

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОГО СЛОЯ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ



Руслан Валерьевич Кузнецов, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8(812)552-9530, E-mail: kuznetsov_rv@spbstu.ru.



Павел Алексеевич Кузнецов, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8(812)552-9530, E-mail: kuznetsov_pa@spbstu.ru.

Аннотация

В целях улучшения адгезии соединяемых слоев биметаллических материалов предложен способ нанесения на их контактирующие поверхности промежуточного слоя порошка газодинамическим напылением. Для материала основы использовался литейный алюминиевый сплав АК9ч. Рабочим слоем являлся спеченный порошковый материал на основе железа АНС100.29. В качестве промежуточного активирующего слоя использовались порошки различного состава. Приведены технологические рекомендации по толщине напыляемого слоя. Проведено исследование прочности соединения слоев и металлографические исследования зоны их соединения на образцах в виде биметаллического диска.

Ключевые слова: биметалл, спеченный материал, железный порошок, алюминиевый сплав, штамповка жидкого металла.

Вступление

В настоящее время номенклатура и объёмы биметаллических материалов и изделий из них интенсивно увеличиваются. Такое инновационное развитие вызвано как потребностями различных отраслей

промышленности, так и появлением новых материалов с уникальными свойствами и технологиями их получения [1-4]. Многообразие биметаллических материалов обусловлено большим количеством возможных сочетаний исходных материалов [4-6]. Применение различных технологических процессов, применяемых при изготовлении биметаллов, в свою очередь дает возможность управлять свойствами, необходимыми для выполнения конкретных задач [5-7]. Практически во всех биметаллах один из материалов является рабочим слоем, обладающим специальными свойствами, второй материал является «матрицей», выполняющей вспомогательные функции, например, несущие, т.е. для крепления рабочего слоя. Представляют значительный интерес такие технологии изготовления биметаллов, когда «матрица» служит не только для крепления рабочего слоя, а является изделием, выполняющим определенные функции [8-10]. Несомненно, что с экономической точки зрения больший интерес представляют варианты, при которых соединение слоёв биметалла происходит одновременно с изготовлением самого изделия.

Повышение прочности соединения слоев в биметаллических материалах является важной и актуальной задачей для различных отраслей производства. Одним из эффективных путей решения этой задачи является использование промежуточного слоя, усиливающего адгезию между соединяемыми материалами.

Современные технологии активации процессов адгезии соединяемых материалов изучены недостаточно глубоко и требуют дальнейшего исследования, в том числе недостаточно изучены технологии получения биметаллов из жидкого металла и порошковых материалов. Применение технологии порошковой металлургии позволяет получить рабочий слой биметаллического изделия с самыми высокими и специальными физико-механическими и эксплуатационными свойствами [11-13].

В предлагаемой работе использовался вариант получения биметаллических изделий на основе технологии литья с кристаллизацией под давлением, как процесса, существенно улучшающего качество литого металла. Штамповка жидкого металла осуществляется совместно с рабочими вкладышами из порошковых материалов с заданными свойствами с целью получения качественного биметаллического изделия. Методика получения биметаллических изделий на основе технологии литья с кристаллизацией под давлением, при котором рабочий вкладыш из спеченного пористого материала внедряют в жидкий металл, помещенный в подогретую закрытую матрицу, фиксируют в требуемом положении, а созданную биметаллическую композицию подвергают совместной штамповке с выдержкой под давлением до полной кристаллизации основы, подробно описана в работе [15].

Целью работы является интенсификация процесса изготовления биметаллических изделий из жидкого металла и спеченных порошковых материалов на основе литья с кристаллизацией под давлением путем газодинамического напыления промежуточного слоя, увеличивающего прочность соединения рабочего и основного слоев биметаллического изделия.

Методы и материалы

В качестве материала основы использовали литейный алюминиевый сплав АК9ч (ГОСТ1583-93), в качестве рабочего слоя – железный порошок АНС100.29. Химический состав материалов указан в Таблице 1.

Таблица 1. Химический состав исследуемых материалов основы и рабочего слоя.

