20 мм, толщина 8 мм при тех же режимах.

При анализе структур литого баббита (рис. 2, а) и наплавленных покрытий (рис. 2, б, в) выявлено, что в процессе наплавки прутков состава Б83 и Б83 + 0,25 масс. %  $B_{\text{нано}}$  произошло измельчение и изменение формы интерметаллидных фаз SnSb и  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ . Особенно существенно изменения проявились в покрытиях содержащих В: интерметаллиды SnSb частично потеряли свою остроугольную форму, а иглы  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  после наплавки стали более округлыми по сравнению с литым баббитом. Металлографический анализ поперечного сечения наплавленных покрытий показал, что можно отметить хорошую адгезию наплавленных слоев с металлической подложкой: линия

сплавления является непрерывной и не содержит несплошностей. Отсутствие пористости в наплавленных покрытиях наряду с непрерывной, не содержащей несплошностей линией сплавления свидетельствует о правильном выборе технологических параметров процессов наплавки.

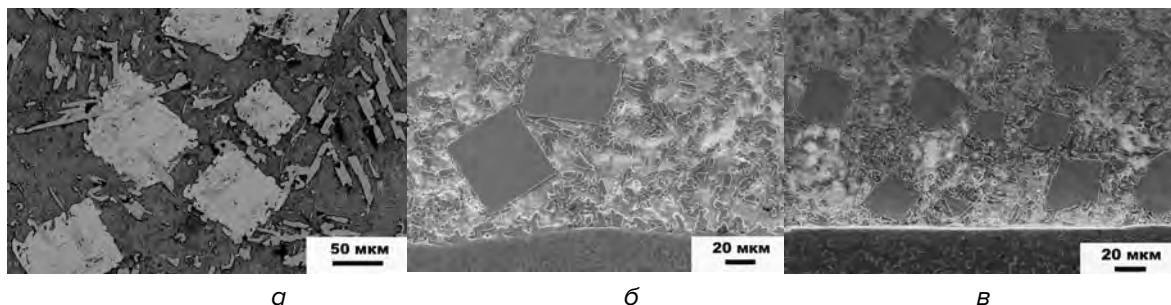


Рис. 2. Структура литого сплава Б83 (а) и наплавленных покрытий: Б83 (б) и Б83 + 0,25 масс. %  $V_{\text{нано}}$  (в)

Результаты измерений средней площади изолированных включений интерметаллидной фазы SnSb, выполненные с использованием программы Qwin для анализа изображений, представлены в табл. 1.

Табл. 1

**Процентное содержание изолированных включений интерметаллидной фазы SnSb определенной площади**

Площадь интерметаллидов SnSb, мкм <sup>2</sup>	Содержание интерметаллидов указанной площади		
	литой Б83, %	покрытие Б83, %	покрытие Б83 + 0,25% $V_{\text{нано}}$ , %
0–1000	0	56	62
1000–2000	5,4	30	34
2000–3000	4	7,2	3,2
3000–4000	14,8	3,8	1,8
4000–5000	15,4	3	0
5000–6000	19	2	0
6000–7000	11	0	0
7000–8000	9,6	0	0
8000–9000	10,6	0	0
9000–10000	6,8	0	0
10000–13000	3,4	0	0

Видно, что в литом баббите не наблюдалось интерметаллидов площадью меньше 1000 мкм<sup>2</sup>. Максимальное количество интерметаллидов обнаружено размерами от 3000 до 8000 мкм<sup>2</sup>. Тогда как для наплавленных слоев Б83 и Б83 + 0,25 масс. %  $V_{\text{нано}}$  максимальное количество интерметаллидной фазы SnSb (до 60%) приходится на размер до 2000 мкм<sup>2</sup>. Крупные интерметаллиды в покрытиях не наблюдаются. Особенно это видно для покрытий, содержащих  $V_{\text{нано}}$ . Измельчение интерметаллидных фаз при наплавке связано быстрыми скоростями охлаждения, а введенный порошок  $V_{\text{нано}}$  является дополнительным центром кристаллизации и способствуют более интенсивному зарождению и формированию большего количества мелких интерметаллидных фаз SnSb и  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ , одновременно препятствуя образованию их остроугольной и игольчатой формы.

Трибологические испытания наплавленных слоев проводили в условиях сухого трения скольжения на установке CETRUMT Multi-Specimen Test System по схеме – неподвижная втулка (контртело) против вращающейся шайбы при удельных нагрузках от 18 до 60 Н и скорости скольжения 0,39 м/с. Размеры втулки из стали 45 по ГОСТ 1050 (HRC>63): внутренний диаметр 12 мм, наружный диаметр 16 мм. Испытываемый образец в виде шайбы представлял собой стальную основу толщиной 8 мм с нанесенным на ее поверхность наплавленным слоем толщиной 2–3 мм. Испытания каждого образца проводили при последовательном ступенчатом осевом нагружении до значений 18, 28, 39, 50, 60 Н ( $L = 1110$  м). Время испытаний при каждой осевой нагрузке составляло 10 мин.

