

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 620.178.162.4

doi: 10.30987/2782-5957-2023-12-21-28

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОЙ МАТРИЦЫ АРМИРОВАННОЙ СТАЛЬЮ ИЛИ БАЗАЛЬТОМ

Кирилл Алексеевич Абрамов^{1✉}, Ирина Рудиковна Асланян², Денис Генрихович Тюленев³, Владимир Сергеевич Жернаков⁴

^{1,3,4} «Хозрасчетный творческий центр Уфимского авиационного института», Уфа, Россия.

² ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

¹ k-abramov@rosoil.ru

² as-irina@rambler.ru

³ zavlab@rosoil.ru

⁴ zhvs@mail.rb.ru

Аннотация

Целью исследования является оценка триботехнических свойств композиционных материалов на основе алюминиевой матрицы армированной сталью или базальтом в сравнении с материалом без армирования, и разработка технологии получения таких композиционных материалов. В качестве армирующих компонентов использовали каркасы, состоящие из разнонаправленных волокон: базальтовая вата (плотностью 175-200 кг/м³); стальная вата (класса “4#”); температуры плавления стали и базальта, из которых состоят стальная и базальтовая ваты, выше 1000 °С, что позволяет производить заливку алюминия без изменения агрегатного состояния армирующих каркасов. Процентное содержание армирующих компонентов по массе составляет 4-5%. В качестве матрицы использовали деформируемый алюминиевый сплав АВ, который отличается среди сплавов системы Al-Mg-Si с повышенным уровнем пределов прочности и текучести. Исследуемые композиционные материалы получали жидкофазным методом – литье по выплавляемым моделям. Испытание триботехнических свойств производилось на машине трения в среде моторного масла «Лукойл стандарт 10W40 SF/CC».

Для определения противоизносных свойств испытания проводились в течение 1 часа, а для определения противозадирных свойств и нагрузки заклинивания проводились испытания с постоянным увеличением нагрузки на узел трения. Оценка противоизносных и противозадирных свойств проводилась путем сравнения значений пятен износа и нагрузки заклинивания. Установлено, что противоизносные свойства повышаются на 76-85% при армировании образцов базальтовой ватой и на 46-76% при армировании стальной ватой по отношению к неармированному образцу. Противозадирные свойства повышаются при армировании базальтом на 23%, при армировании сталью снижаются на 7%. Исследования по оценке триботехнических свойств образцов, полученных методом литья по выплавляемым моделям из алюминиевого сплава АВ, армированных базальтом и сталью показали улучшение противоизносных и противозадирных свойств по отношению к образцам из сплава АВ без армирования.

Ключевые слова: композиционные материалы, матрица, литье, модели, свойства.

Ссылка для цитирования:

Абрамов К.А. Исследование триботехнических свойств композиционного материала на основе алюминиевой матрицы армированной сталью или базальтом / К. А. Абрамов, И. Р. Асланян, Д. Г. Тюленев, В. С. Жернаков // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 12. – С. 21-28. doi: 10.30987/2782-5957-2023-12-21-28.

Original article

Open Access Article

STUDY OF TRIBO-ENGINEERING PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIAL BASED ON AN ALUMINUM MATRIX REINFORCED WITH STEEL OR BASALT

Kirill Alekseevich Abramov^{1✉}, Irina Rudikovna Aslanyan², Denis Genrikhovich Tyulenev³, Vladimir Sergeevich Zhernakov⁴

^{1,3,4} Self-supporting Creative Center of Ufa Aviation Institute, Ufa, Russia

² Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

¹ k-abramov@rosoil.ru

² as-irina@rambler.ru

³ zavlab@rosoil.ru

⁴ zhvs@mail.rb.ru

Abstract

The study objective is to evaluate the tribo-engineering properties of composite materials based on an aluminum matrix reinforced with steel or basalt in comparison with a material without reinforcement, and to develop a technology for obtaining such composite materials. Frames consisting of multidirectional fibers were used as reinforcing components: basalt wool (175-200 kg/m³ density); steel wool (4# class); melting temperatures of steel and basalt, which make up steel and basalt wool, are above 1000⁰C, which makes it possible to pour aluminum without changing the aggregate state of reinforcing frames. The percentage of reinforcing components by weight is 4-5%. Deformable AB aluminum alloy was used as a matrix, which differs from the alloys of Al-Mg-Si system because of its higher level of tensile and yield strength. The composite materials under study were obtained by the liquid-phase method - casting according to melting models. Tribo-engineering properties were tested on a friction machine in the medium of Lukoil standard 10W40