Марка материала	Массовая доля, %												
	Fe	Si	Mn	Ni	Al	Cu	Pb	Be	Mg	Zn	Sn	C	Примесей
АК9ч (ГОСТ 1583-93)	>1	8÷10,5	0,2÷0,5	>0,1	86,94÷91,63	>0,3	>0,05	>0,1	0,17÷0,3	>0,3	>0,01	–	≥1,5
АНС100.29	99,84	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,003	≤0,13

На активирующие свойства промежуточного слоя, в основном, влияют его химический состав, толщина, однородность и т.д. В качестве промежуточного активирующего слоя использовались порошки марок А-20-11 и N7-00-14 (ТУ 1791-001-40707672-2010) на основе алюминия и никеля соответственно. Образцами для исследований являлись биметаллические цилиндры с размерами: D = 55 мм, d = 25 мм, h = 40 мм.

Газодинамическое напыление материала промежуточного слоя на сопрягаемые поверхности основы и рабочего слоя осуществляли на установке «ДИМЕТ 404» производства одноимённого отечественного предприятия.

Основные характеристики установки представлены ниже:

- давление потребляемого сжатого воздуха – 0,5÷0,9 МПа (5÷9 атм);
- расход сжатого воздуха – 0,45 м³/мин;
- электропитание – 220 В, 3,3 кВт;
- производительность по массе наносимого покрытия на основе алюминия: 1÷6 г/мин (0,3÷2 см³/мин);
- количество фиксированных температурных режимов – 5;
- количество порошковых питателей – 2;

- габариты комплекта: не более 550x260x470 мм;

На рис. 1, *а* представлена указанная установка, на рис.1, *б* — схема напыления порошком промежуточного слоя на сопрягаемую поверхность цилиндрического образца из спеченного порошка. Толщина напыленного слоя составляла от 0,2 до $1,0 \pm 0,05$ мм.

На рис. 2, *а* показана принципиальная схема самого процесса изготовления биметаллического образца, т.е. литья с кристаллизацией под давлением жидкого металла и спеченного рабочего вкладыша. Технология изготовления биметаллических образцов заключалась в следующем: неразъемную матрицу 2 нагревали до рабочей температуры, смазав предварительно рабочие поверхности противопригарным покрытием на основе водного раствора кремнезоля.

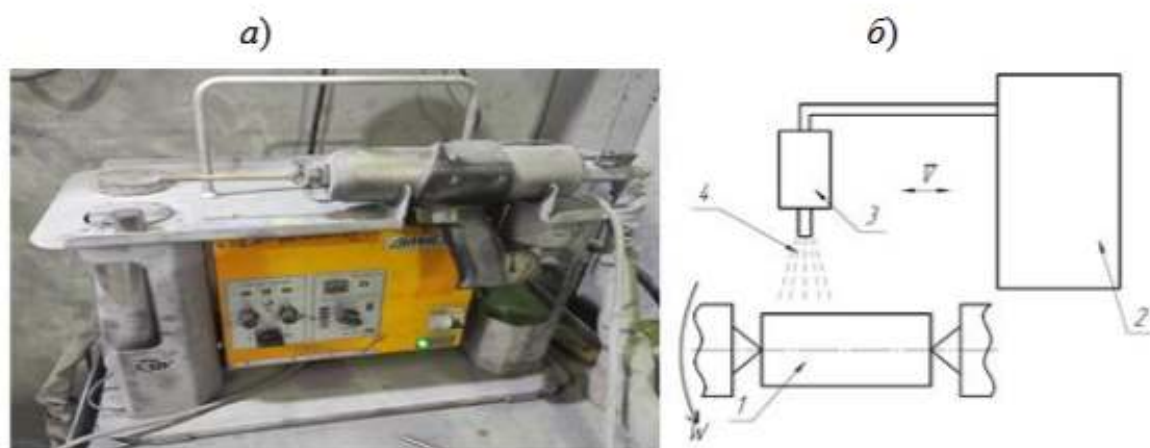


Рис. 1. *а* — установка для газодинамического напыления «Димет 404»,
б — принципиальная схема напыления промежуточного слоя:
 1 — спеченный порошковый образец, 2 — установка «Димет 404»,
 3 — пистолет с соплом, 4 — напыляемый порошок.

