

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1107-1114

EXPERIMENTAL STUDY OF THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF BIMETALLIC BEARING MATERIALS 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 subject of the study is the thermophysical properties of the Al-Fe bimetallic compound obtained by the joint stamping method of liquid metal. The object of the study is the corpus products of marine engineering, which are pumps and hydraulic equipment from commercial Al-Si-Mg alloy with bearing bushings obtained from sintered powder iron. The creation of equipment, laboratory and methodological foundations for the study of thermal processes in the formation of Al-Fe bimetallic compound under stamping pressure is considered in the paper. The method of differential thermal analysis is selected as the main laboratory method for studying thermal processes in the manufacture of a bimetallic compound by liquid metal stamping method, because it provides a relevant study of the temperature parameters of the technological process. The essence of the method is to measure the temperature of the solidifying aluminum alloy, powder bush and technological rigging during the formation of the bimetallic compound. A set of thermocouples, special digital drivers and a microcontroller, which transfers all the information for storage and analysis to a personal computer with a resolution of 1 second, are used to implement the measurements. Several thermal graphs that corresponded to various technological parameters (temperature, pressure) are obtained in the experiments. Comparison with the results of similar studies has showed that a stable adhesive compound is formed due to the mechanical interdiffusion of metals and filling of the bulk pores in the powder bush with liquid aluminum or due to the formation of a thin diffusion zone, followed by the implementation of a metallurgical compound. The various thermal regimes of the bimetallic compound solidification are investigated at the developed laboratory setup; it has been revealed that the stamping pressure significantly affects the formation of contact between metals, and allows creating a stable adhesive connection.

Keywords: marine engineering, Al-Fe bimetallic alloy, thermophysical properties, differential thermal analysis.

For citation:

Kuznetsov, Ruslan V., and Evgeniy O. Olkhovik. "Experimental study of the thermophysical properties of bimetallic bearing materials for marine engineering." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1107–1114. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1107-1114.

УДК 621.77

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ 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

Предметом исследования являются теплофизические свойства биметаллического соединения Al-Fe, получаемого методом совместной штамповки жидкого металла. Объектом исследования являются корпусные изделия судового машиностроения — насосы и гидравлическое оборудование из коммерческого алюминиевого сплава АК9ч с подшипниковыми втулками, полученными из спеченного порошкового железа. В статье рассматривается создание техники, лабораторных и методических основ для изучения тепловых процессов при формировании биметаллического соединения Al-Fe в условиях давления штамповки. Основным лабораторным методом для исследования тепловых процессов при изготовлении биметаллического соединения

методом штамповки жидкого металла был выбран метод дифференциального термического анализа, обеспечивающий релевантное изучение температурных параметров технологического процесса. Суть метода заключалась в измерении температуры затвердевающего алюминиевого сплава, порошковой втулки и технологической оснастки в период формирования биметаллического соединения. Для реализации измерений использовался набор термпар, специальные цифровые драйверы и микроконтроллер, который передавал всю информацию для хранения и анализа в персональный компьютер с дискретностью в 1 с. В экспериментах было получено несколько термических кривых, которые соответствовали различным технологическим параметрам (температура, давление). Сравнение с результатами подобных исследований показало, что устойчивое адгезионное соединение формируется или за счет механического перемешивания металлов и заполнения объемных пор в порошковой втулке жидким алюминием, или за счет образования тонкой диффузионной зоны с последующей реализацией металлургического соединения. На разработанной лабораторной установке были исследованы различные тепловые режимы затвердевания биметаллического соединения и выявлено, что давление штамповки оказывает существенное влияние на формирование контакта между металлами, позволяя создать устойчивое адгезионное соединение.

Ключевые слова: судовое машиностроение, биметаллический сплав Al-Fe, теплофизические свойства, дифференциальный термический анализ.

Для цитирования:

Кузнецов Р. В. Экспериментальное исследование теплофизических свойств материалов 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. — № 6. — С. 1107–1114. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1107-1114.

Введение (Introduction)

Разработка и технологическое проектирование производства биметаллических изделий для судового машиностроения — новая научная задача, не имеющая в настоящее время полного решения. Синтез сплавов на основе алюминия и железа — достаточно известная научная область [1] с применением современных технологий их получения, в том числе способом трехмерной печати (аддитивные технологии) [2], методом послойного лазерного спекания и заготовительными технологиями тиксолитья [3], реолитья [4] и др. Однако существенным недостатком таких технологий является необходимость использования специально подготовленных сплавов или порошковых материалов, заготовка и производство которых является отдельной отраслью. Применение коммерческих алюминиевых и железных сплавов в данных технологиях невозможно, что существенно ограничивает коммерческую привлекательность готовых изделий судового машиностроения.

