



Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 536.425:539.25

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.001

 EDN: HBKNTW

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ ЧАСТИЦАМИ TiO₂

Махан Хамид Мохаммед Махан¹, Сергей Валерьевич Коновалов²,
Ирина Алексеевна Панченко³, Диана Дмитриевна Пашкова⁴

^{1,2} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

¹ Средний технический университет, Дивала, Ирак

^{2,3} Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

¹ hamid19812052016@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8421-2996>

² konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

³ i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3656-2836>

⁴ pashkova_dianka@mail.ru

Аннотация. Получены алюмоматричные композиционные материалы на основе сплава AA2024 и наночастиц TiO₂, варьирующихся от 0 до 7,5 масс. %. Было проведено исследование твердости и износа и установлено, что увеличение содержания наночастиц оксида титана с 0 до 5 масс.% приводит к увеличению твердости с 39 до 64 HRB с дальнейшим снижением до 38 HRB, в то время как скорость износа уменьшается в обратной последовательности. Проведены исследования структуры материала и поверхности износа методами оптической и сканирующей электронной микроскопии. Показано, что поверхности износа имеют неравномерное строение, что свидетельствует о том, что скорость износа является результатом различных механизмов разрушения. Установлено, что структура сплава состоит из многочисленных междендритных матричных композитов и мелких выделений, рассеянных по всему объему. Показано, что междендритная зона окаймлена Al₇Cu₂Fe и Al(Cu, Mn, Fe, Si). Выявлены интерметаллические композиты Al₃TiCu и Al₉TiFe.

Ключевые слова: интерметаллические соединения, наночастицы, алюминиевая матрица; твердость; скорость износа, структура.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 0809-2021-0013.

Для цитирования: Исследование свойств и структуры алюмоматричных композитов, армированных частицами TiO₂ / М. Х. М. Махан [и др.] // Ползуновский вестник. 2022. № 4. Т. 2. С. 7–13. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.001. EDN: <https://elibrary.ru/HBKNTW>.

Original article

STUDY OF THE PROPERTIES AND STRUCTURE OF ALUMINUM MATRIX COMPOSITES REINFORCED WITH TiO₂ PARTICLES

Hamid M. Mahan¹, Sergey V. Konovalov², Irina A. Panchenko³,
Diana D. Pashkova⁴

^{1,2} Samara National Research University, Samara, Russia

¹ Middle Technical University, Divala, Iraq

^{2,3} Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

¹ hamid19812052016@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8421-2996>

² konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

³ i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3656-2836>

⁴ pashkova_dianka@mail.ru

Abstract. Alumina-matrix composite materials based on the AA2024 alloy and TiO₂ nanoparticles varying from 0 to 7.5 wt. % have been obtained. A study of hardness and wear was carried out and it was found that increasing the content of titanium oxide nanoparticles from 0 to 5 wt. % leads to an increase in hardness from 39 to 64 HRB, with a further decrease to 38 HRB while the wear rate decreases in reverse order. The structure of the material and the wear surface were studied by optical and scanning electron microscopy. It is shown that the wear surfaces have an uneven structure, which indicates that the wear rate is the result of various failure mechanisms. It has been established that the structure of the alloy consists of numerous interdendritic matrix composites and fine precipitates scattered throughout the volume. It is shown that the interdendritic zone is bordered by Al₇Cu₂Fe and Al(Cu, Mn, Fe, Si). Intermetallic composites Al₃TiCu and Al₉TiFe have been revealed.

Keywords: intermetallic compounds, nanoparticles, aluminum matrix; hardness; wear rate, structure.

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № 0809-2021-0013.

For citation: Mahan, H. M., Konovalov, S. V., Panchenko, I. A. & Pashkova, D. D. (2022). Study of the properties and structure of aluminum matrix composites reinforced with TiO₂ particles. *Polzunovskiy vestnik*, 4(2), 7-13. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.001.EDN: <https://elibrary.ru/HBKNTW>.

ВВЕДЕНИЕ

Алюминий и сплавы на его основе широко используются в различных областях благодаря уникальным и замечательным характеристикам, включая коррозионную стойкость, низкую плотность, высокую пластичность, достаточно высокую прочность, высокую отражательную способность и сравнительно низкую стоимость [1–7].

