

УДК 621.763:621.893; 534.08; 53.082.4
DOI:10.21209/2308-8761-2016-11-4-99-106

Игорь Евгеньевич Калашников¹,
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник,
Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН
(119991, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 49),
e-mail: kalash2605@mail.ru

Людмила Константиновна Болотова,
старший научный сотрудник,
Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН
(119991, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 49),
e-mail: l.bolotova@mail.ru

Павел Андреевич Быков,
младший научный сотрудник,
Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН
(119991, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 49),
e-mail: pavel_imet@mail.ru

Наталья Борисовна Подымова,
кандидат физико-математических наук,
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
(119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы),
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119991, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 4),
e-mail: prodymova@mail.ru

Сергей Федорович Забелин,
доктор технических наук, профессор, член корреспондент РАЕН,
Забайкальский государственный университет
(672039, Россия, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30),
e-mail: s.zabelin2012@yandex.ru

Физико-механические и трибологические свойства композиционных материалов на основе сплава системы $SnSbCu$, полученных методом экструзии

Исследованы физико-механические и трибологические свойства композиционных материалов на основе сплава системы $SnSbCu$. Представлена технология изготовления методом экструзии наплавочных композиционных прутков на основе системы $SnSbCu$, а именно баббита Б83. Получены прутки с равномерным распределением высокопрочных армирующих частиц карбида кремния. Показано, что по значениям твёрдости и плотности наплавочные прутки соответствуют свойствам литого сплава баббита Б83, а по износостойкости превосходят его.

Ключевые слова: сплав баббита Б83, армирующие наполнители, экструзия, композиционные прутки, лазерный оптико-акустический метод, износостойкость

¹И. Е. Калашников – основной автор, является организатором исследования, формулирует выводы и обобщает итоги реализации коллективного проекта.

Igor E. Kalashnikov¹,

*Doctor of Engineering Science, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science,
Russian Academy of Sciences
(49 Leninsky pr., Moscow, 119991, Russia),
e-mail: kalash2605@mail.ru*

Ludmila K. Bolotova,

*Senior Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science,
Russian Academy of Sciences
(49 Leninsky pr., Moscow, 119991, Russia),
e-mail: l.bolotova@mail.ru*

Pavel A. Bykov,

*Junior Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science,
Russian Academy of Sciences
(49 Leninsky pr., Moscow, 119991, Russia),
e-mail: pavel_imet@mail.ru*

Natalia B. Podymova,

*Candidate of Physics and Mathematics,
Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
(1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia)
National University of Science and Technology "MISiS"
(4 Leninsky pr., Moscow, 119991, Russia),
e-mail: npodymova@mail.ru*

Sergey F. Zabelin,

*Doctor of Engineering Science, Professor,
Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences,
Transbaikal State University
(30 Alexandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russia),
e-mail: s.zabelin2012@yandex.ru*

Physical, Mechanical and Tribological Properties of Composite Materials based on SnSbCu Alloy Manufactured by the Extrusion Method

Physical, mechanical and tribological characteristics of composite materials based on SnSbCu alloy have been investigated. The paper presents the manufacturing technique by the extrusion method of the composite filler rods based on SnSbCu alloy, namely on babbitt alloy B83. The manufactured filler rods were obtained with the uniform distribution of high-strength reinforcing particles of SiC. It was found that the hardness and the density of these filler rods are comparable with those of the cast babbitt alloy B83 whereas their wear resistance exceeds that of this alloy.

Keywords: babbitt alloy B83, reinforcing particles, extrusion method, composite filler rods, laser-ultrasonic method, wear resistance

Введение. Наилучшим комплексом антифрикционных свойств обладают оловянные баббиты на основе системы $SnSbCu$, в частности, B83 (10–12 % Sb, 5,5–6 % Cu, основа — Sn) по ГОСТ 1320-74. Недостатками таких баббитов является их невысокие износостойкость и усталостная прочность вследствие остроугольной формы крупных интерметаллидов SnSb, вершины и грани которых являются концентраторами напряжений [13]. Улучшение свойств баббитов может быть достигнуто дисперсным упрочнением сплавов микронными керамическими частицами, т. е. получением на их основе гетерогенных дисперсно-упрочненных

¹I. E. Kalashnikov is the main author who has organized the study, formulated the conclusions and findings in realization of the group project.

