

STUDYING THE PHYSICAL PROCESSES OF FORMING THE ADHESIVE STRENGTH OF BIMETALLIC BEARING FOR MARINE ENGINEERING

R. V. Kuznetsov¹, E. O. Olkhovik²

¹ — PJSC, Zvezda, St. Petersburg, Russian Federation

² — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The results of a metallographic analysis of a bimetallic bearing assembly for hull parts of marine engineering are presented in the paper. The adhesive properties at the Al-Fe metal boundary are poorly studied at present; the physical processes of strength formation are very heterogeneous and depend on the parameters of the technological process. The samples obtained by stamping a commercial liquid Al-Si-Mg alloy in the presence of powder bush from a pure iron with 15 percent volume porosity have been studied in the paper. Metallographic analysis is performed using a Carl Zeiss Axiovert 200 MAT motorized optical microscope equipped with a Thixomet Pro image analyzer. Samples with different levels of adhesive strength, from unsatisfactory to the highest values, are selected for the research. The strength value correlates well with technological parameters such as stamping pressure and the temperature of preheating of the forming rigging. However, it was found that the mechanisms of Al and Fe compound are different. At low stamping pressures and poor adhesion strength of the compound, the main reason for the lack of contact at the metal boundary is a strong temperature gradient and various rates of shrinkage processes that sever the contact zone. Under conditions of medium stamping pressures, liquid aluminum destroys the ferrite network of the powder bush and penetrates into free pores to a depth of 1-2 mm, forming a high-quality adhesive compound. The bimetal boundary zone has a high density, finely dispersed structure of aluminum without traces of graphite, and the powder bush contains all the signs of secondary crystallization in the form of network structure of a ferrite. Under conditions of high stamping pressures, liquid aluminum interacts with iron, forming metastable intermetallic phases at the metal interface, while aluminum also penetrates into the pores of the ferrite network. The presence of intermetallic compounds increases the adhesive strength of the compound. New physical principles aimed at finalizing the technology for obtaining the bimetallic bearing of marine engineering at the stage of obtaining a workpiece have been identified and disclosed.

Keywords: bimetallic bearing, metallographic analysis, marine engineering, adhesive strength.

For citation:

Kuznetsov, Ruslan V., and Evgeniy O. Olkhovik. "Studying the physical processes of forming the adhesive strength of bimetallic bearing for marine engineering." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 902–909. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-902-909.

УДК 621.77

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА ДЛЯ СУДОВОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Р. В. Кузнецов¹, Е. О. Ольховик²

¹ — ПАО «Звезда», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В данном исследовании приводятся результаты металлографического анализа биметаллического подшипникового узла для корпусных деталей судового машиностроения. Отмечается, что в настоящее время адгезионные свойства на границе металлов Al-Fe слабо изучены, физические процессы формирования прочности весьма разнородны и зависят от параметров технологического процесса. В работе изучены

образцы, полученные методом штамповки коммерческого жидкого сплава АК9ч при наличии порошковой втулки из чистого железа с 15-процентной объемной пористостью. Металлографический анализ проводился с помощью моторизованного оптического микроскопа Carl Zeiss Axiovert 200 MAT, оснащенного анализатором изображений Thixomet Pro. Для исследований были отобраны образцы с различным уровнем адгезионной прочности — от неудовлетворительной до самых высоких значений. Значение прочности хорошо коррелировалось с такими технологическими параметрами, как давление штамповки и температура предварительного нагрева формообразующей оснастки. Однако, как было установлено, механизмы соединения Al и Fe были различными. При низких давлениях штамповки и неудовлетворительной адгезионной прочности соединения основной причиной отсутствия контакта на границе металлов наблюдался сильный температурный градиент и различные скорости усадочных процессов, которые разорвали зону контакта. В условиях средних давлений штамповки жидкий алюминий разрушает ферритную сетку порошковой втулки, проникая в свободные поры на глубину в 1–2 мм, образуя при этом качественное адгезионное соединение. Зона границы биметаллов имеет высокую плотность, мелкодисперсное строение алюминия без следов графита, а порошковая втулка содержит все признаки вторичной кристаллизации в виде сеточной структуры феррита. В условиях высоких давлений штамповки жидкий алюминий взаимодействует с железом, образуя метастабильные интерметаллидные фазы на границе раздела металлов, при этом также происходит проникновение алюминия в поры ферритной сетки. Наличие интерметаллидов увеличивает адгезионную прочность соединения. В работе были выявлены и раскрыты новые физические принципы, направленные на доработку технологии получения биметаллического подшипника судового машиностроения на этапе заготовительного производства.