Матрицу устанавливали на нижнюю плиту 3, рабочий вкладыш 5 из антифрикционного спеченного порошкового материала с напыленным слоем устанавливали на плиту соосно матрице, и производили заливку жидкого металла основы 6. Пуансоном 1 осуществляли совместную штамповку. Выдержку под давлением осуществляли до полной кристаллизации материала основы и проникновения жидкого металла в поры порошкового материала вкладыша.

Опытную партию биметаллических заготовок получали на специальном стенде, непосредственно штамповку осуществляли на лабораторном испытательном прессе ПСУ-125 усилием 1250 кН. Пористость порошковой заготовки при исследовании была постоянной — 15%.

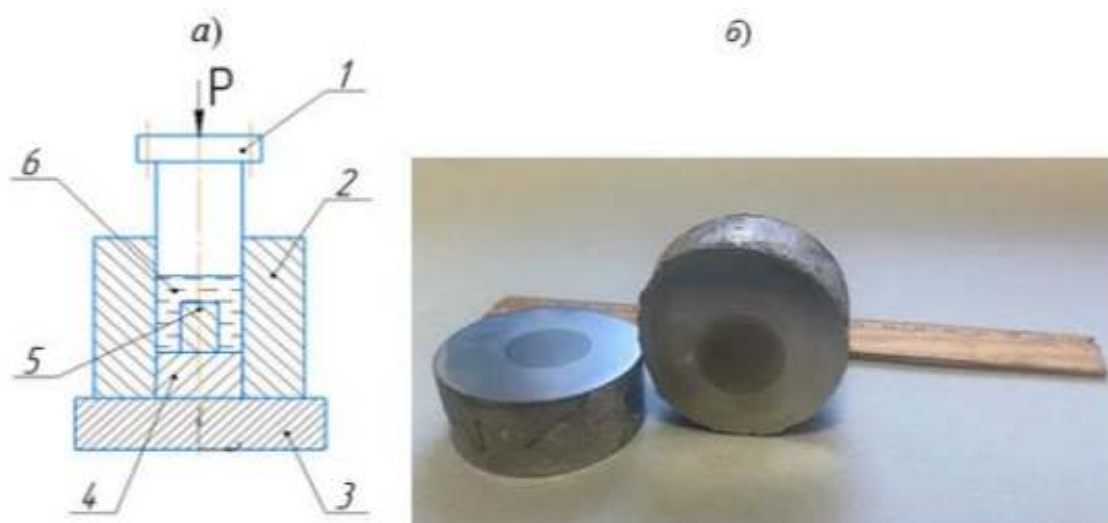


Рис. 2. а – принципиальная схема литья с кристаллизацией под давлением жидкого металла и спеченного рабочего вкладыша 1 – верхний пуансон, 2 – матрица, 3 – плита пресса, 4 – нижний пуансон, 5 – рабочий вкладыш, 6 – жидкий металл
б – биметаллические образцы

Эксперимент проводился при следующих технологических режимах: $P_{ш} = 0 \div 100$ МПа, $T_{осн.} = 450 \div 550^{\circ}\text{C}$, $t_{кр.} = 10 \div 20$ с. Исследование микроструктуры контактного слоя проводили на образцах, вырезанных из центральной части заготовки в продольном сечении. Разрезку осуществляли на низкоскоростном точном отрезном станке «ПОЛИЛАБ Р 30М». Изготовление микрошлифов осуществлялось с применением запрессовочного станка «ПОЛИЛАБ С50» и шлифовально-полировального металлографического комплекса «ПОЛИЛАБ П12МА». Визуальную оценку контактного слоя проводили на металлографическом микроскопе МИМ-9 с использованием цифровой фотокамеры по методике, описанной в работе [16].

Результаты

Технологические испытания прочности соединения слоев на срез производились на кольцеобразных образцах размером $\varnothing 55 \times 20$ мм, на гидравлической испытательной установке Losen Hausen с номинальным усилием 150 кН. На рис. 3 показан график прочности соединения биметаллических материалов в зависимости от толщины напыленного промежуточного слоя.