В работах [5]–[8] предложены различные технологии получения биметаллического соединения Al-Fe на этапе заготовительного производства — это совместная плавка [5], магнитно-импульсная [6] и контактная [7] сварка, штамповка жидкого металла [8], металлматричные технологии [9] с дисперсионным упрочнением и др. Во всех вариантах технологий главной задачей является создание соединения с высокой адгезионной прочностью на границе двух металлов, как показано в работе [8]. Структурный механизм такого соединения может быть вариативным, от механического перемешивания и взаимного проникновения до химического взаимодействия металлов с образованием интерметаллидных фаз.

Предметом исследования являются теплофизические свойства биметаллического сплава Al-Fe, получаемого методом совместной штамповки жидкого металла. Объектом исследования являются корпусные изделия судового машиностроения — насосы и гидравлическое оборудование из коммерческого алюминиевого сплава АК9ч с подшипниковыми втулками, полученными из спеченного порошкового железа АНС 100.29.

Основными параметрами технологического процесса получения биметаллического соединения Al-Fe являются температурные поля, формирующиеся как в металлах, так и в технологической оснастке при затвердевании основного металла.

Целью работы является создание техники, лабораторных и методических основ для изучения тепловых процессов при формировании биметаллического соединения Al-Fe при использовании метода штамповки жидкого металла.

Измеренные температурные условия затвердевания алюминиевого сплава АК9ч в условиях контакта с порошковой заготовкой из железа и при воздействии давления позволят выявить технологические параметры процесса изготовления биметаллического подшипника для корпусов насоса и другого гидравлического оборудования для судового машиностроения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В данной работе в качестве материала основы (основного металла в биметаллическом соединении) использовался коммерческий алюминиевый сплав АК9ч (Al — 87–91 %; Si — 8–10 %; Fe — до 1 %; остальные элементы < 3 %), а в качестве материала подшипника — АНС100.29 (Fe — основа; С — не более 0,025 %, окислы — не более 0,2 %) — порошковый материал, предварительно спрессованный в цилиндрическую заготовку диаметром 20–50 мм и высотой до 50 мм, пористость втулки — 15 %.

Выполненный анализ библиографических источников не выявил подробных данных о теплофизических свойствах сплавов Al-Fe, порошкового материала АНС 100.29 и интерметаллидов AlFe. Поэтому в качестве предварительных данных было принято, что основные теплофизические свойства биметалла (теплоемкость, теплопроводность и плотность) близки к свойствам сплава АК9ч. Также следует отметить, что теплофизические свойства исходного порошкового материала АНС 100.29 плохо изучены, производители порошков предлагают только примерные модельные данные, которые могут значительно отличаться в зависимости от технологии изготовления (прессования и спекания) заготовки и от ее конечной плотности (пористости). Можно предположить, что конечные теплофизические свойства спеченной порошковой втулки близки к свойствам чистого железа. Так, теплоемкость чистого железа как основного материала биметаллической заготовки по имеющимся данным может значительно изменяться от 0,3 до 0,7 [кДж/(кг·К)], т. е. более чем в 2 раза в диапазоне температур от комнатной до температуры жидкого алюминия. Теплопроводность чистого железа также изменяется от 80 до 40 [Вт/(м·К)] в диапазоне температуры затвердевания алюминиевого сплава АК9ч. Воздействие давления [10] положительно сказывается на конечных свойствах литых алюминиевых сплавов — происходит повышение плотности строения детали, отсутствует усадочная и газовая пористость, измельчается структура и, как результат, повышаются механические свойства и конструктивная прочность изделия.

Основным лабораторным методом исследования тепловых процессов при изготовлении биметаллического соединения методом штамповки жидкого металла был выбран *метод дифференциального термического анализа*, поскольку он обеспечивает релевантное изучение температурных параметров технологического процесса. Непосредственно методика заключалась в определении изменения температуры основного материала (алюминиевый сплав АК9ч) и материала порошковой заготовки в процессе получения биметаллического соединения.