Ключевые слова: биметаллический подшипник, металлографический анализ, судовое машиностроение, адгезионная прочность.

Для цитирования:

Кузнецов Р. В. Исследование физических процессов формирования адгезионной прочности биметаллического подшипника для судового машиностроения / Р. В. Кузнецов, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 902–909. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-902-909.

Введение (Introduction)

Согласно Указу Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642 [1] «О стратегии научно-технологического развития РФ на долгосрочный период» приоритетами развития являются направления, которые позволят в ближайшем будущем получить новые научные и научно-технические результаты в области интеллектуальных производственных технологий, новых материалов и способов конструирования современных машин и механизмов.

Развитие современного судового машиностроения в ближайшие десятилетия будет определяться следующими факторами:

- развитие новых производственных технологий;
- развитие прикладных наук в области проектирования машин и механизмов;
- более широкое применение композиционных материалов.

В существующих изделиях судового машиностроения (насосы, клапаны, гидравлические установки, распределители и т. п., корпуса которых изготовлены из коммерческих алюминиевых сплавов), большая часть подшипников скольжения и втулок изготавливается из цветных сплавов, к которым относятся баббиты, бронзы, латуни или специальные сплавы на основе меди. Очевидно, что данные материалы «работают» на пределе своих эксплуатационных возможностей, а их наиболее актуальной альтернативой являются композиционные материалы, в том числе порошковые.

Постоянное расширение области применения и, как следствие, увеличение объема производимых биметаллических изделий, в значительной мере, становится возможным благодаря появлению новых технологий «сращивания» разнородных материалов. Соединения алюминия и железа известны в технике [2]–[4], в том числе металлургические или полученные в результате специальных способов сварки. Они обладают рядом технологических сложностей при производстве, а отдельные физические явления практически не изучены (например, воздействие механического давления в процессе затвердевания алюминия для увеличения свойств адгезии).

Ранее проведенные исследования, направленные на разработку экспериментальной установки [5], [6] и основ технологии [7], [8] штамповки жидкого алюминия при наличии порошковой втулки, показали работоспособность данной технологии [9], в результате чего был достигнут качественный результат в виде высоких адгезионных свойств на границе алюминий – порошковый материал. Однако поскольку непосредственно технологический процесс формирования адгезионной прочности и его физические составляющие не были подробно изучены, этому вопросу посвящена данная работа.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В данной работе в качестве материалов исследований использовались экспериментальные заготовки для биметаллического подшипникового узла, полученного методом штамповки жидкого алюминиевого сплава АК9ч (металл основы — табл. 1) и порошковой втулки из АНС100.29 (материал подшипника — табл. 2). Всего для исследований было отобрано пять образцов, полученных в различных технологических условиях, отличающихся значениями давления штамповки жидкого металла (рис. 1). При изготовлении порошковой втулки соблюдался следующий технологический режим: давление прессования — 300 МПа, температура спекания — $1150 \pm 10^\circ\text{C}$, величина объемной пористости — 15 % (определялась штамповой оснасткой).

Таблица 1

Химический состав сплава АК9ч (ГОСТ 1583–93)

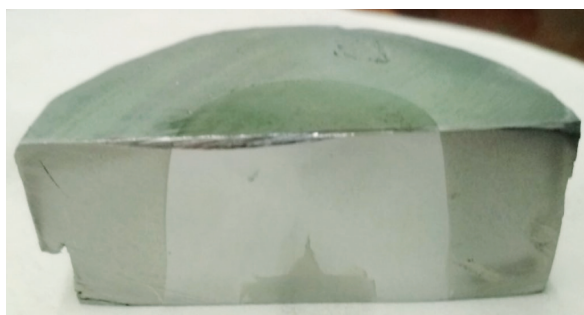
Al, %	Si, %	Mn, %	Mg, %	Fe, %	Cu, %	Zn, %	Ni, %	Be, %	Pb, %	Sn, %	Примесей, %
86,94–91,63	8–10,5	0,2–0,5	0,17–0,3	до 1	до 0,3	до 0,3	до 0,1	до 0,1	до 0,05	до 0,01	всего 1,5

Таблица 2

Химический состав в % порошка АНС100.29

Fe, %	C, %	Окислы, %
Основной	0,024	0,17

а)



б)