композиционных материалов (КМ) [2; 8]. В этом случае совместная работа равномерно распределенных высокомодульных армирующих частиц и пластичной матрицы может повысить прочность и усталостную долговечность получаемого композита, не ухудшая при этом антифрикционные свойства [3; 6]. Известно, что такие керамические частицы, как SiC , TiC , SiO_2 , Al_2O_3 , имеющие высокую твердость, температуру плавления и высокую стабильность, широко используются в качестве армирующего наполнителя для упрочнения пластичных матриц КМ [10–12].

Недостатками литейных способов изготовления композиционных материалов с дискретными наполнителями являются затруднения при введении армирующего наполнителя в расплав, сложность обеспечения равномерного распределения в объеме расплава, возникновение пористости и, как следствие, уменьшение прочности материала. В этом случае информативным параметром контроля качества КМ являются локальные упругие модули материала [5].

Устранить вышеперечисленные недостатки можно, применив методы порошковой металлургии и экструзии. Исследовали структуру и влияние различного количества армирующих частиц SiC (3–7 масс. %) со средним размером 40 мкм на трибологические свойства композиционных материалов на основе сплава баббита Б83, полученных методом экструзии.

Материалы и методы исследования. Смесь порошков для экструзии получали методом механического легирования по технологическим режимам, представленным в табл. 1.

Таблица 1

Состав, режимы обработки и свойства исследуемых образцов

| № обр. | Состав | Режимы механического легирования | Твердость, НВ | Плотность, г/см ³ |
|--------|-------------------|----------------------------------|---------------|------------------------------|
| 1 | Б83 литой | - | 23,6 | 7,39 |
| 2 | Б83 стружка | 300 об/мин, 20 мин | 23,3 | 7,29 |
| 3 | Б83+3 масс. % SiC | 300 об/мин, 30 мин | 25,0 | 7,09 |
| 4 | Б83+5 масс. % SiC | 300 об/мин, 30 мин | 25,4 | 6,84 |
| 5 | Б83+7 масс. % SiC | 300 об/мин, 30 мин | 24,6 | 6,25 |

Навески из смеси порошков засыпали в пресс-форму и подвергали холодному прессованию при усилии 320–340 МПа. Заполненную холодным компактом пресс-форму помещали в муфельную печь, нагревали до температуры 310 ± 10 °С и выдерживали в течение 30 мин, а затем при этой же температуре компакт из композиционной смеси экструдировали на механическом прессе ОМА ($P_{\max} - 15$ т) при усилии 320 ± 5 МПа. Использовали фильеру диаметром 6 мм. Принципиальная схема процесса экструзии представлена на рис. 1.

После экструзии из полученных длинномерных стержней (диаметром 6 мм и длиной 800 мм) готовили образцы для электронной микроскопии, физико-механических и трибологических испытаний. Для измерения упругих модулей применяли лазерный оптико-акустический метод (ЛОАМ), основанный на термооптическом механизме возбуждения широкополосных ультразвуковых импульсов продольных и сдвиговых акустических волн [1] и измерении фазовых скоростей этих волн в исследуемых образцах. Основное преимущество ЛОАМ перед традиционными ультразвуковыми методами заключается в возможности эффективного лазерного возбуждения мощных зондирующих акустических импульсов субмикросекундной длительности. Это позволяет осуществлять диагностику структуры и проводить измерения механических и акустических параметров для сильно поглощающих и рассеивающих ультразвук КМ [9]. Модуль Юнга, модуль сдвига и коэффициент Пуассона для исследуемых образцов КМ рассчитывали по измеренным значениям плотности образцов и фазовых скоростей продольных и сдвиговых акустических волн в этих образцах с

использованием известных соотношений между упругими постоянными и фазовыми скоростями акустических волн для изотропного твердого тела [4]. Принципиальная схема ЛОАМ для измерения фазовой скорости продольных акустических волн схематически показана на рис. 2.