SF/CC engine oil. To determine the anti-wear properties, tests were carried out for 1 hour, and to determine the antisize properties and the seizure load, tests were carried out with a constant increase in the load on the friction unit. The assessment of anti-wear and antisize properties was carried out by comparing the values of wear spots and seizure loads. It is found that the anti-wear properties increase by 76-85% when reinforcing samples with basalt wool and by 46-76% when reinforcing with steel wool in relation to an unreinforced sample. Antisize properties increase with basalt reinforcement by 23%, and decrease by 7% with steel reinforcement. Studies on assessing tribo-engineering properties of samples obtained by casting from AB aluminum alloy reinforced with basalt and steel have shown an improvement in anti-wear and antisize properties in relation to samples from AB alloy without reinforcement.

Keywords: composite materials, matrix, casting, models, properties.

Reference for citing:

Abramov KA, Aslanyan IR, Tyulenev DG, Zhernakov VS. Study of tribo-engineering properties of composite material based on an aluminum matrix reinforced with steel or basalt. *Transport Engineering*. 2023;12:21-28. doi: 10.30987/2782-5957-2023-12-21-28.

Введение

Сегодня композиционные материалы (КМ) играют большую роль в промышленности. Они обладают высокими характеристиками: удельная прочность, теплопроводность, износостойкость, пластичность, электропроводность и т.д. Благодаря сочетанию различных компонентов удается достичь свойств композиционного материала, которыми не обладают его компоненты в отдельности. Применение композиционных материалов позволяет снизить вес, повысить ресурс, выдерживаемые нагрузки и другие характеристики конструкций и из-

делий. При всех положительных качествах композитов они имеют и недостатки: высокая стоимость, сложная технология производства по сравнению с традиционными материалами.

Применение новых способов изготовления позволяет снизить стоимость композиционных материалов, тем самым повысить целесообразность их использования [1]. Поэтому разработка новых КМ и технологий изготовления является актуальной задачей [2, 3].

Цель работы

Целью исследования является оценка триботехнических свойств композиционных материалов на основе алюминиевой матрицы, армированной сталью или ба-

зальтом в сравнении с материалом без армирования, и разработка технологии получения таких композиционных материалов.

Материалы и методы исследования

В настоящее время наиболее интересными и перспективными являются композиционные материалы на основе алюминиевой матрицы. Алюминий обладает невысокой плотностью, что может позволить создать материалы с высокими удельными свойствами. Одним из вариантов таких КМ могут являться материалы с хорошими трибологическими свойствами: малая сила трения, высокая износостойкость [4]. С помощью таких материалов КМ возможно повысить ресурс и надежность пар трения [5].

В качестве армирующих компонентов используют каркасы, состоящие из разнонаправленных волокон, таких как базаль-

товая вата (плотностью 175...200 кг/м³) [6, 7] и стальная вата (класса «4#») [8, 9]. Температура плавления стали и базальта, из которых состоят стальная и базальтовая ваты, выше 1000 °С, что позволяет проводить заливку алюминия без изменения агрегатного состояния армирующих каркасов. Процентное содержание армирующих компонентов по массе составляет 4...5 %. В качестве матрицы использовали деформируемый алюминиевый сплав АВ [10], который отличается среди сплавов системы Al-Mg-Si повышенным уровнем пределов прочности и текучести [11, 12]. Химический состав сплава приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплава АВ в % по ГОСТ 4784-97

Table 1

Chemical composition of AB alloy in % according to GOST 4784-97

Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Cu	Mg	Zn	Al
до 0,5	0,5-1,2	0,15-0,35	до 0,25	до 0,15	0,1-0,5	0,45-0,9	до 0,2	95,95-98,80

Исследуемые композиционные материалы получали жидкофазным методом – литье по выплавляемым моделям (рис. 1). Такой метод литья позволяет обеспечить

высокое качество поверхности, благодаря чему сократить или даже исключить операции механической обработки.