Измерение температуры проводили с помощью специально разработанной лабораторной установки (рис. 1), измерительная часть которой включала: микроконтроллер Arduino Nano, два цифровых драйвера термодпары МАХ6675 и две термодпары типа ТХА (ГОСТ 8.585–2001) с диаметром сая электродов 0,5 мм — рис. 2. При необходимости количество драйверов и термодпар может быть увеличено до четырех. Диапазон измеряемых лабораторной установкой температур от –40 до +1000 °С. Измерение температуры производилось термодпарами с периодом в 1 с и через драйверы передавалось на микроконтроллер, а далее по интерфейсу на персональный компьютер для хранения в текстовом формате *.csv (*.txt), обработка которого возможна средствами программного обеспечения Microsoft Excel.

Методика проведения эксперимента включала несколько этапов. Для проведения штамповки жидкого алюминия использовалась неразъемная металлическая матрица с внутренним диаметром 61 мм и высотой $H = 60$ мм. В качестве материала основы использовали литейный доэвтектический силумин марки АК9ч (ГОСТ1583–93). В качестве заготовки подшипника использовали цилиндрическую заготовку диаметром 25 и $h = 24,5$ мм из порошкового материала АНС100.29 предварительно спрессованного с объемной пористостью в 15 %. Термодпара № 1 помещалась в центр

порошковой заготовки, термопара № 2, обработанная противопригарным составом (жидкое стекло и мелкая фракция оксидов кремния) фиксировала температуру на расстоянии $2/3$ внутреннего радиуса матрицы. При необходимости расположение термопар можно изменить, а их количество увеличить.

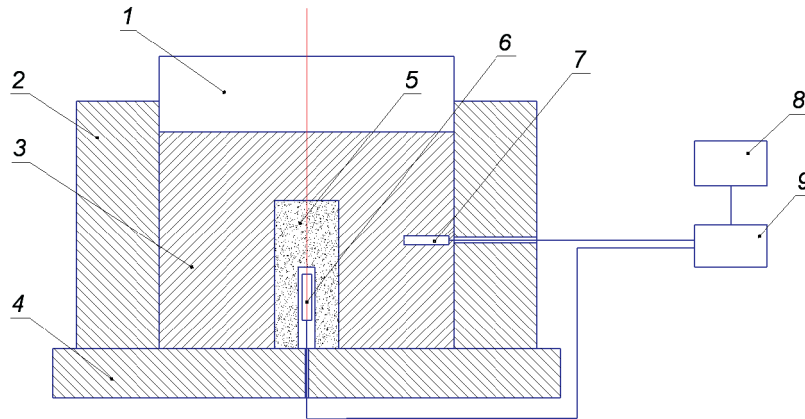


Рис. 1. Разработанная лабораторная установка для исследования тепловых параметров технологического процесса при изготовлении биметаллических заготовок в процессе штамповки жидкого металла методом дифференциального термического анализа: 1 — пуансон; 2 — неразъемная матрица; 3 — жидкий металл (АК94); 4 — нижняя плита; 5 — порошковая заготовка; 6, 7 — термопары; 8 — ПК; 9 — модуль сбора данных

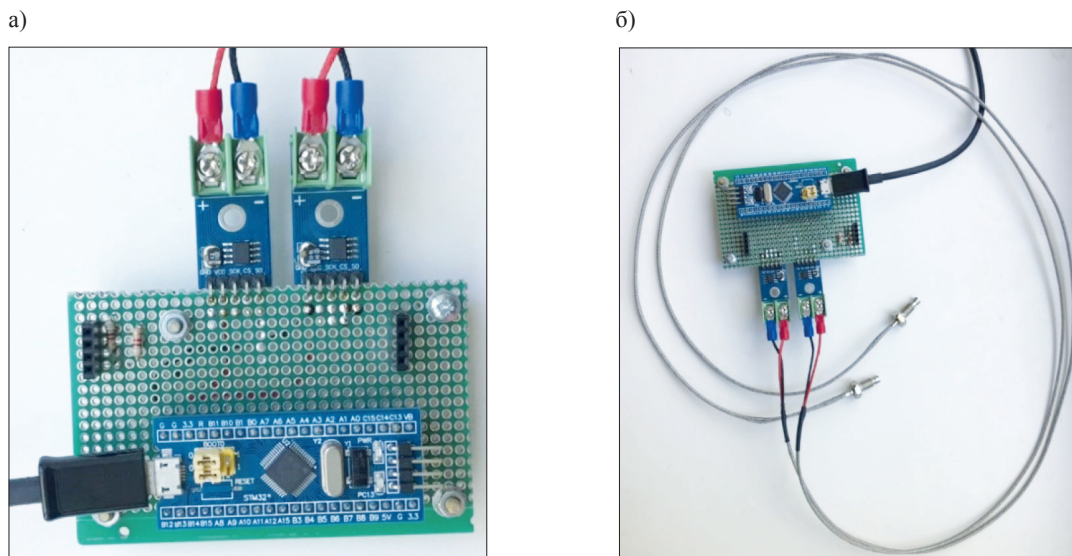


Рис. 2. Микроконтроллер Arduino Nano (а), два цифровых драйвера термопары MAX6675 и две термопары типа ТХА (б)