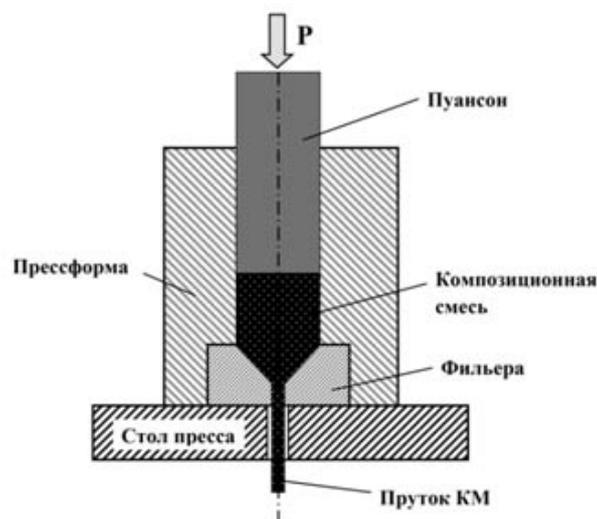


Рис. 1. Принципиальная схема получения композиционных прутков методом экструзии

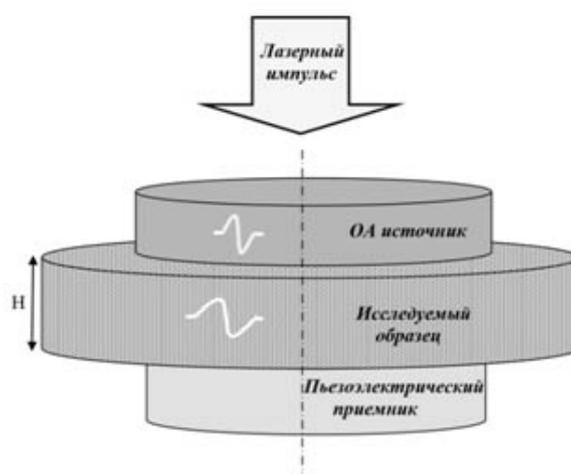


Рис. 2. Принципиальная схема лазерного оптико-акустического метода измерения фазовой скорости продольных акустических волн

Твердость образцов по Бриннелю (НВ) определяли на твердомере Wilson Wolpert при нагрузке 62,5 кг, диаметр шарика 2,5 мм, плотность — методом гидростатического взвешивания.

Для сравнения исследовали образцы баббита Б83 в состоянии поставки и образцы из порошка баббита без наполнителя после экструзии. Составы материалов, их твердость и плотность представлены в табл. 1.

Трибологические испытания образцов КМ проводили в условиях сухого трения скольжения на установке SETR UMT Multi-Specimen Test System по схеме палец (пруток КМ) — диск (сталь 45) при осевых нагрузках 6, 10, 14, 18, 22 Н в течение 10 мин при каждой нагрузке на воздухе при температуре 20 ± 1 °С и влажности 60 ± 4 %. Потерю массы образцов фиксировали после окончания всего цикла испытания взвешиванием на аналитических весах с точностью $\pm 0,5 \times 10^{-3}$ г. Интенсивность изнашивания I_m рассчитывали по формуле: $I_m = \Delta m / L$, где Δm — потеря массы образца; L — путь трения [7].

Результаты и обсуждение. Результаты измерения значений твердости экструдированных прутков свидетельствуют, что при введении высокопрочных керамических частиц карбида кремния твердость КМ имеет тенденцию к увеличению в среднем на 10 %. Плотность КМ, как при введении наполнителя, так и с увеличением его доли уменьшается, поскольку частицы карбида кремния имеют меньшие удельные массовые характеристики ($3,2 \text{ г/см}^3$ по отношению к матричному сплаву баббита Б83 – $7,39 \text{ г/см}^3$).