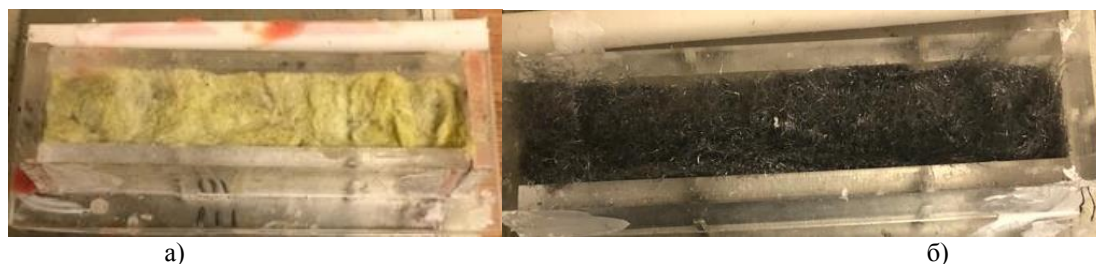


Рис. 1. Композиционные элементы, уложенные в форму перед заливкой воском, а – базальт, б – сталь

Fig. 1. Composite elements laid in a mold before filling with wax, a – basalt, b – steel

Процесс изготовления отливок заключался в укладывании базальта и стали в формы из оргстекла, заливке расплавленного воска и его застывании. Для отливок без армирования форма была пустой. После этого получают восковки, т.е. формы будущей отливки. В армированных восковках внутри равномерно распределены композиционные элементы из стали и базальта. Далее восковки помещаются в стальную опоку, где заливаются формочной смесью. После этого опока с за-

стывшей смесью помещается в печь для прокалки формы и выплавки воска, затем получают формы из гипсовой смеси с армирующими элементами и без них. Формы помещают в литьевую машину, где находится расплавленный алюминий, создают вакуум и производят заливку металла в формы. Температура опок составляет 600 °С, температура расплава 750 °С, при литье для очистки расплава использовали флюс 67 % NaF и 33 % NaCl. Тигель с металлом находился над формой, заливка ме-

талла происходила благодаря поднятию штока тигля, который запирает отверстие на дне [13, 14].

Для определения плотности были изготовлены образцы формы параллелепипе-

да, у которых были измерены вес и объем [5].

Плотность и механические характеристики полученных материалов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Плотность и механические характеристики

Table 2

Density and mechanical characteristics

Характеристика	Без армирования	Армирование базальтом (4...5 % по мас.)	Армирование сталью (4...5 % по мас.)
Плотность, г/см ³	2,67	2,65	2,72
Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	74,26	95,03	51,46
Предел упругости при растяжении σ_y , МПа	51,98	66,52	36,46
Предел текучести при растяжении σ_t , МПа	58,2	75,12	40,46
Твердость, НВ	35,5	36,0	27,4
Предел текучести при сжатии $\sigma_{тс}$, МПа	108,65	89,15	77,25
Предел упругости при сжатии σ_{yc} , ГПа	4,09	2,87	3,63

Испытание триботехнических свойств производились на машине трения по схеме «кольцо-брусок» (рис. 2) в среде моторного масла «Лукойл стандарт 10W40 SF/CC». Испытания проводились в течении 1 часа, для определения противоизносных свойств, результаты противоизносных испытаний представлены в таблице 3 и на рисунке 3. Для определения противозадирных свойств и нагрузки заклинивания, проводились испытания с постоянным увеличением нагрузки, результаты противозадирных испытаний представлены в таблице 3 и рисунке 3. Образцы были изготовлены размерами ~ 7×7×20 мм (ширина×высота×длина). Поверхности образцов были отшлифованы наждачной бумагой зернистостью Р600. Обойма машины трения изготовлена из стали ШХ-15, для имитации пары трения алюминий - сталь.

Оценку противозадирных свойств оценивали путем равномерного увеличения нагрузки на рычаг с помощью электродвигателя, нагружение образцов происходило одинаково при всех испытаниях. В

момент заклинивания (остановки вращения обоймы) фиксировали показания датчиков, показывающих нагрузку при заклинивании и силы при заклинивании (рис. 2).