Выполнено большое количество исследований по анализу роли армирования различными частицами на свойства конечного изделия. Так, композиты с алюминиевой матрицей (Aluminum matrix composites – AMC), армированные керамическими частицами, широко используются в автомобильной и аэрокосмической отраслях благодаря своим уникальным механическим свойствам [8, 9]. Добавление соответствующего количества

Al₂O₃SiC повышает износостойкость алюминиевых сплавов.

Влияние объемной доли, пористости и размера частиц SiC на износостойкость матричных композитов из алюминиевого сплава, полученного методами порошковой металлургии, было исследовано в [10, 11]. Экспериментальные результаты показали, что износостойкость алюминиевого сплава улучшилась за счет увеличения содержания SiC [12].

Размер и объемный процент армирования, а также тип контакта «матрица–армирование» влияют на механические характеристики композитов с металлической матрицей (metal matrix composites – MMC). Чтобы сделать материал более прочным, требуется небольшое и стабильное армирование с прочными межфазными соединениями, равномерно распределенными в матрице [13].

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ ЧАСТИЦАМИ TiO_2

Повышенная прочность и модуль упругости являются одними из преимуществ композитов с металлической матрицей с армированием частицами [14]. Износ является одним из важнейших явлений, возникающих при контакте алюминиевых композитов с металлической матрицей с твердыми частицами. Добавление SiC , Al_2O_3 , TiB_2 , B_4C и TiC , в сплав на основе алюминия оказывает значительное влияние на износостойкость композитов [15].

Композитные материалы, а также связанные с ними технологии проектирования и производства стали одним из самых значительных достижений в истории материалов. Композиты – это многофункциональные материалы с уникальными механическими и физическими свойствами, которые можно адаптировать к требованиям конкретного применения [16]. Порошок сплава смешивается с армирующими частицами для создания однородной матрицы. Такие операции, как прокатка и экструзия, необходимы для обработки композитов из нанопорошков / частиц, поскольку они требуются для правильной консолидации композита [17].

Несмотря на их высокую удельную прочность и превосходную тепло- и электропроводность, сплавы на основе алюминия имеют ограниченное применение из-за их низкой твердости и плохой износостойкости [18]. Их трибологические свойства можно значительно улучшить, укрепив их керамическими нано/микрочастицами. Получаемые материалы обладают высокими характеристиками износостойкости и твердости и значительно улучшают механические характеристики базовых алюминиевых сплавов [19].

Таким образом, целью настоящей работы является исследование структуры и свойств материала, полученного путем добавления различного количества наночастиц TiO_2 в матрицу сплава AA 2024.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве базового материала выбран алюминиевый сплав AA 2024 (92,2 % Al, 0,73 % Si, 0,20 Fe, 5,2 % Cu, 0,50 % Mn, 1,04 % Mg, 0,11 % Zn, 0,01 % Ti, 0,01 % Pb (масс.%)). В качестве армирующих материалов был выбран порошок из наночастиц TiO_2 (производитель Changsha Santech Co. КНР). Для получения алюминиевого композита доля нанопорошка в сплаве варьировалась и составляла 0, 2,5, 5,0 и 7,5 масс. %.

Для обеспечения полного расплавления содержимого образцы композиционного ма-

териала нагревали до 700 °C в графитовом тигле с использованием электропечи NaberthermNAB_8101. Для получения однородной смеси армирующих частиц в матрице порошок оксида титана перемешивали в течение примерно 4 мин. при 200 об/мин. Затем расплавленный металл заливали в металлическую форму, образцы нагревали до 500 °C в печи с циркуляцией воздуха в течение 3 ч., охлаждали водой при температуре окружающей среды и проводили старение в течение 3 ч при 175 °C.

Все эксперименты проводились в соответствии с американскими стандартами (ASTM). Для определения твердости образцов использовали цифровой анализатор твердости по Виккерсу (LagyeHBRVS – 18705). Все образцы испытали на твердость и выполнили их статистическую обработку.

Для исследования микроструктуры образцов использовали сканирующий электронный микроскоп TESCANVEGA. Реактив Кролла ($H_2O:HNO_3:HF = 92:6:2$) использовали для травления образцов в поперечном сечении в течение 15 с.