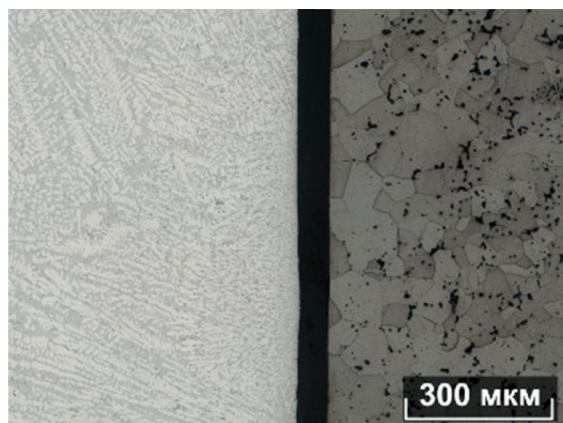
Рис. 1. Экспериментальный образец биметаллического подшипникового узла:
а — давление штамповки 50 МПа; б — давление штамповки 90 МПа

Металлографический анализ проводился с помощью моторизованного оптического микроскопа Carl Zeiss Axiovert 200 MAT, оснащенного анализатором изображений Thixomet Pro.

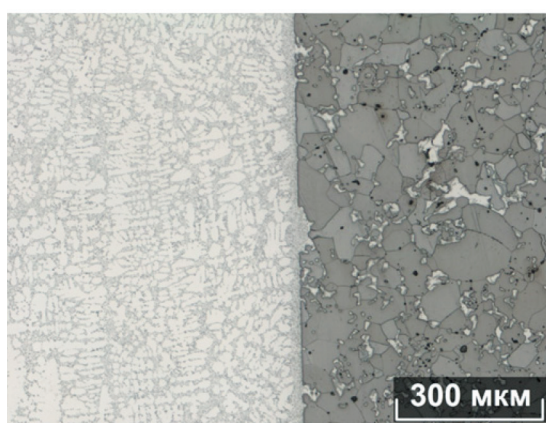
Результаты (Results)

По образцу № 1 (температура разогрева штамповой оснастки (500 ± 50) °С температура выпуска металла (АК9ч) из печи, температура заливки (750 ± 20) °С, усилие прессования $P = 17$ МПа), взаимодействие в зоне контакта отсутствует, адгезионная прочность неудовлетворительная (отсутствует) — рис. 2, *а*. Наблюдаются только частичные пятна контакта на границе АЛ – Fe. Из макростроения образца очевидно, что затвердевание алюминиевого сплава происходило отдельно, без взаимодействия с порошковым материалом.

а)



б)



в)



г)

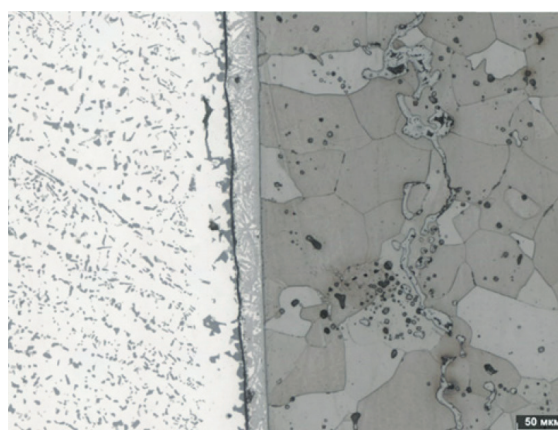


Рис. 2. Микроструктурный анализ экспериментальных образцов:
а — № 1 на границе Al-Fe; *б* — № 2 на границе Al-Fe; *в* — № 3 на границе Al-Fe (300 мкм);
г — № 3 на границе Al-Fe (50 мкм)

Структура сплава АК9ч в окрестности зоны контакта с порошковым материалом АНС100.29 резко изменяется, переходя от плотной мелкодисперсной к более грубой. Дендриты твердого раствора столбчатые, их дисперсность повышается по мере приближения к зоне контакта, что свидетельствует о направленном характере затвердевания и существенном тепловом градиенте [10], без постоянного контакта двух материалов. Частицы эвтектического кремния в зоне контакта мелкодисперсные, сфероидизированные. По мере удаления от зоны контакта они незначительно огрубляются, присутствуют интерметаллиды железосодержащей β -фазы размером до 15 мкм.

Структура порошковой втулки представляет собой ферритное зерно, внутри и по границам которого располагаются поры диаметром до 50 мкм. Поверхность пор не окислена, следы проникновения силумина в них отсутствуют. Объемная доля пор снижается по мере приближения к поверхности основы. Данный образец является характерным для технологии гравитационного литья или литья под низким давлением. Отсутствие полного контакта на границе Al – Fe объясняется различной температурной усадкой материалов при недостатке давления штамповки жидкого металла.