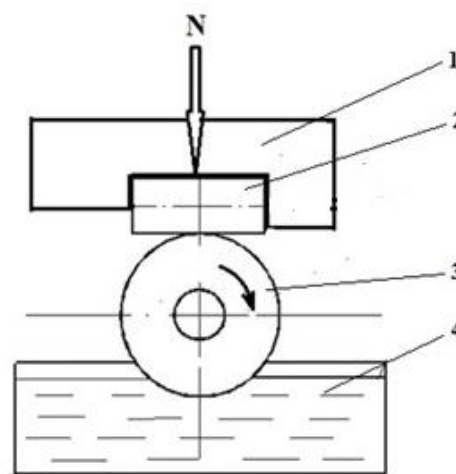


Рис. 2. Схема испытаний «образец – обойма»:

- 1 – корпус; 2 – образец ролик;
 - 3 – кольцо; 4 – смазочная ванна
- Fig. 2. Test scheme "sample - clip":
 1 – body; 2 – sample video; 3 – ring;
 4 – lubrication bath

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний по определению противоизносных свойств изображены на рис. 3 и табл. 3, где в процентах указано повышение противоизносных свойств у ар-

мированных образцов в сравнении с образцами без армирования, аналогично для противозадирных свойств (табл. 4), (рис. 4).

Результаты противоизносных испытаний

Table 3

Results of anti-wear tests

№	Тип образца/Нагрузка	Диаметры пятен износа, мм				
		46,8 кг	83,8 кг	108,4 кг	133 кг	157,6 кг
1	Без армирования	35,62	48,38	71,6	112,54	120,77
2	Армированный базальтом (4-5% по мас.)	5,96	7,23	15,06	16,25	28,92
3	Армированный сталью (4-5% по мас.)	13,75	16,83	18,89	26,67	64,19

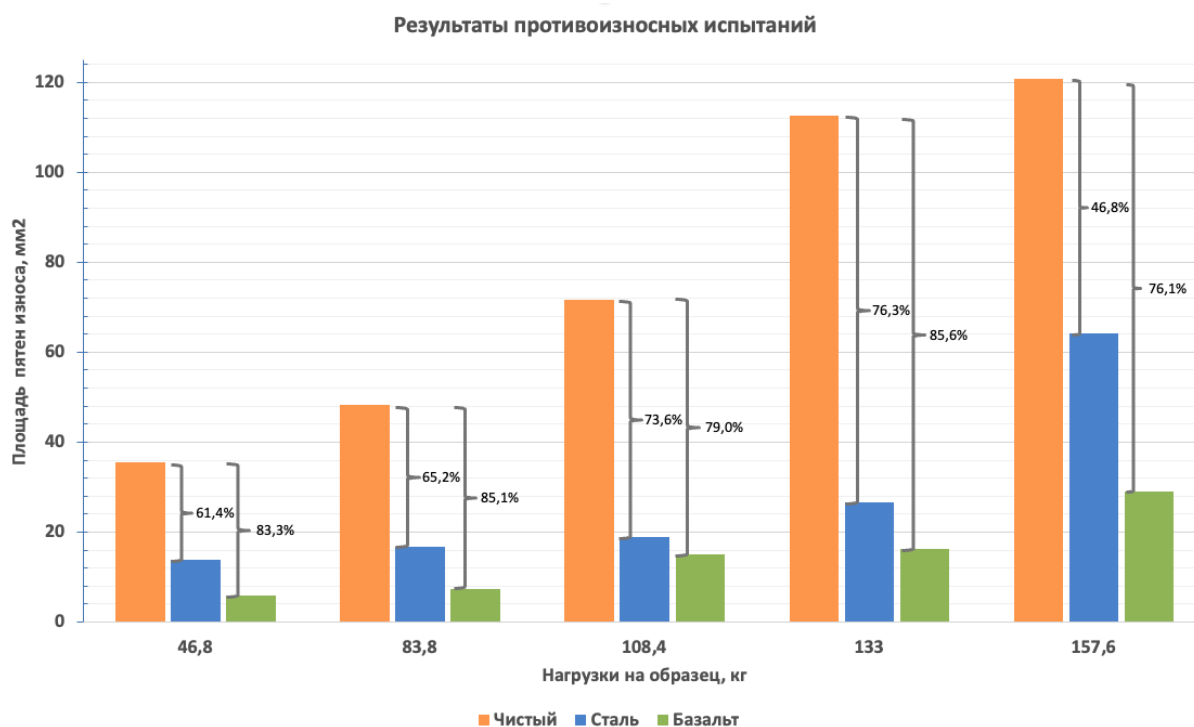


Рис. 3. Результаты противоизносных испытаний
Fig. 3. Anti-wear test results

Результаты противозадирных испытаний

Table 4

Results of antisize tests

№	Тип образца	Нагрузка заклинивания, кг
1	Без армирования	348,6
2	Армированный базальтом (4-5 % по мас.)	452,7
3	Армированный сталью (4-5 % по мас.)	323,2