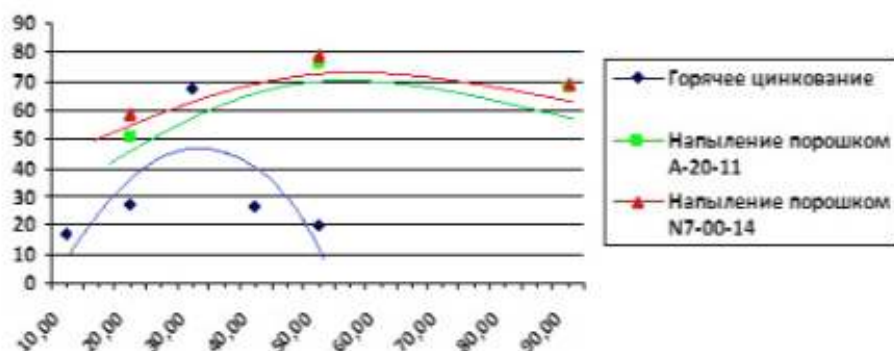


Рис. 3. Зависимость прочности среза от толщины напыленного слоя

Механические испытания прочности соединения слоёв полученных биметаллических изделий на срез показали следующие значения: для пары «АК9ч - АНС100.29» с промежуточным никелевым слоем – в интервале 50÷75 МПа.

На рис. 4 показаны макроструктуры контактного слоя биметаллического образца из алюминия АК9ч и АНС100.29», полученных при следующих условиях: $P_{ш}=100$ МПа, $T_{осн}=500^{\circ}\text{C}$, $t_{кр}=10$ с; а – без промежуточного слоя; б – с промежуточным напыленным никелевым слоем

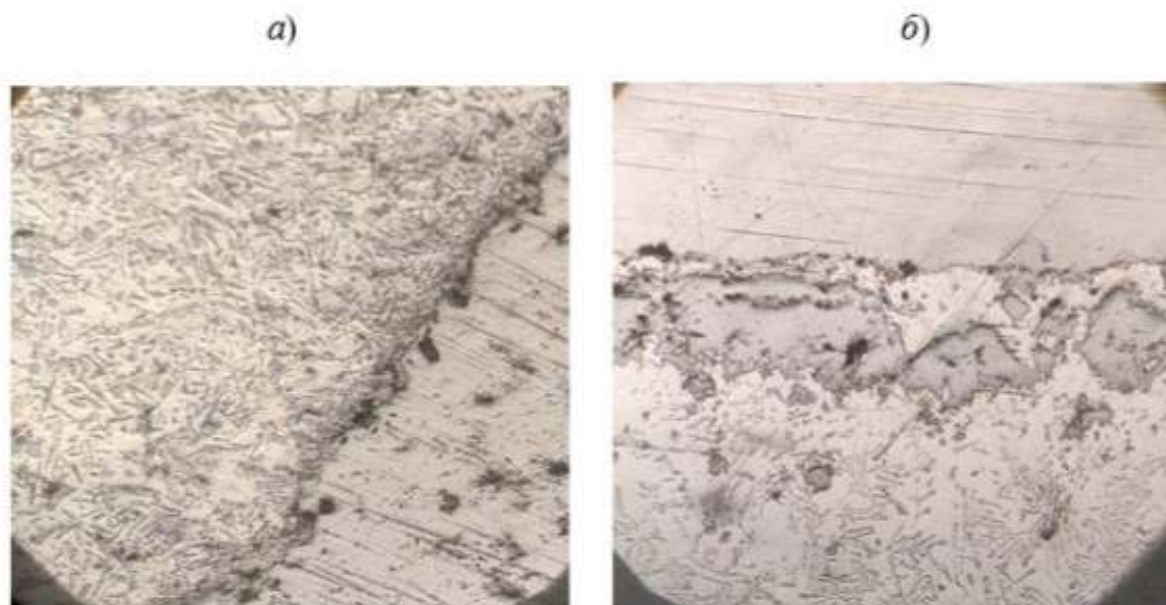


Рис. 4. Макроструктура контактного слоя биметаллических образцов «АК9ч+АНС100.29»: а – с зоной интерметаллидного слоя; б – с удовлетворительной областью взаимной растворимости. Увеличение $\times 200$.

