

УДК 621.74:539.178

## Микроструктура и коэффициент трения силуминов, полученных при высокоскоростном затвердевании

О.В. Гусакова<sup>1</sup>, В.Г. Шепелевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>УО «Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова»  
Белорусского государственного университета,  
ул. Долгобродская, 23/1, г. Минск 220070, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

Поступила в редакцию 17.01.2024.

После доработки 12.04.2024.

Принята к публикации 17.04.2024.

Приведены результаты исследования триботехнических характеристик и микроструктуры сверхбыстрозатвердевших сплавов Al — 12,2 мас. % Si — 0,2 мас. % Fe (АК12оч) и Al — 12,5 мас. % Si — 0,8 мас. % Mg — 0,4 мас. % Mn — 0,7 мас. % Fe — 0,9 мас. % Ni — 1,7 мас. %, Cu (Al–Si–M). Методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа изучено влияние многокомпонентного легирования на микроструктуру околэвтектического силумина. Многокомпонентное легирование эвтектического сплава Al–Si магнием, марганцем, железом, никелем и медью приводит к уменьшению размеров первичных дендритов  $\alpha$ -Al до 3—4 мкм. Триботехнические испытания проведенные в условиях сухого трения при возвратно поступательном движении индентора, показали, что легирование металлами быстрозатвердевших сплавов эвтектического силумина обеспечивает снижение коэффициента трения на 25 %. Анализ поверхностного состояния образовавшегося трека показал, что в результате деформационного нагрева протекает окисление фазы  $\alpha$ -Al, разрушение окисной плёнки, представляющей собой третье тело, и вынос её за пределы трека. Также было обнаружено раздробление пластин кремния в зоне трека в наноразмерные частицы. Воздействие индентора также приводит однородному распределению равноосных частиц интерметаллических соединений при сохранении их фазового состава.

**Ключевые слова:** высокоскоростное затвердевание, силумины, микроструктура, коэффициент трения.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-2-101-109

**Адрес для переписки:**

О.В. Гусакова  
УО «Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова» Белорусского государственного университета,  
ул. Долгобродская, 23/1, г. Минск 220070, Беларусь  
e-mail: ol.gusakova@gmail.com

**Для цитирования:**

О.В. Гусакова, В.Г. Шепелевич.  
Микроструктура и коэффициент трения силуминов, полученных при высокоскоростном затвердевании.  
Трение и износ.  
2024. — Т. 45, № 2. — С. 101–109.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-2-101-109

**Address for correspondence:**

O.V. Gusakova  
International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University,  
Dolgobrodskaya st., 23/1, Minsk 220070, Belarus  
e-mail: ol.gusakova@gmail.com

**For citation:**

O.V. Gusakova and V.G. Shepelevich.  
[Microstructure and Coefficient of Friction of Silumins Obtained by Rapid Solidification].  
Trenie i Iznos.  
2024, vol. 45, no. 2, pp. 101–109 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-2-101-109

# Microstructure and Coefficient of Friction of Silumins Obtained by Rapid Solidification

O.V. Gusakova<sup>1</sup> and V.G. Shepelevich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University,  
Dolgobrodskaya st., 23/1, Minsk 220070, Belarus

<sup>2</sup>Belarusian State University,  
Nezavisimosti ave., 4, Minsk 220030, Belarus

Received 17.01.2024.

Revised 12.04.2024.

Accepted 17.04.2024.

## Abstract

The results of a study of the tribological properties and microstructure of rapidly solidified Al — 12.2 wt. % Si — 0.2 wt. % Fe (AK12vp) and Al — 12.5 wt. % Si — 0.8 wt. % Mg — 0.4 wt. % Mn — 0.7 wt. % Fe — 0.9 wt. % Ni — 1.7 wt. %, Cu (Al—Si—M) alloys are presented. The effect of multicomponent alloying on the microstructure of near-eutectic silumin was studied using scanning electron microscopy and X-ray spectrometry. Multicomponent alloying of the Al—Si eutectic alloy with magnesium, manganese, iron, nickel and copper leads to a reduction in the size of the primary  $\alpha$ -Al dendrites to 3—4  $\mu\text{m}$ . Tribological tests carried out under conditions of dry friction with reciprocating motion of the indenter showed that alloying by metals of rapidly solidified eutectic silumin leads to a reduction in the coefficient of friction by 25 %. An analysis of the surface state of the track showed that, as a result of deformation heating, the oxidation of the  $\alpha$ -Al phase occurs, the destruction of the oxide film, which represents the third body, and its removal beyond the track. The fragmentation of silicon plates in the track area into nano-sized particles was also obtained. The impact of the indenter also leads to a uniform distribution of equiaxed particles of intermetallic compounds while maintaining their phase composition.