Установлено (табл. 3), что наименьшими пятнами износа обладает материал, армированный базальтовой ватой. По данным табл. 4 выявлено, что наибольшей нагрузкой заклинивая, которая составляет 452,7 кг, обладает материал, армированный базальтовой ватой.

Процентное соотношение противоизносных и противозадирных свойств проводилась путем сравнения значений пятен

износа и нагрузки заклинивания материала без армирования с армированными материалами, так противоизносные свойства повышаются на 76...85 % при армировании базальтовой ватой и на 46...76 % при армировании стальной ватой. Противозадирные свойства повышаются при армировании базальтом на 23 %, при армировании сталью снижаются на 7 %.



Рис. 4. Результаты противозадирных испытаний
 Fig. 4. Extreme pressure test results

Таким образом, базальтовые и стальные армирующие компоненты в алюминиевой матрице позволяют получить материалы триботехнического назначения с высо-

кими триботехническими характеристиками, включающими противоизносные и противозадирные свойства.

Заключение

1. Разработана технология получения композиционного материала на основе алюминиевой матрицы методом литья по выплавляемым моделям, позволяющим получить материалы триботехнического назначения при сохранении их механических и физических характеристик.

2. Установлено, что противоизносные свойства повышаются на 76...85 % при

армировании базальтовой ватой и на 46-76% при армировании стальной ватой по отношению к неармированному образцу из сплава АВ.

3. Выявлено, что противозадирные свойства повышаются при армировании базальтом на 23 %, при армировании сталью снижаются на 7 % по отношению к неармированному образцу из сплава АВ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Любин Дж. Справочник по композиционным материалам/ Дж. Любин, кн.1. М.: Машиностроение, 1988. – 446 с.
2. Effects of Si on the aging behaviour and formability of aluminium alloys based on AA6016 / S. M. Hirth [and etc.] // Materials Science and Engineering. – 2001. – V. 319-321. P. 452-456.
3. Yilmaz O. Abrasive wear of Al₂O₃-reinforced aluminium-based MMCs / O. Yilmaz, S. Buytoz // Composites Science and Technology. – 2001. – 61. – P. 2381-2392.
4. Курганова Ю.А. Конструкционные металломатричные композиционные материалы: учебное пособие / Ю.А.Курганова, А.Г.Колмаков. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2015. – 141, [3] с., ил.
5. Абрамов К.А. Композиционный материал на основе алюминиевой матрицы / Абрамов К.А., Шолом В.Ю. / Новые материалы и перспективные технологии. 2021. С. 37-45.
6. Rambabu P. Aluminium alloys for aerospace applications //Aerospace materials andmaterial technologies. – Springer, Singapore, 2017. С. 29-52.
7. Joel I. Wang J., Oliver W. D. An aluminium super-inductor //Nature materials. 2019. Т. 18. №. 8. С. 775.
8. Имаметдинов Э.Ш., Валуева М.И. Композиционные материалы для поршневых двигателей (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. №3 (60). С. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-2
9. ГОСТ 1050-2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. – Введ 2015–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2014. – 39 с.
10. Andrade-Gonzalez N.R. Effect of heat treatment conditions on the aging process in 319 type aluminium casting alloys/ N.R. Andrade-Gonzalez, J.E. Gruzleski, F.H. Samuel // 2nd symposium on heat

treatment of metals and alloys, EHTS-TMS-Cairo. 2004. P. 199-207.

- ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. – Введ. 2000-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1997. 21 с.
- Gowrishankar M.C., Hiremath P., Shettar M. et al. Experimental validity on the casting characteristics of stir cast aluminium composites // Journal of Materials Research and Technology. 2020. Vol. 9. Iss. 3. P. 3340–3347. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.01.028.