По образцу № 2 (температура штамповой оснастки (500 ± 50) °С температура выпуска металла из печи (температура заливки) составляет (750 ± 20) °С, усилие прессования $P = 50$ МПа) — рис. 2, б. Присутствует ярко выраженное взаимодействие материала основы и порошкового материала, наблюдается проникновение алюминиевого сплава в поры на глубину свыше 1 мм.

Структура силумина в окрестности зоны контакта изменена. Дендриты в окрестности зоны контакта разориентированные, частицы эвтектического кремния мелкодисперсные, сфероидизированные, их размер непосредственно в зоне контакта субмикронный. По мере удаления от зоны контакта дендритная структура становится столбчатой, частицы кремния остаются сфероидизированными, но их размер повышается, отдельные частицы имеют размер 10–12 мкм. Железосодержащие интерметаллиды в алюминиевой основе практически отсутствуют.

Структура порошковой втулки также представляет собой ферритное зерно, внутри и по границам которого располагаются крупные поры размером более 200 мкм, создающие непрерывную сеть. Все крупные поры втулки полностью заполнены алюминием. Граница сталь–алюминий внутри пор полностью покрыта интерметаллидами, вероятно, системы AlFeSi. Объемная доля пор снижается по мере удаления от зоны контакта.

По образцу № 3 порошковая втулка была предварительно оцинкована горячим способом с толщиной покрытия цинка 3–6 мкм. Параметры технологического процесса жидкой штамповки: температура штамповой оснастки равна (700 ± 50) °С, температура выпуска металла из печи (температура заливки) составляет (750 ± 20) °С, усилие прессования $P = 100$ МПа [11], [12]. На границе контакта металлов (рис. 2, в и г) оксидные пленки отсутствуют, имеется ярко выраженный интерметаллидный слой, наблюдается хорошая смачиваемость. Для данного образца также был выявлен высокий уровень адгезионной прочности.

Структура силумина мелкодисперсная, плотная, так же, как и в образце № 2, наблюдается проникновение алюминия в поры ферритной сетки порошковой втулки, структура которой выглядит более деформированной, наблюдаются частицы эвтектического кремния. Толщина интерметаллидного слоя является равномерной по всей границе контакта и имеет четкую структуру как со стороны алюминия, так и со стороны железа.

Обсуждение (Discussion)

Сравнивая собственные результаты с данными, полученными из официальных источников, можно сделать вывод о том, что создание устойчивого адгезионного соединения Al-Fe при использовании традиционных технологий гравитационного литья или литья под низким давлением — весьма спорный вопрос, поскольку недостаток давления при наличии температурного градиента металла основы (алюминий) и порошкового материала (Fe) в любом случае приводит к различной объемной усадке материалов и, как следствие, к отсутствию контакта между ними. Возможно, что при использовании такого технологического приема, как разогрев штамповой оснастки и порошкового материала до температуры, близкой к температуре ликвидуса алюминиевого сплава, произойдет «схватывание» на границе Al-Fe, но, по нашему мнению, для этого требуется значительное время — несколько минут, что можно обеспечить только для заготовок массой в несколько килограмм. Механизм формирования адгезионной прочности в этом случае, по нашему мнению, будет близок к диффузионному.