В соответствии со стандартами ASTM G 99-95 скорость износа образцов с размерами 30x10 мм оценивали с помощью штифта на измерителе износа дискового типа. Скорость диска – 277,4 об/мин, скорость скольжения – 6 см/с, прилагаемая нагрузка – 5, 10, 15 и 20 Н в течение 10 мин; твердость диска – 385 HV, он изготовлен из нержавеющей стали.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние различного содержания наночастиц TiO_2 на твердость композитного материала приведено в таблице 1. По сравнению с исходным алюминиевым сплавом добавление 2,5 масс. % TiO_2 приводит к значительному увеличению твердости (на 41 %). Наибольшая твердость 55 и 64 HRB была достигнута при 2,5 и 5 масс. % TiO_2 соответственно.

Хорошее распределение мелких включений Al_2CuMg и частиц алюминия в микроструктуре может свидетельствовать об увеличении твердости после добавления наночастиц. Более мелкие интерметаллические соединения могут играть эффективную роль в закреплении границ зерен и повысить твердость на основе правила Холла-Петча [20]. Однако увеличение массовой доли TiO_2 до 7,5 масс. % привело к значительному снижению твердости. Это можно объяснить увеличением количества наночастиц в сплаве при 7,5 масс. % TiO_2 , что может исказить микроструктуру алюмоматричного композита, о чем указывают авторы [21].

Таблица 1 – Изменение твердости композиционного материала в зависимости от содержания TiO_2

Table 1 - Change of the hardness of the composite material depending on the content of TiO_2

TiO_2 , масс.%	Твердость, HRB
0	39
2,5	55
5,0	64
7,5	38

Добавление 2,5–5 масс. % наночастиц TiO_2 к алюминиевому сплаву снижает износостойкость, при этом наибольшее снижение происходит при 5 масс. % (таблица 2). Логичным объяснением этого явления является увеличение твердости. Однако увеличение количества оксида титана в сплавах АА 2024 свыше 5 % масс. приводит к повышению износостойкости. Таким образом, скорость деформации алюминиевого сплава будет увеличиваться в результате увеличения содержания TiO_2 . В связи с этим можно констатировать, что износостойкость обратно пропорциональна твердости [22].

Таблица 2 – Изменение скорости износа композиционного материала в зависимости от содержания TiO_2

Table 2 - Change in the wear rate of the composite material depending on the content of TiO_2

TiO_2 , масс.%	Скорость износа, $10^{-8}г/см$			
	Нагрузка, Н			
	5	10	15	20
0	6,0	7,8	8,1	13,4
2,5	4,6	6,0	6,7	10,9
5	4,2	4,9	5,7	10,2
7,5	6,4	6,0	9,9	14,8

При исследовании поверхности износа, выполненного методами СЭМ, видны сильно-выпуклые структуры, характерные для вязкого разрушения. При износе высокопрочных алюминиевых сплавов межкристаллитное повреждение будет вызвано ростом микропустот. СЭМ изображения показывают, что поверхности износа имеют неравномерное строение, что свидетельствует о том, что скорость износа является результатом различных механизмов разрушения. Большие

четкие канавки превращаются в мелкие царапины вдоль направления скольжения.

На рисунке 1 показаны изображения микроструктуры четырех образцов с различным массовым процентным содержанием TiO_2 . Микроструктуры состоят из многочисленных междендритных матричных композитов и мелких включений, рассеянных по всей микроструктуре. Отчетливо можно отметить, что наиболее однородные выделения наблюдаются при 2,5 и 5 % масс. TiO_2 .

Равномерное распределение этих частиц и меньшая пористость привели к улучшению механических свойств алюминиевого композитного материала по сравнению с литой матрицей.

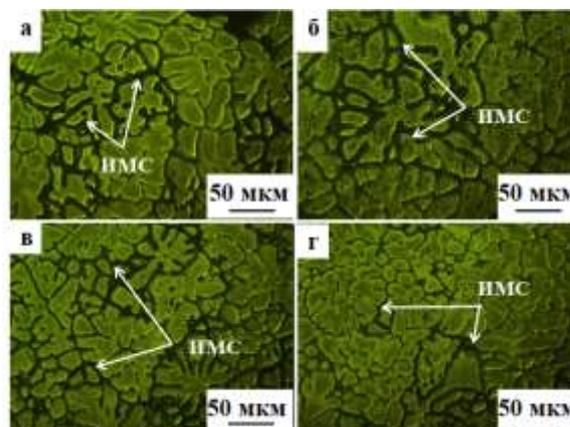


Рисунок 1 – Результаты оптической микроскопии: а) 0 % TiO_2 ; б) 2,5 % TiO_2 ; в) 5 % TiO_2 ; г) 7,5 % TiO_2 . ИМС – интерметаллические соединения

Figure 1 - Results of optical microscopy: а) 0% TiO_2 , б) 2.5% TiO_2 , в) 5% TiO_2 , г) 7.5% TiO_2 . IMC-intermetallic compounds

Для анализа микроструктуры и интерметаллических композитов было проведено исследование методами СЭМ (рисунок 2).