**Keywords:** rapid solidification, silumins, microstructure, coefficient of friction.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-2-101-109

---

### Адрес для переписки:

О.В. Гусакова  
УО «Международный государственный экологический институт  
им. А.Д. Сахарова» Белорусского государственного университета,  
ул. Долгобродская, 23/1, г. Минск 220070, Беларусь  
e-mail: ol.gusakova@gmail.com

### Для цитирования:

О.В. Гусакова, В.Г. Шепелевич.  
Микроструктура и коэффициент трения силуминов, полученных  
при высокоскоростном затвердевании.  
Трение и износ.  
2024. — Т. 45, № 2. — С. 101—109.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-2-101-109

---

### Address for correspondence:

O.V. Gusakova  
International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State  
University,  
Dolgobrodskaya st., 23/1, Minsk 220070, Belarus  
e-mail: ol.gusakova@gmail.com

### For citation:

O.V. Gusakova and V.G. Shepelevich.  
[Microstructure and Coefficient of Friction of Silumins Obtained by  
Rapid Solidification].  
Trenie i Iznos.  
2024, vol. 45, no. 2, pp. 101—109 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-2-101-109

## Список использованных источников

1. **Peeru Naika M. and Balaram Padal K.T.** A Review on Friction and Wear Performance of Al-Si Alloy/Steel Tribopair // *Materials Today: Proceedings*. — 2019 (18), 5502—5506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.581>
2. **Марукович Е.И., Стеценко В.Ю.** Технологические проблемы модифицирования структуры отливок из силуминов. Пути решения // *Литье и металлургия*. — 2019, № 2, 19—22. DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-2-19-22>
3. **Скоробагатко Ю.П.** Модифицирование заэвтектических алюминиевых сплавов с применением активных добавок // *Металл и литье Украины*. — 2009, № 9, 18—28
4. **Ласковнев А.П., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Коваль Н.Н., Углов В.В., Черенда Н.Н., Бибик Н.В., Асташинский В.М.** Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой. — Минск: Беларуская навука. — 2013
5. **Takahiro. Kimura, Takayuki Nakamoto, Masataka Mizuno, and Hideki Araki.** Effect of Silicon Content on Densification, Mechanical and Thermal Properties of Al-xSi Binary Alloys Fabricated Using Selective Laser Melting // *Materials Science and Engineering*. — 2017 (A 682), 593—602. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.11.059>
6. **Rui Chen, Yu-feng Shi, Qing-yan Xu, and Baicheng Liu.** Effect of Cooling Rate on Solidification Parameters and Microstructure of Al-7Si-0.3Mg-0.15Fe Alloy // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. — 2014 (24), 1645—1652. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63236-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63236-2)
7. **Herlach D.M., Galenko P., and Holland-Moritz D.** Metastable Solids from Undercooled Melts. — Pergamon is an imprint of Elsevier. — 2007
8. **Калиниченко А.С., Кривошеев Ю.К.** Определение глубины переохлаждения расплава и характера структурообразования при закалке из жидкого состояния // *Литье и металлургия*. — 2001 (3), 60—65
9. **Гусакова О.В., Шепелевич В.Г., Александров Д.В., Стародумов И.О.** Особенности формирования структуры сплавов Al-12.2Si-0.2Fe при сверхбыстрой закалке из расплава // *Расплавы*. — 2020, № 2, 138—148. DOI: [10.31857/S0235010620020048](https://doi.org/10.31857/S0235010620020048)
10. **Qing Liu, Maowen Liu, Cong Xu, Wenlong Xiao, Hiroshi Yamagata, Shenghui Xie, and Chaoli Ma.** Effects of Sr, Ce and P on the Microstructure and Mechanical Properties of Rapidly Solidified Al-7Si Alloys // *Materials Characterization*. — 2018 (140), 290—298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.04.018>
11. **Гусакова О.В., Гусакова С.В., Шепелевич В.Г.** Влияние скорости охлаждения расплава на

микроструктуру сплава Al-Si, легированного Mg, Mn, Fe, Ni и Cu // *Физика металлов и металлосложение*. — 2022 (123), № 5, 533—540. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0015323022050035>

12. **Fortini Annalisa, Merlin Mattia, Fabbri Elettra, Pirletti Stefano, and Garagnani Gian Luca.** On the Influence of Mn and Mg Additions on Tensile Properties, Microstructure and Quality Index of the A356 Aluminum Foundry Alloy // *Procedia Structural Integrity*. — 2016 (2), 2238—2245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.280>
13. **Uzun O., Karaaslan T., Gogebakan M., and Keskin M.** Hardness and Microstructural Characteristics of Rapidly Solidified Al-8-16 wt.%Si Alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2004 (376), 149—157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.01.017>
14. **Шепелевич В.Г., Гусакова О.В., Гусакова С.В.** Влияние скорости охлаждения на структурно-фазовое состояние сплава Al-Si, легированного металлами // *Физика и химия обработки материалов*. — 2023, № 2 63—72. DOI: <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2023-3-63-71>
15. **Gwalani B., Fu W., Olszta M., Silverstein J., Yadav D.R., Manimunda P., and Devaraj A.** Lattice Misorientation Evolution and Grain Refinement in Al-Si Alloys under High-Strain Shear Deformation // *Materialia*. — 2021 (18), 101146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101146>