Подготовку расплава осуществляли в лабораторной методической печи сопротивления СНОЛ 1.6.2.5.1/11-И2. Температура заливки металла составляла $T_{\text{очн}} = (750 \pm 50) \text{ } ^\circ\text{C}$. Температура штамповой оснастки была постоянной — $T_{\text{очн}} = (500 \pm 25) \text{ } ^\circ\text{C}$. Данные термопар фиксировали изменение температуры в условиях свободной заливки и с применением постоянного давления в диапазоне $P_{\text{ш}} = (50 - 200 \pm 10) \text{ МПа}$.

Результаты (Results)

Основными результатами исследования являются термические кривые затвердевания биметаллического сплава в зонах алюминия и порошковой втулки, представленные на рис. 3.

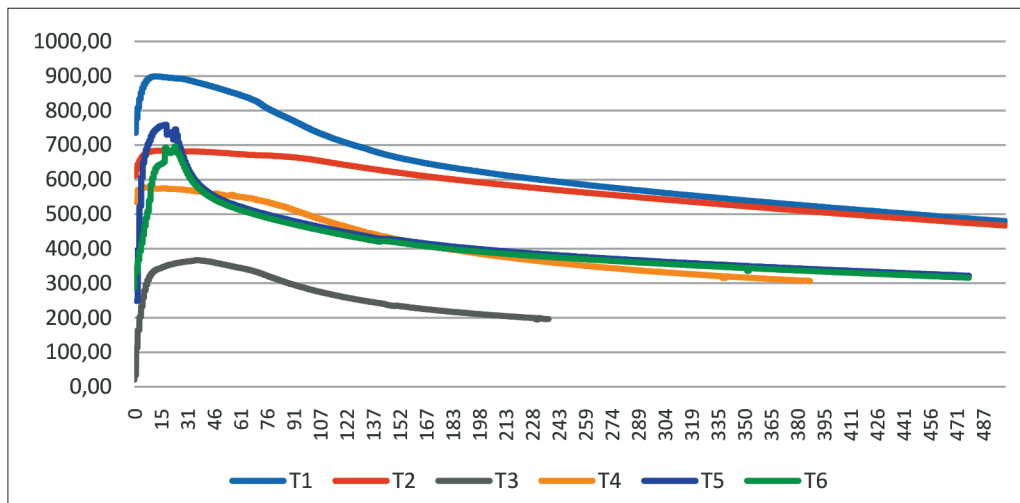


Рис. 3. Экспериментальные термические кривые охлаждения основного алюминиевого сплава (T1, T4, T5) при различной температуре заливки и порошковой втулки (T2, T3, T6) в различных условиях воздействия давления при штамповке жидкого металла (вертикальная ось графика — температура, горизонтальная — время, с)

Первый эксперимент — кривая T1 соответствовала сильному перегреву АК9ч перед заливкой в матрицу, максимальная температура достигала 900 °С, порошковая втулка (график T2) прогрелась внутри до 700 °С. Данный эксперимент проводился без воздействия давления штамповки жидкого металла (свободная заливка), последующий осмотр образца выявил, что плотного контакта между алюминием и порошковой втулкой не произошло, визуально был обнаружен зазор, который препятствовал теплообмену между металлами.

Второй эксперимент — кривая T4 соответствовала стандартной плавке сплава АК9ч перед заливкой в матрицу, максимальная температура достигала 600 °С, порошковая втулка (график T3) прогрелась внутри до 370 °С, данный эксперимент проводился в условиях среднего давления (50 МПа) штамповки жидкого металла, последующий осмотр образца выявил, что плотного контакта между алюминием и порошковой втулкой также не произошло, усадочный зазор между металлами был меньше, чем при свободной заливке, но также не позволил образовать надежную адгезионную связь.

Третий эксперимент — графики T5, T6 проводился при максимальном давлении штамповки жидкого металла (200 МПа), оснастка матрицы и порошковая втулка были предварительно разогреты до 300 °С, температура заливки АК9ч была стандартной. Образованный биметалл имел хорошую зону контакта, без каких-либо зазоров, адгезионные свойства соединения — высокие.