Установлено, что происходит измельчение включений и их более равномерное распределение по микроструктуре. Из-за высокой температуры растворения этих интерметаллических соединений вокруг междендритной зоны сформировались Al_7Cu_2Fe и Al (Cu, Mn, Fe, Si). Интерметаллические композиты Al_3TiCu и Al_9TiFe возникли в материале в связи с добавлением оксида титана.

При наличии меди происходит ее замещение в кристаллической структуре структурой алюминидов титана. При добавлении TiO_2 до 2,5 масс. % размер выделений Al_2CuMg уменьшается. Поскольку соединения, бога-

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ ЧАСТИЦАМИ TiO_2

тые титаном, замещают большое количество меди в алюминиевой матрице, фаза состава Al_2CuMg не может образовываться после добавления 5% TiO_2 . Это предотвращает образование включений [23].

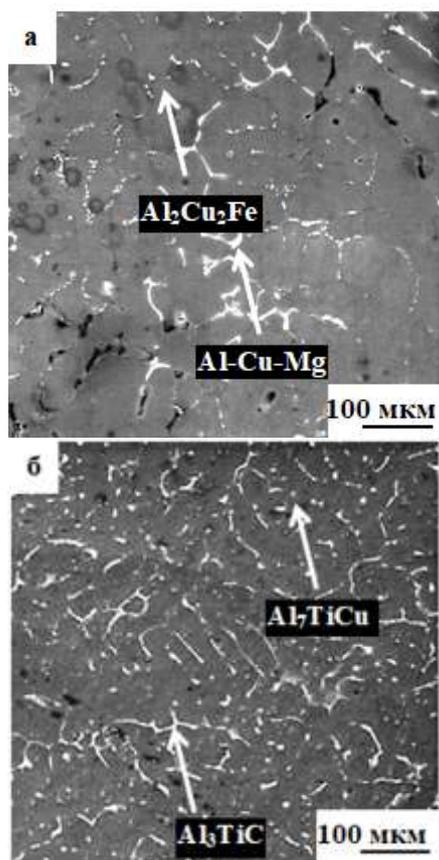


Рисунок 2 – Микроструктура сплава (результаты СЭМ): а) 2,5 % TiO_2 ; б) 5 % TiO_2

Figure 2 - Microstructure of the alloy (SEM results): a) 2.5% TiO_2 , b) 5% TiO_2

Вместо формирования фазы состава Al_2CuMg происходит образование Al_6CuMg_4 . При добавлении титана в сплав системы $Al-Mg-Cu$ растворимость меди снижается. Это связано с образованием интерметаллических соединений, таких как Al_3TiCu и Al_7TiCu_4 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнено исследование на твердость, скорость износа и проанализирована микроструктура сплава AA 2024 с добавлением различного количества нанопорошка TiO_2 . Показано, что алюмоматричный композитный материал с оксидом титана с содержанием 2,5–5 масс. % продемонстрировал улучшение твердости на 31–64 % по сравнению с неармированной алюминиевой матрицей. Наночастицы увеличили износо-

стойкость композитного материала на 25 % по сравнению с неармированной алюминиевой матрицей.