В работе [13] авторами было обнаружено, что в области температур 250–350 °С формируется метастабильная фаза Al_6Fe , а при температуре 300–500 °С данная фаза распадается с образованием стабильной фазы Al_3Fe . Такой структурный механизм объясняется перенасыщенностью твердого α -раствора. В работе [14], где также рассматриваются результаты механического легирования при деформации сплавов $AlFe$, выявлено, что распад метастабильных интерметаллидов $AlFe$ при объемной деформации приводит к увеличению упругих свойств биметалла.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Создание избыточного давления штамповки основного металла является новым технологическим приемом для коммерческих сплавов АК9ч, позволяющим создать высокие адгезионные свойства с пористыми материалами на этапе заготовительного производства.
2. Основной физический процесс формирования высокой адгезионной прочности на границе Fe – Al — это проникновение жидкого алюминия в поры порошковых материалов (для железа — ферритной сетки) под действием давления.
3. Дополнительным фактором повышения адгезионной прочности биметалла является формирование интерметаллидных фаз Al_3Fe , образующихся при высоком давлении путем распада метастабильных перенасыщенных интерметаллидов.
4. Предварительное алитирование или горячее цинкование железных порошковых материалов также способствует формированию высоких адгезионных свойств на границе алюминий – железо.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://kremlin.ru/acts/bank/41449> (дата обращения: 29.09.2019).
2. Zhang X. M. Microstructure and Bonding Strength of Aluminum Bronze on ASTM 1045 Steel by CMT welding / X. M. Zhang, K. Sun, X. H. Gong, C. M. Jiang, J. Zhou, F. Xue // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 436. — Is. 1. — Pp. 012019. DOI: 10.1088/1757-899X/436/1/012019
3. Хромов В. Н. Технология и оснастка для изготовления биметаллического подшипника скольжения / В. Н. Хромов, В. Н. Корнев, А. Ю. Родичев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2010. — № 1 (279). — С. 45–49.
4. Жигулев И. О. Штамповка биметаллических изделий из сплавов на основе алюминия и железа в процессе кристаллизации алюминиевых сплавов: автореф.... канд. техн. наук / Илья Олегович Жигулев. — Уфа, 2005. — 18 с.
5. Кузнецов Р. В. Штамповка биметаллических подшипников из жидкого алюминия и спеченных порошковых вкладышей / Р. В. Кузнецов, П. А. Кузнецов // Металлообработка. — 2019. — № 3 (111). — С. 27–31.
6. Кузнецов Р. В. Экспериментальный стенд для исследования совместной штамповки жидкого металла и спеченного материала / Р. В. Кузнецов, А. В. Гоциридзе, М. С. Литвинов // Тезисы научно-практической конференции с международным участием «Неделя науки СПбГПУ». — СПб., 2018. — С. 255–258.
7. Кузнецов Р. В. Технология получения антифрикционных биметаллических заготовок методом штамповки жидкого металла / Р. В. Кузнецов, М. М. Радкевич // Современное машиностроение. Наука и образование. — 2016. — № 5. — С. 1142–1149. DOI: 10.1872/MMF-2016-105.
8. Кузнецов Р. В. Исследование технологических возможностей горячей объемной штамповки точной заготовки из литейных медных сплавов / Р. В. Кузнецов, П. А. Кузнецов, А. В. Гоциридзе, К. В. Мартынов // Неделя науки СПбПУ: Материалы научного форума с международным участием. — СПб., 2015. — С. 205–208.
9. Пат. 2696164. Российская Федерация, МПК B22D 18/02, B32B 15/00. Способ получения биметаллических изделий штамповкой жидкого металла / Р. В. Кузнецов, М. М. Радкевич, П. А. Кузнецов; заяв. и патентообл. ФГАОУ ВО «СПбПУ». — № 2018143515; заявл. 08.12.2018; опубл. 31.07.2019, Бюл. № 22.

10. Wei M. Microstructure and bonding strength of tin-based Babbitt alloy on ASTM 1045 steel by MIG arc brazing / M. Wei, K. Sun, X. Zhang, C. Zhang, Z. Chen, J. Zhou, F. Xue // *Journal of Adhesion Science and Technology*. — 2018. — Vol. 32. — Is. 19. — С. 2150–2161. DOI: 10.1080/01694243.2018.1464239.
11. Murray P. J. Hot isostatic pressing for the production of bimetallic fuel pump bearings: Diss. / P. J. Murray. — University of Birmingham, 2016.
12. Сосенушкин Е. Н. Технологические режимы жидкой штамповки алюминиевого сплава АК7 / Е. Н. Сосенушкин, Е. А. Яновская, К. Н. Иванов, Т. А. Кинжаев // *Цветные металлы*. — 2018. — № 11. — С. 83–88. DOI: 10.17580/tsm.2018.11.12
13. Ташлыкова-Бушкевич И. И. Структурный и фазовый анализ быстрозатвердевших сплавов Al Fe / И. И. Ташлыкова-Бушкевич, Е. С. Гутько, В. Г. Шепелевич, С. М. Барайшук // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. — 2008. — № 4. — С. 69–75.
14. Добромислов А. В. Структура сплавов системы Al-Fe, изготовленных разными методами, после интенсивной пластической деформации под давлением / А. В. Добромислов, Н. И. Талуц // *Физика металлов и металловедение*. — 2017. — Т. 118. — № 6. — С. 595–602. DOI: 10.7868/S001532301706002X.