Термические кривые в двух первых экспериментах имели сходный характер, разогретый алюминий мгновенно прогрел порошковую втулку и далее плавно остывал до полного затвердевания, избыточное тепло переходило в матрицу, теплообмен с железной втулкой был ограничен из-за усадочного зазора, сама втулка также плавно остывала, температурное поле становилось равномерным примерно после 3 мин затвердевания.

В третьем эксперименте, при наличии давления штамповки и разогретой оснастке, температура алюминия и порошковой втулки сравнялась в течение 30–40 с, что свидетельствует о хорошем контакте между материалами, при этом общая скорость затвердевания значительно выросла.

Обсуждение результатов (Discussion of Results)

Сравнивая полученные результаты с данными работы [11], [12], можно выявить, что давление штамповки позволяет сформировать надежный контакт между металлами, а при условии сохранения такого контакта при высокой температуре, соответствующей твердожидкому состо-

янию алюминиевого сплава в течение 2–3 мин формируется устойчивое адгезионное соединение согласно следующим механизмам:

– за счет механического перемешивания металлов и заполнения объемных пор в порошковой втулке жидким алюминием;

– за счет образования тонкой диффузионной зоны с последующей реализацией металлургического соединения;

В обоих случаях требуется перегрев основного металла (АК9ч), подогрев порошковой втулки для их начального «схватывания» и разогрев технологической оснастки. В случае недостатка температуры перегрева происходит быстрое затвердевание алюминиевой основы, а за счет значительной разницы в коэффициентах температурного расширения — разрыв адгезионной связи ввиду неполного контакта между металлами. Это также подтверждается результатами исследования [13], где в качестве технологического процесса была выбрана стыковая лазерная сварка пластин из алюминия и стали, по данным анализа микростроения и механических испытаний. Авторами исследования было выявлено, что в зонах, где явно наблюдался направленный температурный градиент затвердевания без постоянного контакта двух металлов, адгезионные и механические свойства были снижены, а в зонах, где были выявлены интерметаллиды и наблюдался хороший контакт между металлами, эти свойства сохранялись на высоком уровне.

Выводы (Summary)

1. Задача получения биметаллического подшипникового узла на этапе заготовительного производства является новой для судового машиностроения и требует изучения физических, в т.ч. тепловых процессов, влияющих на конечные свойства изделия, главное из которых — надежное адгезионное соединение.

2. Тепловые процессы — основной технологический фактор, оказывающий влияние на качественные характеристики подшипникового узла, получаемого в процессе штамповки жидкого металла с использованием порошковых заготовок (втулок).

3. На разработанной лабораторной установке в результате исследования различных тепловых режимов затвердевания биметаллического соединения было выявлено, что давление штамповки оказывает существенное влияние на формирование контакта между металлами, позволяя создать устойчивое адгезионное соединение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Проничев Д. В.* Исследование коррозионной стойкости биметалла АД1+ Ст3 / Д. В. Проничев [и др.] // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2015. — № 5 (160). — С. 24–28.

2. *Захаров В. В.* Алюминиевые сплавы для аддитивных технологий / В. В. Захаров // Технология легких сплавов. — 2017. — № 4. — С. 32–36.

3. *Семёнов Б. И.* Тиксоштамповка и тиксолитье — современные технологии формообразования алюминиевых и других сплавов в твердожидком состоянии / Б. И. Семёнов [и др.] // Технология легких сплавов. — 2010. — № 31. — С. 129–150.

4. *Семенченко А. И.* Технология центробежного реолитье алюминиевых сплавов / А. И. Семенченко [и др.], // Процессы литья. — 2015. — № 2. — С. 24–33.

5. *Sunderraj A. J. D.* SEM and EDAX Evaluation of Al-Fe Alloy / A. J. D. Sunderraj, A. V. K. Geethan, D. Ananthapadmanaban // International Journal of Engineering and Advanced Technology. — 2019. — Vol. 9. — Is. 1. — Pp. 2651–2654. DOI: 10.35940/ijeat.A9881.109119.

6. *Geng H.* Formation Mechanism of Transition Zone and Amorphous Structure in Magnetic Pulse Welded Al-Fe Joint / H. Geng, J. Mao, X. Zhang, G. Li, J. Cui // Materials Letters 245 (2019): 151–154. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.02.118.

7. *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.

8. 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.