Установлено, что добавление наночастиц в сплав AA 2024 может значительно улучшить его физические качества, что позволит увеличить использование алюминиевых сплавов во многих промышленных приложениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Çetin, M. Abrasive wear behavior of cast Al-Si-Mn alloys // Proc. Inst. Mech. Eng. Part E J. Process Mech. Eng. – 2019. – Vol. 233. – № 4. – P. 908–918. DOI: 10.1177/0954408918818735.
2. Rambabu, P., Prasad, N.E., Kutumbarao, V.V., Wanhill, R.J.H. Aluminum alloys for aerospace applications, in Aerospace Materials and Material Technologies. – Springer. 2017. – P. 29–52. DOI: 10.1007/978-981-10-2134-3-2.
3. Çolak, M., Arslan, I. Investigation of Wear Properties of Grain Refined and Modified A319 Aluminum Alloy Produced with Sand and Permanent Mold // International Journal of Science and Engineering Investigations. – 2018. – Vol. 7(83). – 2017. – P. 134–137.
4. Nosova, E., Erisov, Y., Grechnikov, F. Multi-cycle rolled aluminum alloy 3103 sandwiches: Mechanical properties and stamp ability // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129. – № 02021. – 5 p. DOI: 10.1051/mateconf/201712902021.
5. Geng, Y., Panchenko, I., Konovalov, S., Chen, X., Ivanov, Y. Effect of electron beam energy densities on the surface morphology and tensile property of additively manufactured Al-Mg alloy // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2021. – Vol. 498. – P. 15–22. DOI: 10.1016/j.nimb.2021.04.008.
6. Osintsev, K., Konovalov, S., Gromov, V., Panchenko, I., Chen, X. Phase composition prediction of Al-Co-Cr-Fe-Ni high entropy alloy system based on thermodynamic and electronic properties calculations. Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 46. – P. 961–965. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.079.
7. Osintsev, K., Konovalov, S., Gromov, V., Panchenko, I., Ivanov, Y. Microstructural and mechanical characterisation of non-equiatomic $Al_{2.1}Co_{0.3}Cr_{0.5}FeNi_{2.1}$ high-entropy alloy fabricated via wire-arc additive manufacturing // Philosophical Magazine Letters. – 2021. – Vol. 101 (9). – P. 353–359. DOI: 10.1080/09500839.2021.1936257.
8. Jambukar, G.B., Kharde, D.Y. Dry Sliding Wear Behavior of Al-Si-Ti Alloys Using Taguchi Method // International Journal of Science and Research. – 2014. – Vol. 3(11). – 6 p.
9. Kang, N., Coddet, P., Liao, H., Baur, T., Coddet, C. Wear behavior and microstructure of hypereutectic Al-Si alloys prepared by selective laser melting // Applied Surface Science. – 2016. – Vol. 378. – P. 142–149. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.03.221.
10. Vidyarthi, M.K., Ghose, A.K., Chakrabarty, I. Effect of deep cryogenic treatment on the microstruc-

ture and wear performance of Cr–Mn–Cu white cast iron grinding media // *Cryogenics*. – 2013. – Vol. 58. – P. 85–92. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2013.10.005.

11. Franco, V., Ashiuchi, E.S., Reißig, L., Araújo, J.A. Effect of a deep cryogenic treatment on wear and microstructure of a 6101 aluminum alloy // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 2016. – 12 p. DOI: 10.1155/2016/1582490.

12. Valdés, R., Freulon, A., Deschamps, J.B., Qian, M., Lacaze, J. Phase equilibria and solidification of Mg-rich Al–Mg–Si alloys // *Materials Science Forum*. – 2006. – Vol. 508. – P. 621–628. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.508.621.

13. Araghchi, M., Mansouri, H., Vafaei, R., Guo, Y. A novel cryogenic treatment for reduction of residual stresses in 2024 aluminum alloy // *Materials Science and Engineering: A*. – 2017. – Vol. 689. – P. 48–52. DOI: 10.1016/j.msea.2017.01.095.

14. Haung, Y., Dong, L., Michael, S. The Effect of Cold Treatment on Mechanical Properties of AA6061 by Dry Ice // *Chinese Journal of Metallurgy*. – 2016. – Vol. 19. – P. 211–220.

15. Esteban, G., Bellón, B., Martínez, E., Papadimitriou, I., LLorca, J. Strengthening of Al–Cu alloys by Guinier–Preston zones: Predictions from atomistic simulations // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 2019. – Vol. 132. – № 103675. – 6 p. DOI: 10.1016/j.jmps.2019.07.018.

16. Bhat, A., Budholiya, S., Raj, S.A., Sultan, M.T.H., Hui, D., Shah, A.U.M., Safri, S.N.A. Review on nanocomposites based on aerospace applications // *Nanotechnology Reviews*. – 2021. – Vol. 10(1). – P. 237–253. DOI: 10.1515/ntrev-2021-0018.

17. Paidar, M., Asgari, A., Ojo, O., Saberi, A. Mechanical properties and wear behavior of AA5182/WC nanocomposite fabricated by friction stir welding at different tool traverse speeds // *J Mater Eng Perform*. – 2018. – Vol. 27(4). – P. 1714–24. DOI: 10.1007/s11665-018-3297-7.