Результаты анализа поверхности изломов прутков КМ на электронном микроскопе FEI QUANTA 200 3D представлены на рис. 3. Видно, что на поверхности излома литого баббита Б83 присутствуют крупные кристаллы интерметаллида SnSb (рис. 3а). После механической обработки в шаровой мельнице стружки из этого материала и последующей экструзии происходит в результате механического воздействия диспергирование интерметаллидов SnSb (рис. 3б). Образцы КМ, полученные методом экструзии, характеризуются равномерным распределением частиц SiC при сохранении тенденции уменьшения размеров интерметаллидов SnSb, по сравнению с образцом литого баббита Б83 (рис. 3в). Похожие поверхности изломов наблюдались и в образцах № 3 и 5.

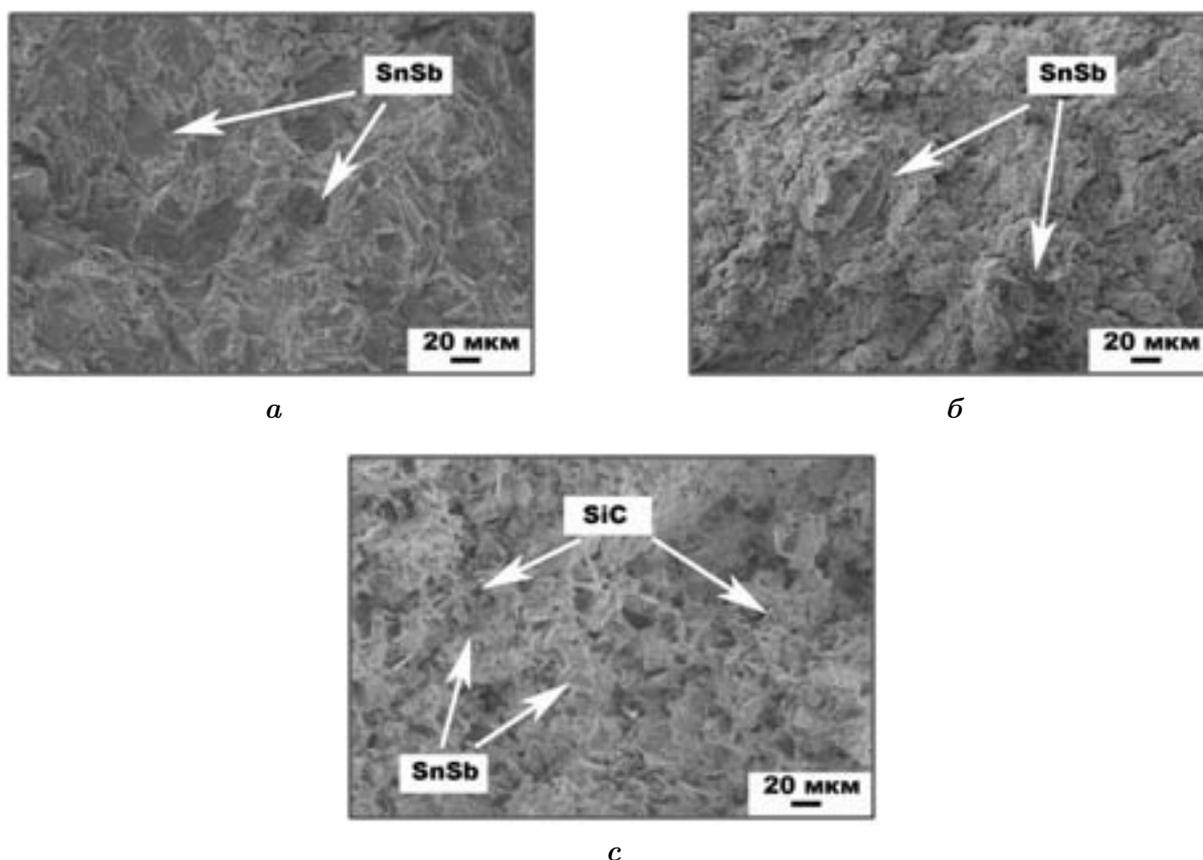


Рис. 3. Поверхности изломов:
а — образец № 1, б — образец № 2, в — образец № 4

Результаты оптико-акустических измерений скоростей ультразвуковых волн и упругих параметров образцов из порошка баббита без наполнителя после экструзии и образцов, армированных высокопрочными частицами SiC, приведены в табл. 2.