9. Гращенко Д. В. Высокотемпературные металломатричные композиционные материалы, армированные частицами и волокнами тугоплавких соединений / Д. В. Гращенко, И. Ю. Ефимочкин, А. Н. Большакова // Авиационные материалы и технологии. — 2017. — № 5. — С. 318–328. DOI: 10.18577/2071-9240-2017-0-S-318-328.

10. Борисов Г. П. О роли давления при формировании высококачественных алюминиевых отливок / Г. П. Борисов, А. И. Семенченко // Литейное производство. — 2009. — № 5. — С. 25–33.

11. Сосенушкин Е. Н. Технологические режимы жидкой штамповки алюминиевого сплава АК7 / Е. Н. Сосенушкин [и др.] // Цветные металлы. — 2018. — № 11. — С. 83–88. DOI: 10.17580/tsm.2018.11.12.

12. Wang H. Interfacial Microstructures and Mechanical Properties of Friction Welded Al/steel Dissimilar Joints / H. Wang, G. Qin, P. Geng, X. Ma // Journal of Manufacturing Processes. — 2020. — Vol. 49. — Pp. 18–25. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.11.009.

13. Cui L. Joining 6 mm Thick Dissimilar steel/Al Alloy Butt Joints using Two Keyhole Laser-MIG Hybrid Welding Processes / L. Cui, F. Pan, D. He, L. Chen // Journal of Laser Applications. — 2018. — Vol. 30. — No. 3. — Pp. 032418. DOI: 10.2351/1.5040649.

REFERENCES

1. Pronichev, D. V., L. M. Gurevich, M. D. Trunov, and V. M. Yastrebov. “Issledovanie korrozionnoi stoikosti bimetalla AD1+ St3.” *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 5(160) (2015): 24–28.

2. Zakharov, V. V. “Aluminium Alloys for Additive Technologies.” *Tekhnologiya legkikh splavov* 4 (2017): 32–36.

3. Semenov, B. I., Yu. A. Bocharov, K. M. Kushtarov, Yu. A. Gladkov, and L. V. Khizhnyakova. “Tiksoshtampovka i tiksolit’e — sovremennye tekhnologii formoobrazovaniya alyuminievyykh i drugikh splavov v tverdozhidkom sostoyanii.” *Tekhnologiya legkikh splavov* 31 (2010): 129–150.

4. Semenchenko, A. I., V. M. Duka, I. V. Khvostenko, V. Yu. Sheigam, A. G. Vernidub, and L. K. Shenevid’ko. “Tekhnologiya tsentrobezhnogo reolit’ya alyuminievyykh splavov.” *Protsessy lit’ya* 2 (2015): 24–33.

5. Sunderraj, Arthur Jebastine D., Geethan K. Arun Vasantha, and D. Ananthapadmanaban. “SEM and EDAX Evaluation of Al-Fe Alloy.” *International Journal of Engineering and Advanced Technology* 9.1 (2019): 2651–2654. DOI: 10.35940/ijeat.A9881.109119.

6. Geng, Huihui, Jingqi Mao, Xu Zhang, Guangyao Li, and Junjia Cui. “Formation mechanism of transition zone and amorphous structure in magnetic pulse welded Al-Fe joint.” *Materials Letters* 245 (2019): 151–154. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.02.118.

7. 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.

8. Kuznetsov, Ruslan V., and Evgeniy O. Olhovich. “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.

9. Grashchenkov, D.V., I.Yu. Efimochkin, and A.N. Bolshakova. “High-temperature metal-matrix composite materials reinforced with particles and fibers of refractory compounds.” *Aviation Materials and Technologies* 5 (2017): 318–328. DOI: 10.18577/2071-9240-2017-0-S-318-328.

10. Borisov, G. P., and A. I. Semenchenko. “The role of pressure in the processes of formation of high quality castings from aluminium alloys.” *Foundry. Technologies and Equipment* 5 (2009): 25–33.

11. 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.

12. Wang, Hao, G. Qin, P. Geng, and X. Ma. “Interfacial microstructures and mechanical properties of friction welded Al/steel dissimilar joints.” *Journal of Manufacturing Processes* 49 (2020): 18–25. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.11.009.

13. Cui, Li, F. Pan, D. He, and L. Chen. “Joining 6 mm thick dissimilar steel/Al alloy butt joints using two keyhole laser-MIG hybrid welding processes.” *Journal of Laser Applications* 30.3 (2018): 032418. DOI: 10.2351/1.5040649.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Руслан Валерьевич —

главный металлург

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. —

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 6 декабря 2019 г.

Received: December 6, 2019.