18. Mondal, S. Aluminum or its alloy matrix hybrid Nano composites // *Met Mater Int*. – 2021. – Vol. 27. – № 2188. – P. 204. DOI: 10.1007/s12540-020-00750-5.

19. Ramezani, F., Hamed, J., Roohollah, J. Development and characterization of in-situ AA2024–Al3NiCu composites // *International journal of metal-casting*. – 2022. – V. 16. – P. 1–15. DOI: 10.1007/s40962-021-00752.

20. Shahi, A., Heydarzadeh, M., Ahmadkhaniha, D., Ghambari, M. In situ formation of Al–Al3Ni composites on commercially pure aluminum by friction stir processing // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 75. – P. 1331–1337. DOI 10.1007/s00170-014-6162-3.

21. Rao, V.R., Ramanaiah, N., Sarcar, M.M.M. Fabrication and investigation on properties of TiC reinforced Al7075 metal matrix composites // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 592. – P. 349–353. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.349.

22. Samarai, R.A., Haftirman, A.K., Al-Douri, Y. Effect of load and sliding speed on wear and friction of aluminum–silicon casting alloy. *International Journal of Scientific and Research Publications*. – 2012. – Vol. 2(3). – P. 1–4.

23. Wang, Y., Lu, Y., Zhang, S., Zhang, H., Wang, H., Chen, Z. Characterization and strengthening effects of different precipitates in Al–7Si–Mg alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – Vol. 885. – № 161028. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161028.

Информация об авторах

М. Х. М. Махан – аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского национального исследовательского университета им. Академика С.П. Королева; инженер Среднего технического университета.

С. В. Коновалов – доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности Сибирского государственного индустриального университета, главный научный сотрудник Самарского национального исследовательского университета им. Академика С.П. Королева;

И. А. Панченко – кандидат технических наук, заведующий лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений Сибирского государственного индустриального университета.

Д. Д. Пашкова – лаборант Управления научных исследований Сибирского государственного индустриального университета.

REFERENCES

1. Çetin, M. (2019). Abrasive wear behavior of cast Al–Si–Mn alloys *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E. J. Process Mech. Eng.* (233)4, 908–918, DOI: 10.1177/0954408918818735.

2. Rambabu, P., Prasad, N.E., Kutumbarao, V.V., Wanhill, R.J.H. (2017). Aluminum alloys for aerospace applications, in *Aerospace Materials and Material Technologies*. Springer. 29–52. DOI: 10.1007/978-981-10-2134-3-2.

3. Çolak, M., Arslan, I. (2018). Investigation of Wear Properties of Grain Refined and Modified A319 Aluminum Alloy Produced with Sand and Permanent Mold. *International Journal of Science and Engineering Investigations*, 7(83), 134–137.

4. Nosova, E., Erisov, Y., Grechnikov, F. (2017). Multi-cycle rolled aluminum alloy 3103 sandwiches: Mechanical properties and stamp ability. *MATEC Web of Conferences*. (129), 02021. DOI: 10.1051/mateconf/201712902021.

5. Geng, Y., Panchenko, I., Kononov, S., Chen, X., Ivanov, Y. (2021). Effect of electron beam energy densities on the surface morphology and tensile property of additively manufactured Al–Mg alloy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. (498), 15–22. DOI: 10.1016/j.nimb.2021.04.008.

6. Osintsev, K., Kononov, S., Gromov, V., Panchenko, I., Chen, X. (2021). Phase composition prediction of Al–Co–Cr–Fe–Ni high entropy alloy system based on thermodynamic and electronic properties calculations.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ ЧАСТИЦАМИ TiO₂

Materials Today: Proceedings. (46), 961-965. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.079.

7. Osintsev, K., Konovalov, S., Gromov, V., Panchenko, I., Ivanov, Y. (2021). Microstructural and mechanical characterisation of non-equiatom Al₂.1Co_{0.3}Cr_{0.5}FeNi_{2.1} high-entropy alloy fabricated via wire-arc additive manufacturing. *Philosophical Magazine Letters.* 101(9), 353-359. DOI: 10.1080/09500839.2021.1936257.

8. Jambukar, G.B., Kharde, D.Y. (2014). Dry Sliding Wear Behavior of Al-Si-Ti Alloys Using Taguchi Method. *International Journal of Science and Research.* (3)11, 6 p.

9. Kang, N., Coddet, P., Liao, H., Baur, T., Coddet, C. (2016). Wear behavior and microstructure of hypereutectic Al-Si alloys prepared by selective laser melting. *Applied Surface Science.* (378), 142-149. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.03.221.