Исследование твердости на поперечном разрезе центральной части заготовок проводили по методу Виккерса (ГОСТ 2999-75) на твердомере

ИТВ-10-ММ. Прочность алюминия после кристаллизации под давлением составила $62,4 \div 77,5$ HV10, для спеченного порошка железа – $189 \div 227$ HV10.

Увеличение твердости алюминия вызвано давлением при его кристаллизации, что наблюдалось в других работах.

Обсуждение

Прочность соединения слоев на срез в биметаллических парах «АК9ч+АНС100.29» с промежуточным слоем порошка на основе никеля достигает 75 МПа. Полученный результат можно считать удовлетворительным, сравнимым с прочностью биметаллических соединений алюминия и стали, получаемой при других способах. Для малонагруженных биметаллических подшипников скольжения такая прочность является достаточной.

Исследования микроструктуры контактного слоя показали удовлетворительную взаимную растворимость. При оптимальных режимах процесса наблюдалось проникновение алюминия в поры спеченного железа.

Оптимальными технологическими параметрами процесса штамповки жидкого алюминия совместно с спеченным порошком железа следует считать давление штамповки $80 \div 100$ МПа, температуру матрицы $450 \div 550^\circ\text{C}$ и время выдержки под давлением $10 \div 15$ с. Наиболее эффективное влияние на адгезионную прочность соединения слоёв в процессе проведения опытных работ показал порошковый материал на основе никеля марки N7-00-14.

Дальнейшим направлением исследования предлагаемой технологии следует считать расширение номенклатуры напыляемых материалов, поиск оптимальных режимов напыления, исследование процессов, происходящих на границе соединяемых материалов при кристаллизации под давлением в процессе их совместной штамповки, развитие разработанных ранее процессов [16-18].

Заключение

Разработанный ранее способ получения биметаллических изделий на основе технологии литья с кристаллизацией под давлением может быть улучшен путем нанесения на контактирующие поверхности материалов промежуточного слоя порошка газодинамическим напылением.

Высокая скорость газодинамического напыления способствует проникновению напыляемого порошка в пористую поверхность спеченного порошкового материала и увеличивает адгезию штампуемых материалов.

Возможность легкого управления газовым потоком, несущим напыляемый порошок, обеспечивает нанесение активирующего слоя требуемой толщины практически на поверхность любой сложности.

Использование в качестве напыляемого материала порошка расширяет возможность создания напыляемого материала в виде смеси с широкими адгезионными и прочностными свойствами.

Механические испытания прочности на срез соединения слоёв полученных биметаллических образцов «АК9ч+АНС100.29» с промежуточными напыленными слоями порошков на основе никеля и алюминия показали прочность в интервале 50÷75 МПа. Достигнутый диапазон прочности соизмерим со значениями прочности, получаемыми при других способах изготовления биметаллических изделий. Следовательно, исследованная технология может быть рекомендована для получения биметаллических изделий из других аналогичных металлов и сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1980. - 404с.
- [2] Биметаллы: Монография/ Дмитров Л.Н, Кузнецов Е.В., Кобелев А.Г. [и др.]. - Пермь, 1991. - 415 с.
- [3] Батышев К.А. Литье с кристаллизацией под давлением алюминиевых сплавов. М., 2008. - 143 с.
- [4] Сиротенко Л. Д., Шлыков Е. С., Абляз Т. Р. Применение биметаллических материалов в машиностроении //Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №. 2. – с. 163-163.
- [5] Катрус О.А., Радченко А.К., Гринкевич К.Э., Юга А.И. Антифрикционные многослойные материалы с различным функциональным назначением слоев // Новейшие процессы и материалы в порошковой металлургии: Тез. докл. междунар. конф.- Киев, 1997. - с. 349.
- [6] Суровикин В. Ф., Суровикин Ю. В., Цеханович М. С. Новые направления в технологии получения углерод-углеродных материалов. Применение углерод-углеродных материалов //Российский химический журнал. – 2007. – Т. 51. – №. 4. – с. 111-119.
- [7] Злобин Б. С. и др. Совершенствование технологии изготовления сталеалюминиевых вкладышей подшипников скольжения //Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2012. – №. 14 (101).
- [8] Эльбаева Р. И., Эльбаев Р. А. Исследование технологии изготовления биметаллических подшипников сталь-бронза //Известия Кабардино-Балкарского гос. университета. – 2015. – Т.5. – №.1. – с. 24.