## References

1. **Peeru Naika M. and Balaram Padal K.T.** A Review on Friction and Wear Performance of Al-Si Alloy/Steel Tribopair // *Materials Today: Proceedings*. — 2019 (18), 5502—5506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.581>
2. **Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu.** Tekhnologicheskie problemy modifitsirovaniya struktury otlivok iz siluminov. puti resheniya // *Litiyo i Metallurgiya*. — 2019, № 2, 19—22. DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-2-19-22> (in Russian)
3. **Skorobagat'ko Y.P.** Modifitsirovanie zaevtekticheskikh alyuminievykh splavov s primeneniem aktivnykh dobavok // *Metall i lit'e Ukrainy*. — 2009, № 9, 18—28 (in Russian)
4. **Laskovnev A.P., Ivanov Y.F., Petrikova E.A., Koval' N.N., Uglov V.V., Cherenda N.N., Bibik N.V., Astashinskij V.M.** Modifikatsiya struktury i svoystv evtekticheskogo silumina elektronno-ionno-plazmennoj obrabotkoj. — Minsk: Belaruskaya navuka. — 2013 (in Russian)
5. **Takahiro. Kimura, Takayuki Nakamoto, Masataka Mizuno, and Hideki Araki.** Effect of Silicon Content on Densification, Mechanical and Thermal Properties of Al-xSi Binary Alloys Fabricated Using Selective Laser Melting // *Materials Science and Engineering*. — 2017 (A 682), 593—602. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.11.059>

6. **Rui Chen, Yu-feng Shi, Qing-yan Xu, and Bai-cheng Liu.** Effect of Cooling Rate on Solidification Parameters and Microstructure of Al-7Si-0.3Mg-0.15Fe Alloy // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* — 2014 (24), 1645—1652. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63236-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63236-2)
7. **Herlach D.M., Galenko P., and Holland-Moritz D.** *Metastable Solids from Undercooled Melts.* — Pergamon is an imprint of Elsevier. — 2007
8. **Kalinichenko A.C., Krivosheev Y.K.** Opredelenie glubiny pereohlazhdeniya rasplava i haraktera strukturoobrazovaniya pri zakalke iz zhidkogo sostoyaniya // *Lit'e i metallurgiya.* — 2001 (3), 60—65. (in Russian)
9. **Gusakova O.V., Shepelevich V.G., Alexandrov D.V., and Starodumov I.O.** Structure Formation in the Melt-Quenched Al-12.2Si-0.2Fe Alloys // *Russian Metallurgy (Metally).* — 2020 (8), 885—892. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029520080054>
10. **Qing Liu, Maowen Liu, Cong Xu, Wenlong Xiao, Hiroshi Yamagata, Shenghui Xie, and Chaoli Ma.** Effects of Sr, Ce and P on the Microstructure and Mechanical Properties of Rapidly Solidified Al-7Si Alloys // *Materials Characterization.* — 2018 (140), 290—298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.04.018>
11. **Gusakova O.V., Gusakova S.V., and Shepelevich V.G.** Melt Cooling Rate Effect on the Microstructure of Al-Si Alloy Doped with Mg, Mn, Fe, Ni, and Cu // *Physics of Metals and Metallography.* — 2022 (123), № 5, 500—506. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0031918X22050039>
12. **Fortini Annalisa, Merlin Mattia, Fabbri Elettra, Pirletti Stefano, and Garagnani Gian Luca.** On the Influence of Mn and Mg Additions on Tensile Properties, Microstructure and Quality Index of the A356 Aluminum Foundry Alloy // *Procedia Structural Integrity.* — 2016 (2), 2238—2245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.280>
13. **Uzun O., Karaaslan T., Gogebakan M., and Keskin M.** Hardness and Microstructural Characteristics of Rapidly Solidified Al-8-16 wt.%Si Alloys // *Journal of Alloys and Compounds.* — 2004 (376), 149—157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.01.017>
14. **Shepelevich, V.G., Gusakova O.V., Gusakova S.V.** Vliyanie skorosti ohlazhdeniya na strukturno-fazovoe sostoyanie splava Al-Si, legirovannogo metallami // *Fizika i himiya obrabotki materialov.* — 2023, № 2, 63—72. DOI: <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2023-3-63-71> (in Russian)
15. **Gwalani B., Fu W., Olszta M., Silverstein J., Yadav D.R., Manimunda P., and Devaraj A.** Lattice Misorientation Evolution and Grain Refinement in Al-Si Alloys under High-Strain Shear Deformation // *Materialia.* — 2021 (18), 101146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101146>

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в редакцию журнала.

Адрес редакции: 246050, ул. Кирова 32а, г. Гомель, Беларусь. Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11

Full text of articles can be purchased from the editorial office.

Address: 32a Kirov Street, Gomel, Belarus, 246050. Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11

E-mail: [FWJ@tut.by](mailto:FWJ@tut.by)