10. Vidyarthi, M.K., Ghose, A.K., Chakrabarty, I. (2013). Effect of deep cryogenic treatment on the microstructure and wear performance of Cr-Mn-Cu white cast iron grinding media. *Cryogenics.* (58), 85-92. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2013.10.005.

11. Franco, V., Ashiuchi, E.S., Reißig, L., Araújo, J.A. (2016). Effect of a deep cryogenic treatment on wear and microstructure of a 6101 aluminum alloy. *Advances in Materials Science and Engineering.* (2016), 12 p. DOI: 10.1155/2016/1582490.

12. Valdés, R., Freulon, A., Deschamps, J.B., Qian, M., Lacaze, J. (2006). Phase equilibria and solidification of Mg-rich Al-Mg-Si alloys. *Materials Science Forum.* (508), 621-628. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.508.621.

13. Araghchi, M., Mansouri, H., Vafaei, R., Guo, Y. (2017). A novel cryogenic treatment for reduction of residual stresses in 2024 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A.* (689), 48-52. DOI: 10.1016/j.msea.2017.01.095.

14. Haung, Y., Dong, L., Michael, S. (2016). The Effect of Cold Treatment on Mechanical Properties of AA6061 by Dry Ice. *Chinese Journal of Metallurgy.* (19), 211-220.

15. Esteban, G., Bellón, B., Martínez, E., Papadimitriou, I., LLorca, J. (2019). Strengthening of Al-Cu alloys by Guinier-Preston zones: Predictions from atomistic simulations. *J. of the Mechanics and Physics of Solids.* (132), 103675. DOI: 10.1016/j.jmps.2019.07.018.

16. Bhat, A., Budholiya, S., Raj, S.A., Sultan, M.T.H., Hui, D., Shah, A.U.M., Safri, S.N. (2021). A Review on nanocomposites based on aerospace applications. *Nanotechnology Reviews.* (10)1, 237-253. DOI: 10.1515/ntrev-2021-0018.

17. Paidar, M., Asgari, A., Ojo, O., Saberi, A. (2018). Mechanical properties and wear behavior of AA5182/WC nanocomposite fabricated by friction stir welding at different tool traverse speeds. *J. Mater Eng Perform.* (27)4, 1714-24. DOI: 10.1007/s11665-018-3297-7.

18. Mondal, S. (2021). Aluminum or its alloy matrix hybrid Nano composites. *Met Mater Int.*(27) 2188, 204. DOI: 10.1007/s12540-020-00750-5.

19. Ramezanali, F., Hamed, J., Roohollah, J. (2022). Development and characterization of insitu AA2024-Al3NiCu composites. *Int. J. of metal-casting.* (16), 1-15. DOI:10.1007/s40962-021-00752.

20. Shahi, A., Heydarzadeh, M. Ahmadkhaniha, D., Ghambari, M. (2014). In situ formation of Al-Al₃Ni composites on commercially pure aluminum by friction stir processing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* (75), 1331-1337. DOI: 10.1007/s00170-014-6162-3.

21. Rao, V.R., Ramanaiah, N., Sarcar, M.M.M. (2014). Fabrication and investigation on properties of TiC reinforced Al7075 metal matrix composites. *Applied Mechanics and Materials* (592), 349-353. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.349.

22. Samarai, R.A., Haftirman, A.K., Al-Douri, Y. (2012). Effect of load and sliding speed on wear and friction of aluminum-silicon casting alloy. *Int. J. of Scientific and Research Publications.* (2)3, 1-4.

23. Wang, Y., Lu, Y., Zhang, S., Zhang, H., Wang, H., Chen, Z. (2021). Characterization and strengthening effects of different precipitates in Al-7Si-Mg alloy. *J. of Alloys and Compounds.* (885), 161028. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161028.

Information about the authors

H. M. Mahan - postgraduate student of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University; Engineer at the Middle Technical University.

S. V. Konovalov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector on Science and Innovation at the Siberian State Industrial University; Chief Researcher of Samara National Research University.

I. A. Panchenko - Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing.

D. D. Pashkova - laboratory assistant of the Department of Scientific Research of the Siberian State Industrial University.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 30.11.2022; принята к публикации 15.12.2022.

The article was received by the editorial board on 10 Oct 2022; approved after editing on 30Nov 2022; accepted for publication on 15 Dec 2022.