- [9] Веретенникова И. А. и др. Механические свойства и характер разрушения биметалла «медь м1-сталь 09г2с», полученного сваркой взрывом //Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. – 2016. – №.6. – с. 28-38.
- [10] Сосенушкин Е. Н. и др. Моделирование и освоение технологии штамповки кристаллизующегося металла //Металлург. - 2018. - №. 3. – с. 25-29.
- [11] Крушенко Г. Г., Резанова М. В. Получение деталей транспортного средства из алюминиевого сплава жидкой штамповкой //проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники и подготовки инженерных кадров для авиакосмической отрасли. – 2015. – с. 186-192.
- [12] Kazakov A. A., Kur A. A., Kazakova E. I. Development of Quantitative Methods for Estimation of Aluminum Alloys Structure by Means of Image Analysis // Microsc. Microanal. 21 (Suppl 3), 2015.
- [13] Фук Д.В., Ганин С.В., Цеменко В.Н. Исследование процесса уплотнения порошковых материалов с использованием программного пакета ABAQUS. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - 2016. - №1. - с.100-110.
- [14] Rudskoy AI, Tsemenko VN, Ganin SV. A Study of Compaction and Deformation of a Powder Composite Material of the ‘Aluminum–Rare Earth Elements’ System. Metal Science and Heat Treatment. 2015 Jan 1;56(9-10):542-7. DOI: 10.1007/s11041-015-9796-3.
- [15] Кузнецов Р.В., Радкевич М.М., Кузнецов П.А. Способ получения биметаллических изделий штамповкой жидкого металла. Патент на изобретение №2696164 кл.В22Д18/02. Опубл. 31.07.2019, Бюл.№22.
- [16] 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 им. адмирала С.О. Макарова. – 2019. – Т. 11, № 5. – С. 902-909. – DOI 10.21821/2309-5180-2019-11-5-902-909. – EDN PVINOQ.
- [17] Kuznetsov R.V, Kuznetsov P.A., Prostorova A.O., Tretyakov V.P. Technology of Bimetallic Products Forming Based on Sintered Inserts, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-30027-1_20, pp.180-186. In: Evgrafov, A.N. (eds) Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham., First Online: 22 April 2023
- [18] Kuznetsov P.A., Lepetan K.V., Kuznetsov R.V, Development Prospects of Dies and Equipment for Elastostatic Pressing of Products from Powders. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2024 PartF 128, pp. 200-206. In: Evgrafov, A.N. (ed) Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2023.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF GAS-DYNAMIC SPRAYING OF AN INTERMEDIATE LAYER ON THE STRENGTH OF BIMETALLIC MATERIALS JOINTS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

In order to improve the adhesion of the joined layers of bimetallic materials, a method of applying an intermediate layer of powder to their contacting surfaces by gas-dynamic spraying was proposed. Foundry aluminum alloy AK9h was used for the base material. The working layer was sintered powder material on the basis of iron ANS100.29. Powders of different composition were used as an intermediate activating layer. Technological recommendations on the thickness of the sprayed layer are given. The strength of the layers' joining and metallographic studies of their joining zone on samples in the form of a bimetallic disk were carried out.

Keywords: bimetal, sintered material, iron powder, aluminum alloy, liquid metal stamping.