Испытания проводили на воздухе при температуре  $20 \pm 1$  °С и влажности  $60 \pm 4$  %.

Поведение образцов при сухом трении скольжения оценивали по величине интенсивности изнашивания  $I_m$

$$I_m = \Delta m / L,$$

где  $\Delta m$  – потеря массы образца;  $L$  – путь трения; твёрдость образцов по Бриннелю (НВ) определяли на твёрдомере WilsonWolpert при нагрузке 62,5 кг, диаметр шарика 2,5 мм.

Значения твёрдости НВ и интенсивности изнашивания литого сплава и наплавленных покрытий представлены на рис. 3.

Видно, твёрдость покрытий превышает твёрдость литого сплава. Интенсивность изнашивания напротив, уменьшается, причем для покрытия, содержащего наноразмерный бор – на 40 %. Повышение твердости и уменьшение интенсивности изнашивания связано с тем, что в наплавленном покрытии, полученном с высокими скоростями охлаждения и модифицированном бором общее количество интерметаллидных включений увеличивается за счёт их измельчения, улучшается равномерность их распределения в матрице и, как следствие, доля пластичной матрицы в поверхности трения уменьшается. К тому же из-за потери первоначальной остроугольной формы интерметаллидовый переход к более округлой износостойкости может возрасти, т.к. нет концентраторов напряжений, вызывающих образование трещин и, как следствие, выкрашивание интерметаллидов SnSb.

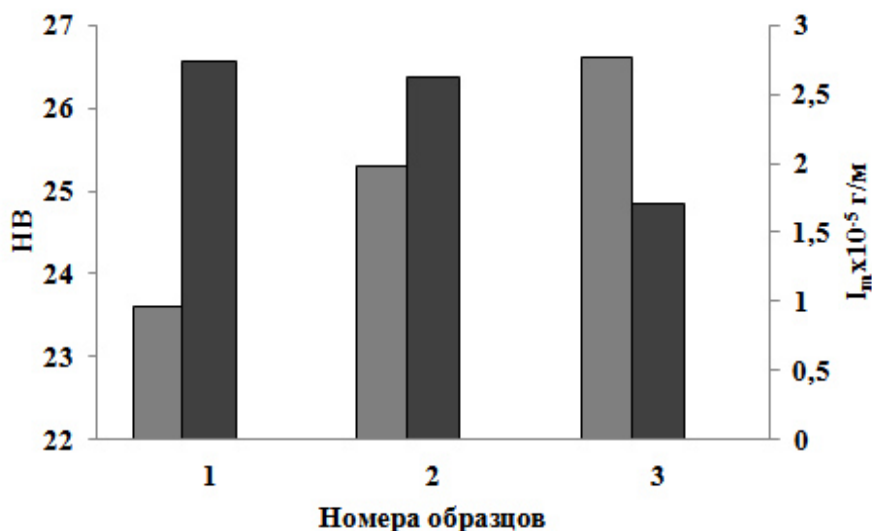


Рис. 3. Твёрдость и интенсивность изнашивания образцов: 1 – B83 литой и наплавленных покрытий – 2 – B83, 3 – B83 + 0,25 масс. %  $B_{\text{нано}}$