REFERENCES

1. Ukaz Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 01.12.2016 g. № 642 «O Strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii». Web. 29 Sept. 2019 <<http://kremlin.ru/acts/bank/41449>>.
2. Zhang, X. M., K. Sun, X. H. Gong, C. M. Jiang, J. Zhou, and F. Xue. “Microstructure and Bonding Strength of Aluminum Bronze on ASTM 1045 Steel by CMT welding.” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 436. No. 1. IOP Publishing, 2018. 012019. DOI: 10.1088/1757-899X/436/1/012019
3. Chromov, V. N., V. N. Korenev, and A. U. Rodichev. “Technology and equipment for manufacturing of the bimetallic friction bearing.” *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* 1(279) (2010): 45–49.
4. Zhigulev, I. O. Shtampovka bimetallicheskich izdelii iz splavov na osnove alyuminiya i zheleza v protsesse kristallizatsii alyuminievyykh splavov. Abstract of PhD diss. Ufa, 2005.
5. Kuznetsov, Ruslan Valer'yevich, and Pavel Alekseevich Kuznetsov. “Stamping of bimetallic bearings from liquid aluminum and sintered powder deposits.” *Metalloobrabotka* 3(111) (2019): 27–31.
6. Kuznetsov, R. V., A. V. Gotsiridze, and M. S. Litvinov. “Eksperimental'nyi stend dlya issledovaniya sovmestnoi shtampovki zhidkogo metalla i spechennogo materiala.” *Tezisy nauchno-prakticheskoi konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem “Nedelya nauki SPbGPU”*. SPb., 2018. 255–258.
7. Kuznetsov, R. V., and M.M. Radkevich. “Tekhnologiya polucheniya antifriktsionnykh bimetallicheskich zagotovok metodom shtampovki zhidkogo metalla.” *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie* 5 (2016): 1142–1149.
8. Kuznetsov, R. V., P. A. Kuznetsov, A. V. Gotsiridze, and K. V. Martynov. “Issledovanie tekhnologicheskikh vozmozhnostei goryachei ob'emnoi shtampovki tochnoi zagotovki iz liteinykh mednykh splavov.” *Nedelya nauki SPbPU: Materialy nauchnogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem*. SPb., 2015. 205–208.
9. Kuznetsov, R. V., M. M. Radkevich, and P. A. Kuznetsov. RU 2 696 164 C1, IPC B22D 18/02, B32B 15/00. Sposob polucheniya bimetallicheskich izdelii shtampovkoi zhidkogo metalla. Russian Federation, assignee. Publ. 31 July 2019.
10. Wei, Mingzhen, K. Sun, X. Zhang, C. Zhang, Z. Chen, J. Zhou, and F. Xue. “Microstructure and bonding strength of tin-based Babbitt alloy on ASTM 1045 steel by MIG arc brazing.” *Journal of Adhesion Science and Technology* 32.19 (2018): 2150–2161. DOI: 10.1080/01694243.2018.1464239.
11. Murray, P. J. Hot isostatic pressing for the production of bimetallic fuel pump bearings. University of Birmingham, 2016.
12. Sosenushkin, E. N., E. A. Yanovskaya, K. N. Ivanov, and T. A. Kinzhaev. “Liquid forging regimes for AK7 aluminium alloy.” *Tsvetnye Metally* 11 (2018): 83–88. DOI: 10.17580/tsm.2018.11.12.
13. Tashlykova-Bushkevich, I.I., E. S. Gut'ko, V.G. Shepelevich, and S.M. Baraishuk. “Structure and Phase Analysis of Rapidly Solidified Al-Fe Alloys.” *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques* 4 (2008): 69–75.
14. Dobromyslov, A. V., and N. I. Taluts. “Structure of Al-Fe alloys prepared by different methods after severe plastic deformation under pressure.” *The Physics of Metals and Metallography* 118.6 (2017): 564–571. DOI: 10.1134/S0031918X17060023.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Руслан Валерьевич —

заместитель главного металлурга

ПАО «Звезда»

192012, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Бабушкина, 123

e-mail: Spaun1605@rambler.ru

Ольховик Евгений Олегович —

кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: olhovikeo@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov, Ruslan V. —

Deputy Chief Metallurgist

PJSC, Zvezda

123 Babushkina Str., St. Petersburg, 192012,
Russian Federation

e-mail: Spaun1605@rambler.ru

Olhovik, Evgeniy O. —

PhD, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: olhovikeo@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 18 октября 2019 г.

Received: October 18, 2019.