Результаты оптико-акустических измерений

| Образец | c_L , м/с | c_S , м/с | E , ГПа | G , ГПа | ν |
|-------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|-------------------|
| Б83 стружка | 3370 ± 17 | 1720 ± 30 | $57,9 \pm 4,6$ | $21,9 \pm 1,5$ | $0,324 \pm 0,016$ |
| Б83+3 масс. % SiC | 3417 ± 17 | 1725 ± 30 | $56,1 \pm 4,5$ | $21,1 \pm 1,5$ | $0,329 \pm 0,016$ |
| Б83+5 масс. % SiC | 3532 ± 18 | 1856 ± 32 | $61,7 \pm 4,9$ | $23,6 \pm 1,6$ | $0,309 \pm 0,015$ |
| Б83+7 масс. % SiC | 3135 ± 16 | 1716 ± 30 | $42,8 \pm 3,4$ | $16,6 \pm 1,2$ | $0,286 \pm 0,014$ |

Видно, что образцы из порошка баббита без наполнителя после экструзии и образцы, армированные высокопрочными частицами SiC в количестве 3 масс. %, имеют соизмеримые значения упругих характеристик. Максимальные упругие характеристики имеют образцы состава Б83+5 масс. % SiC. С увеличением доли армирования до 7 масс. % значения модулей Юнга, сдвига и коэффициента Пуассона значительно понижаются, что объясняется возросшей пористостью КМ из-за затруднений заполнения матричным материалом межчастичного пространства в скоплениях армирующих частиц.

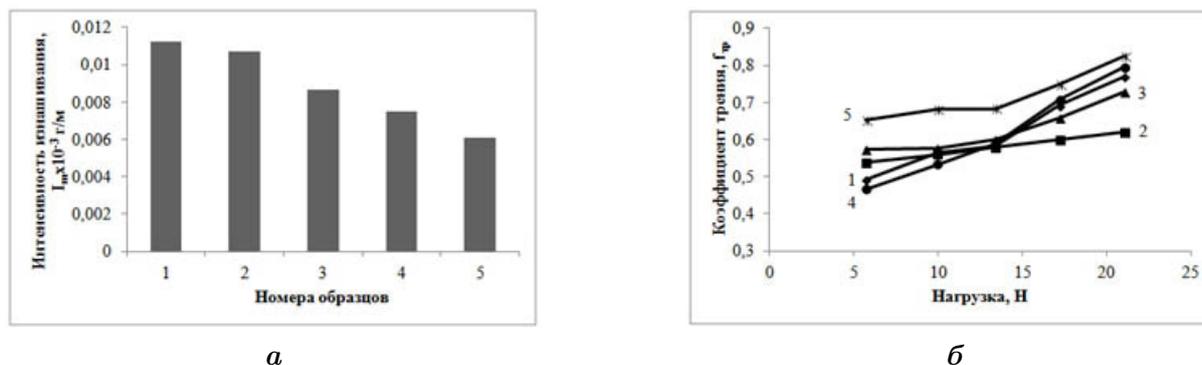


Рис. 4. Интенсивность изнашивания (а) и коэффициент трения в зависимости от нагрузки (б) исследуемых образцов (номера согласно табл. 1)

Из рис. 4а видно, что уменьшение среднего размера интерметаллидов в сплаве Б83 за счет обработки в шаровой мельнице и последующей экструзии позволило снизить интенсивность изнашивания (обр. № 2). Дополнительное введение в состав экструдированных образцов из баббита частиц SiC также приводит к увеличению износостойкости при содержании SiC 3, 5, 7 масс. % соответственно на 23, 33 %, 45 % (обр. 3–5).