REFERENCES

- Lubin J. Handbook of composite materials. Moscow: Mashinostroenie; 1988.
- Hirth SM. Effects of Si on the aging behaviour and formability of aluminium alloys based on AA6016. Materials Science and Engineering. 2001;319-321:452-456.
- Yılmaz O, Buytoz S. Abrasive wear of Al₂O₃-reinforced aluminium-based MMCs. Composites Science and Technology. 2001;61:2381-2392.
- Kurganova YuA, Kolmakov AG. Structural metal matrix composite materials: textbook. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University; 2015.
- Abramov KA, Sholom VYu. Composite material based on an aluminum matrix. New Materials and Promising Technologies; 2021.
- Rambabu P. Aluminium alloys for aerospace applications. Aerospace Materials and Material Technologies. Singapore: Springer; 2017.
- Joel I, Wang J, Oliver WD. An aluminium superconductor. Nature Materials. 2019;18(8):775.
- Imametdinova ESh, Valueva MI. Composite materials for piston engines: review. Aviation Materials and Technologies. 2020;3(60):19-28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-2

Информация об авторах:

Абрамов Кирилл Алексеевич – аспирант УУНиТ, инженер-исследователь ООО «ХТЦ УАИ», тел. +7(917)807-39-00.

Асланян Ирина Рудиковна – д.т.н., профессор кафедры «Технология производства двигателей летательных аппаратов» ФГБОУ ВО МАИ, тел. +7(977)398-80-89.

Abramov Kirill Alekseevich – Postgraduate Student of Ufa University of Science and Technology, Research Engineer Self-supporting Creative Center of Ufa Aviation Institute; phone: +7(917)807-39-00.

Aslanyan Irina Rudikovna – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Production Technology of Aircraft Engines, MAI; phone: +7(977)398-80-89.

13. Зборщик А.М. Специальные методы литья: конспект лекций /Зборщик А.М. Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2007. 158 с.

14. Effects of Si on the aging behaviour and formability of aluminium alloys based on AA6016 / S. M. Hirth [and etc.] // Materials Science and Engineering. 2001. V. 319-321. P. 452-456.

15. Батаев А. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение / А. А. Батаев, В. А. Батаев. Новосибирск: НГТУ, 2002. - 384 с.

9. GOST 1050-2013. Metal products from nonalloyed structural quality and special steels. General specification. Moscow: Standartinform; 2014.

10. Andrade-Gonzalez NR, Gruzleski JE, Samuel FH. Effect of heat treatment conditions on the aging process in 319 type aluminium casting alloys. 2nd Symposium on Heat Treatment of Metals and Alloys; EHTS-TMS-Cairo; 2004.

11. GOST 4784-97. Aluminium and wrought aluminium alloys. Grades. Moscow: Standartinform; 1997.

12. Gowrishankar MC, Hiremath P, Shettar M. Experimental validity on the casting characteristics of stir cast aluminium composites. Journal of Materials Research and Technology. 2020;9(3):3340–3347. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.01.028.

13. Zborshchik AM. Special casting methods: lecture notes. Donetsk: DonNTU; 2007.

14. Hirth SM. Effects of Si on the aging behaviour and formability of aluminium alloys based on AA6016. Materials Science and Engineering. 2001;319-321:452-456.

15. Bataev AA, Bataev VA. Composite materials: structure, preparation, application. Novosibirsk: NSTU; 2002.

Тюленев Денис Генрихович – заведующий триботехнической лаборатории ООО «ХТЦ УАИ», тел. +7(964)964-57-85.

Жернаков Владимир Сергеевич – академик Академии наук Республики Башкортостан, докт. техн. наук, профессор, научный руководитель ООО «ХТЦ УАИ», заслуженный деятель науки России, тел. +7(347)272-47-88.

Tyulenev Denis Genrikhovich – Head of the Tribotechnology Laboratory of Self-supporting Creative Center of Ufa Aviation Institute; phone: +7(964)964-57-85.

Zhernakov Vladimir Sergeevich – Member of the Academy of Sciences of Bashkortostan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Director of Self-supporting Creative Center of Ufa Aviation Institute, Honored Scientist of Russia; phone: +7(347)272-47-88.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 10.11.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023; принята к публикации 27.11.2023. Рецензент – Шалыгин М.Г., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 10.11.2023; approved after review on 23.11.2023; accepted for publication on 27.11.2023. The reviewer is Shaligin M.G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.