## Выводы

Антифрикционные покрытия из сплавов Б83 и Б83, содержащих наноразмерные частицы бора, сформированы на стальной основе методом дуговой наплавки. При наплавке использовали прутки, изготовленные методом экструзии из порошка баббита и смеси баббита с 0,25 масс. %  $V_{\text{нано}}$ . Модифицирующее влияние армирующих частиц на структуру покрытия определяли по изменению размера интерметаллидных фаз SnSb. Армирование баббита наночастицами бора позволило измельчить структуру покрытия по сравнению с литым Б83 в 2 раза, и в 1,2 раза по сравнению с покрытием, не содержащим армирующих частиц. Износостойкость композиционного покрытия, содержащего частицы бора, увеличена на 30 % по сравнению с износостойкостью покрытия на основе сплава Б83 и в два раза по сравнению с литым промышленным сплавом.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-58-00009Бел\_а.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хрущев, М.М. Исследование изменений в строении рабочей поверхности баббита в процессе трения и изнашивания / М.М. Хрущев, А.Д. Курицина // Трение и износ в машинах. М. – Л.: АН СССР. – 1950. – Т5. – С. 76–82.
2. Влияние интенсивной пластической деформации на микроструктуру и трибологические свойства баббита Б83 / Л.Г. Коршунов [и др.] // Прочность и пластичность. – 2009. – Т.108. – №5. – С551–559
3. Barykin, N.P. Wear and failure of babbit bushes in steam turbine sliding bearings. / N.P. Barykin, F.A. Sadykov, I.R. Aslanyan // Materials Engineering and Performance. – 2000. – №2. – P. 127–131
4. Барыкин, Н.П. Поверхностная обработка вкладыша подшипника скольжения / Н.П. Барыкин, Ф.А. Садыков, И.Р. Асланян // Трение и износ. – 2000. – Т.21. – №6. – С. 634–639.
5. Износ баббита Б83 с различной микроструктурой / А.Х. Валеева [и др.] // Письма о материалах. – 2015. – Т5. – №2. – С. 147–151
6. Структура и трибологические свойства функциональных сплавов Al–Sn, Al–Sn–Pb и Sn–Sb–Cu, подвергнутых интенсивной пластической деформации / Н.И. Носкова [и др.] // Вопросы материаловедения. – 2008. – №2(54). – С.71–80.
7. Sato, A. Aluminum Matrix Composites: Fabrication and Properties / A. Sato, R. Mehrabian // Met. Trans. B. – 1976. – V.7B. – P. 443–451
8. Чернышова, Т.А. Трибологические свойства литых алюмоматричных композитов, модифицированных нанопорошками / Т.А. Чернышова, И.Е. Калашников, Л.К. Болотова // Металлургия машиностроения. – 2010. – №2. – С.17–22
9. Демпфирующая способность баббитов, полученных различными способами / А.С. Христолюбов [и др.] // Вестник ИжГТУ. – 2008. – №4. – С. 33–35
10. Ипатов, А.Г. Структура и свойства модифицированного антифрикционного покрытия на основе металлической матрицы / А.Г. Ипатов, Е.В. Харанжевский, Ю.Ю. Матвеева // Вестник ИжГТУ. – 2016. – №2(47). – С. 46–53
11. Сравнение трибологических характеристик баббитовых покрытий, полученных активированной дуговой металлизацией и альтернативными методами / Ю.С. Коробов [и др.] // Сварка и диагностика. – 2012. – №1. – С.36–39
12. Стеценко, В.Ю. Влияние углеродных нанотрубок на структуру и фрикционную износостойкость литых баббитов / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин // Литейное производство. – 2011. – №2. – С. 9–10
13. Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама / Г.Н. Соколов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2009. – №6. – С.41–47
14. Палатник, Л.С. папиров И.И. Ориентированная кристаллизация / Л.С. Палатник. – Киев: Техника, 1970. – 211с.
15. Селюченко, В.К. Поверхностные явления в металлах и сплавах / В.К. Селюченко. – М.: Гостехиздат, 1957. – 491с.
16. Влияние тугоплавких наночастиц на структуру литых композиционных материалов / Т.А. Чернышова [и др.] // Труды VII Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии» (СММТ 2009), г. Санкт-Петербург, 2009. – С.205–215.
17. Модифицирование – метод управления структурой и свойствами металлов, сплавов и покрытий / Гадалов В.Н. [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии. – 2013. – №2. – С.12–15.

## REFERENCES

1. Khrushchev M.M., Kuritsina A.D. Issledovanie izmenenij v stroenii rabochej poverhnosti babbita v processe treniya i iznashivaniya [Investigation of changes in the structure of the babbitt working surface in the process of