В свою очередь коэффициент трения при возрастании нагрузки литого образца (№ 1) выше, чем образца после экструдирования стружки (№ 2) и армированного 3 масс. % SiC (обр. № 3). Это связано с измельчением интерметаллидов и упрочнением частицами SiC этих образцов. Однако увеличение содержания карбида кремния до 7 масс. % приводит к увеличению коэффициента трения, что связано с большим количеством твердой составляющей SiC (рис. 4б).

Заключение. Получены прутки композиционного материала на основе баббита Б83, упрочненного частицами SiC различного процентного содержания. Образцы характеризовались равномерностью распределения армирующего наполнителя. Наилучшие значения по трибологическим свойствам показали образцы состава Б83+3 масс. % SiC (№ 3) и Б83+5 масс. % SiC (№ 4), т. к. соотношение значений коэффициентов трения и интенсивности изнашивания в них наиболее оптимально во всем диапазоне трибонагружения. Прутки этих составов могут быть рекомендованы для использования в качестве присадочных для наплавки на поверхность деталей износостойких антифрикционных слоев.

Список литературы

1. Гусев В. Э., Карабутов А. А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.
2. Калашников И. Е., Болотова Л. К., Чернышова Т. А. Трибологические характеристики литых алюмоматричных композиционных материалов, модифицированных наноразмерными тугоплавкими порошками // Российские нанотехнологии. 2011. Т. 6, № 1–2. С. 135–143.
3. Калашников И. Е., Ковалевский В. В., Чернышова Т. А., Болотова Л. К. Композиционные материалы с наполнителями из шунгитовых пород // Металлы. 2010. № 6. С. 85–95.
4. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975. 872 с.
5. Подымова Н. Б., Карабутов А. А., Павлин С. В., Калашников И. Е., Болотова Л. К., Чернышова Т. А., Кобелева Л. И., Кулибаба В. Ф. Измерение упругих модулей дисперсно-наполненных композиционных материалов лазерным оптико-акустическим методом // ФХОМ. 2011. № 2. С. 78–87.
6. Чернышова Т. А., Михеев Р. С., Калашников И. Е., Акимов И. В., Харламов Е. И. Разработка и апробация композиционных материалов систем Al-SiC, Al-TiC в узлах трения нефтедобывающего оборудования // ФХОМ. 2010. № 5. С. 78–86.
7. Чичинадзе А. В., Берлинер Э. М., Браун Э. Д. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
8. Gongjun Cui, Qinling Bi, Muye Niu, Jun Yang, Weimin Liu. The tribological properties of bronze-SiC-graphite composites under sea water condition // Tribol. Int. 2013. Vol. 60. P. 25–35.
9. Karabutov A. A., Podymova N. B. Quantitative analysis of the influence of voids and delaminations on acoustic attenuation in CFRP composites by the laser-ultrasonic spectroscopy method // Compos. Part B Eng. 2014. Vol. 56. P. 238–244.
10. Moustafa SF, Abdel-Hamid Z, Abd-Elhay AM. Copper matrix SiC and Al₂O₃ particulate composites by powder metallurgy technique // Materials Letters. 2002. Vol. 53. P. 244–249.
11. Ragab KhA Abdel-Karim R, Farag S, El-Raghy SM, Ahmed HA. Influence of SiC, SiO₂ and graphite on corrosive wear of bronze composites subjected to acid rain // Tribology International. 2010. Vol. 43. P. 594–601.
12. Rajkumar K, Aravindan S. Tribological performance of microwave sintered copper-TiC-graphite hybrid composites // Tribology International. 2011. Vol. 44. P. 347–58.
13. Valeeva A. Kh., Valeev I. Sh., Fazlyakhmetov R. F. Effect of structure of B83 babbitt on its wear // J. Frict. Wear. 2014. Vol. 35. № 4. P. 311–315.