REFERENCES

- [1] Fedorchenko I.M., Pugina L.I. Composite sintered antifriction materials. Kiev: Naukova dumka, 1980. – 404 p. (rus.)
- [2] Bimetals: Monograph / Dmitrov L.N., Kuznetsov E.V., Kobelev A.G.. [et al.] - Perm, 1991. - 415 p. (rus.)
- [3] Batyshev K.A. Casting with crystallization under pressure of aluminum alloys. M., 2008. - 143 p. (rus.)
- [4] Sirotenko L. D., Shlykov E. S., Ablyaz T. R. Application of bimetallic materials in mechanical engineering // Modern problems of science and education. - 2015. - №. 2. - pp. 163-163. (rus.)
- [5] Katrus O.A.' Radchenko A.K.' Grinkevich K.E., Yuga A.I. Antifriction multilayer materials with different functional purpose of layers // Novel processes and materials in powder metallurgy: Proc. of Intern. conf. - Kiev, 1997. - p. 349. (rus.)
- [6] Surovikin V. F., Surovikin Yu. V. V., Tsehanovich M. S. New directions in the technology of obtaining carbon-carbon materials. Application of carbon-carbon materials // Russian Chemical Journal. - 2007. - T. 51. - №. 4. - pp. 111-119. (rus.)
- [7] Zlobin B. S. et al. Improvement of manufacturing technology of steel-aluminum inserts of sliding bearings // Proceedings of Volgograd State

- Technical University. - 2012. - №. 14 (101). (rus.)
- [8] Elbaeva R. I., Elbaev R. A. Research of the manufacturing technology of steel-bronze bimetallic bearings // *Izvestia Kabardino-Balkarian State University*. - 2015. - Vol. 5. - No. 1. - p. 24.
 - [9] Veretennikova I. A. et al. Mechanical properties and nature of fracture of bimetal "copper m1-steel 09g2s" obtained by explosion welding // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. - 2016. - №.6. - pp. 28-38. (rus.)
 - [10] Sosenushkin E. N. et al. Modeling and mastering of crystallizing metal stamping technology // *Metallurg*. - 2018. - №. 3. - pp. 25-29. (rus.)
 - [11] Krushenko G. G., Rezanova M. V. Obtaining vehicle parts from aluminum alloy by liquid stamping // *Problems of development, manufacturing and operation of rocket and space technology and training of engineering personnel for the aerospace industry*. - 2015. - pp. 186-192. (rus.)
 - [12] Kazakov A. A., Kur A. A., Kazakova E. I. Development of Quantitative Methods for Estimation of Aluminum Alloys Structure by Means of Image Analysis // *Microsc. Microsc.* 21 (Suppl 3), 2015. (rus.)
 - [13] Fuk, D.V.; Ganin, S.V.; Tsemenko, V.N. Investigation of the process of powder materials compaction using the ABAQUS program package. // *Scientific and Technical Vedomosti SPbSPU*. - 2016. - №1. - pp.100-110.
 - [14] Rudskoy AI, Tsemenko VN, Ganin SV. A Study of Compaction and Deformation of a Powder Composite Material of the 'Aluminum-Rare Earth Elements' System. *Metal Science and Heat Treatment*. 2015 Jan 1;56(9-10):542-7. DOI: 10.1007/s11041-015-9796-3.
 - [15] Kuznetsov R.V., Radkevich M.M., Kuznetsov P.A. Method of obtaining bimetallic products by liquid metal stamping. Patent for invention No.2696164 cl.V22D18/02. Publ. 31.07.2019, Bulletin No. 22. (rus.)
 - [16] Kuznetsov, R. V. Investigation of physical processes of formation of adhesive strength of bimetallic bearing for ship engineering / R. V. Kuznetsov, E. O. Olkhovik // *Bulletin of the State University of Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov*. - 2019. - T. 11, № 5. - C. 902-909. - DOI 10.21821/2309-5180-2019-11-5-902-909. - EDN PVINOQ. (rus.)
 - [17] Kuznetsov R.V, Kuznetsov P.A., Prostorova A.O., Tretyakov V.P. Technology of Bimetallic Products Forming Based on Sintered Inserts, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-30027-1_20, pp.180-186. In: Evgrafov, A.N. (eds) *Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham., First Online: 22 April 2023
 - [19] Kuznetsov P.A., Lepetan K.V., Kuznetsov R.V, Development Prospects of Dies and Equipment for Elastostatic Pressing of Products from Powders. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2024 PartF 128, pp. 200-206. In: Evgrafov, A.N. (ed) *Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2023*.