- friction and wear] // Friction and wear in machines. M. – L. : AN USSR. 1950. T5. P. 76–82. (in Russian)
2. Korshunov L.G., Noskova N.I., Korznikov A.V., Chernenko N.L., Vildanova N.F. Vliyanie intensivnoj plasticheskoj deformacii na mikrostrukturu i tribologicheskie svojstva babbita B83 [Influence of intense plastic deformation on the microstructure and tribological properties of babbitt B83] // Strength and plasticity. 2009. T.108. N°5. P. 551–559. (in Russian)
  3. Barykin N.P., Sadykov F.A., Aslanyan I.R. Wear and failure of babbitt bushes in steam turbine sliding bearings. // Materials Engineering and Performance. 2000. N°2. P. 127–131
  4. Barykin N.P., Sadykov F.A., Aslanian I.R. Poverhnostnaya obrabotka vkladysya podshipnika skol'zheniya [Surface treatment of the bearing of the sliding bearing] // Friction and wear. 2000. T.21. N°6. P. 634–639. (in Russian)
  5. Valeeva A.H., Valeev I.Sh., Fazlyakhmetov R.F., Pshenichnyuk A.I. Iznos babbita B83 s razlichnoj mikrostrukturoj [Wear of babbitt B83 with different microstructure] // Letters on materials. 2015. T5. N°2. P. 147–151. (in Russian)
  6. Noskova N.I., Korshunov L.G., Vildanova N.F., Korznikov A.V., Churbayev R.V. Struktura i tribologicheskie svojstva funkcional'nyh splavov Al–Sn, Al–Sn–Pb i Sn–Sb–Cu, podvergnutyh intensivnoj plasticheskoj deformacii [Structure and Tribological Properties of Functional Alloys of Al–Sn, Al–Sn–Pb and Sn–Sb–Cu, Subjected to Intensive Plastic Deformation] // Materials Science. 2008. No. 2 (54). P. 71–80. (in Russian)
  7. Sato A., Mehrablan R. Aluminum Matrix Composites: Fabrication and Properties, Met. Trans. B. 1976. V.7B. P. 443–451.
  8. Chernyshova T.A., Kalashnikov I.E., Bolotova L.K. Tribologicheskie svojstva lityh alyumomatrichnyh kompozitov, modifitsirovannyh nanoporoshkami [Tribological properties of cast aluminomatrix composites modified with nanopowders] // Metallurgy of Mechanical Engineering. 2010. N°2. P. 17–22. (in Russian)
  9. Khristolyubov A.S., Potekhin B.A., Mikhailov S.B., Skvortsov A.A. Dempfiruyushchaya sposobnost' babbitov, poluchennyh razlichnymi sposobami [Damping ability of babbitts obtained by various methods]. Bulletin of IzhSTU. 2008. N°4. P. 33–35. (in Russian)
  10. Ipatov A.G., Kharanzhevsky E.V., Matveyev Yu.Yu. Struktura i svojstva modifitsirovannogo antifrikcionnogo pokrytiya na osnove metallicheskoj matricy [Structure and properties of a modified antifriction coating based on a metal matrix]. VestnikIzhSTU. 2016. N°2 (47). P. 46–53. (in Russian)
  11. Korobov Yu.S., Filippov M.A., Ilyushin V.V., Potekhin B.A. Sravnenie tribologicheskikh harakteristik babbitovyh pokrytij, poluchennyh aktivirovannoj dugovoj metallizaciej i al'ternativnymi metodami [Comparison of the tribological characteristics of babbitt coatings obtained by activated arc metallization and alternative methods] // Welding and Diagnostics. 2012. N°1. P. 36–39. (in Russian)
  12. Stetsenko V.Yu., Rivkin A.I. Vliyanie uglerodnyh nanotrubok na strukturu i frikcionnyy iznosostojkost' lityh babbitov [Influence of carbon nanotubes on the structure and frictional wear resistance of cast babbitts]. Foundry. 2011. N°2. P. 9–10. (in Russian)
  13. Sokolov G.N., Lysak I.V., Troshkov A.S., Zorin I.V., Goremykina S.S., Samokhin A.V., Alekseev N.V., Flowers Yu.V. Modifitsirovanie struktury naplavlennogo metalla nanodispersnymi karbidami vol'frama [Modification of the weld metal structure by nanodispersed tungsten carbides] // Physics and Chemistry of Material Processing. 2009. N°6. P. 41–47. (in Russian)
  14. Palatnik L.C., Papirov I.I. Orientirovannaya kristallizaciya [Oriented crystallization]. Kiev: Engineering, 1970. 211 p. (in Russian)
  15. Selyuchenko V.K. Poverhnostnye yavleniya v metallah i splavah [Surface phenomena in metals and alloys]. Moscow: Gostekhzdat, 1957. 491 p. (in Russian)
  16. Chernyshova T.A., Kalashnikov I.E., Kobeleva L.I., Bolotova L.K. Vliyanie tugoplavkih nanochastich na strukturu lityh kompozicionnyh materialov [Influence of refractory nanoparticles on the structure of cast composite materials] // Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference “Modern Metal Materials and Technologies” (SMMT 2009), St. Petersburg, 2009. P. 205–215. (in Russian)
  17. Gadalov V.N., Yemelyanov S.G., Skripkina Yu.V., Salnikov V.G., Goretsky V.V. Modifitsirovanie – metod upravleniya strukturoj i svojstvami metallov, splavov i pokrytij [Modification – a method for controlling the structure and properties of metals, alloys and coatings]. Izvestiya Yugo-Zapadnogo Gosudarstvennogo Universiteta. Series Technique and technology. 2013.No.2. P. 12–15. (in Russian)

*Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 15.05.18*