References

1. Gusev V. E., Karabutov A. A. Lazernaya optoakustika. M.: Nauka, 1991. 304 s.
2. Kalashnikov I. E., Bolotova L. K., Chernyshova T. A. Tribologicheskie karakteristiki lityh alyumomatrichnyh kompozicionnyh materialov, modifitsirovannyh nanorazmernymi tugoplavkimi poroshkami // Rossijskie nanotekhnologii. 2011. T. 6, № 1–2. S. 135–143.

3. Kalashnikov I. E., Kovalevskij V. V., Chernyshova T. A., Bolotova L. K. Kompozicionnye materialy s napolnitelyami iz shungitovyh porod // *Metally*. 2010. № 6. S. 85–95.
4. Novackij V. *Teoriya uprugosti*. M.: Mir, 1975. 872 s.
5. Podymova N. B., Karabutov A. A., Pavlin S. V., Kalashnikov I. E., Bolotova L. K., Chernyshova T. A., Kobeleva L. I., Kulibaba V. F. Izmerenie uprugih modulej dispersno-napolnennyh kompozicionnyh materialov lazernym optiko-akusticheskim metodom // *Fizika i himiya obrabotki materialov*. 2011. № 2. S. 78–87.
6. Chernyshova T. A., Miheev R. S., Kalashnikov I. E., Akimov I. V., Harlamov E. I. Razrabotka i aprobaciya kompozicionnyh materialov sistem Al-SiC, Al-TiC v uzlah treniya neftedobывayushchego oborudovaniya // *Fizika i himiya obrabotki materialov*. 2010. № 5. S. 78–86.
7. Chichinadze A. V., Berliner E. M., Braun E. D. Trenie, iznos i smazka (tribologiya i tribotekhnika) / pod obshch. red. A.V. Chichinadze. M.: Mashinostroenie, 2003. 576 s.
8. Gongjun Cui, Qinling Bi, Muye Niu, Jun Yang, Weimin Liu. The tribological properties of bronze-SiC-graphite composites under sea water condition // *Tribol. Int.* 2013. Vol. 60. P. 25–35.
9. Karabutov A. A., Podymova N. B. Quantitative analysis of the influence of voids and delaminations on acoustic attenuation in CFRP composites by the laser-ultrasonic spectroscopy method // *Compos. Part B Eng.* 2014. Vol. 56. P. 238–244.
10. Moustafa SF, Abdel-Hamid Z, Abd-Elhay AM. Copper matrix SiC and Al₂O₃ particulate composites by powder metallurgy technique // *Materials Letters*. 2002. Vol. 53. P. 244–249.
11. Ragab KhA Abdel-Karim R, Farag S, El-Raghy SM, Ahmed HA. Influence of SiC, SiO₂ and graphite on corrosive wear of bronze composites subjected to acid rain // *Tribology International*. 2010. Vol. 43. P. 594–601.
12. Rajkumar K, Aravindan S. Tribological performance of microwave sintered copper-TiC-graphite hybrid composites // *Tribology International*. 2011. Vol. 44. P. 347–58.
13. Valeeva A. Kh., Valeev I. Sh., Fazlyakhmetov R. F. Effect of structure of B83 babbitt on its wear // *J. Frict. Wear*. 2014. Vol. 35. № 4. P. 311–315.

Библиографическое описание статьи

Калашников И. Е., Болотова Л. К., Быков П. А., Подымова Н. Б., Забелин С. Ф. Физико-механические и трибологические свойства композиционных материалов на основе сплава системы SnSbCu, полученных методом экструзии // *Ученые записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология*. 2016. Т. 11, № 4. С. 99–106. DOI:10.21209/2308-8761-2016-11-4-99-106.

Reference to article

Kalashnikov I. E. Bolotova L. K., Bykov P. A., Podymova N. B., Zabelin S. F. Physical, Mechanical and Tribological Properties of Composite Materials based on SnSbCu Alloy Manufactured by the Extrusion Method // *Scholarly Notes Of Transbaikal State University. Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology*. 2016. Vol. 11, No 4. P. 99–106. DOI:10.21209/2308-8761-2016-11-4-99-106.

Статья поступила в редакцию 15.05.2016