

**Оригинальная статья**

УДК 621.763

DOI:10.57070/2304-4497-2025-2(52)-110-117

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОДИФИЦИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

© 2025 г. М. Х. Нориега Флорес, И. В. Строкина, А. Д. Трофимова, В. С. Маринич,  
С. В. Коновалов

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Несмотря на высокую стоимость алюминиевых сплавов в сравнении с чугунами и сталями, они находят широкое применение в различных отраслях машиностроения из-за значительно меньшей массы отливок и сокращения трудоемкости их механической обработки. Многочисленные исследования процессов кристаллизации расплава связаны с тем, что существуют методы воздействия на ключевые характеристики сплава (прочность, пластичность, коррозионная стойкость и теплопроводность). Повышение качества изделий из алюминиевых сплавов является важной научно-технической задачей, которая объединяет теорию и технологию литейного производства с металловедением. Проведен обзор существующих методик и способов модифицирования алюминия и его сплавов. Описаны основные теории, виды модифицирования и процессы, происходящие при действии модифицирующих добавок на расплав. Рассмотрены способы введения модифицирующих элементов в расплав. Изложены технологии получения порошкообразных смесей и лигатур, имеющие наибольший эффект модифицирования. Приведены методы кавитационного и лазерного воздействий на расплав, усиливающие действие модификатора. Рассмотрены информационный и генетический подходы к процессу модифицирования. Обобщены и перечислены основные эффективные модифицирующие добавки (редкоземельные металлы, алмазный порошок, углеродные нанотрубки, керамические тугоплавкие соединения AlN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC, TiC, V<sub>4</sub>C, TiB<sub>2</sub>). Описанные методы являются перспективными решениями, позволяющими сделать этот легкий и прочный металл еще более универсальным и высокопроизводительным материалом для различных отраслей промышленности.

**Ключевые слова:** модификаторы, микроструктура, алюминиевые сплавы, методы модифицирования, кристаллическая структура

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00064, <https://rscf.ru/project/24-19-00064/>

**Для цитирования:** Нориега Флорес М.Х., Строкина И.В., Маринич В.С., Трофимова А.Д., Коновалов С.В. Анализ методов модифицирования алюминиевых сплавов. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):110–117. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-110-117](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-110-117)

**Original article**

**ANALYSIS OF METHODS FOR MODIFYING ALUMINUM ALLOYS**

© 2025 M. J. Noriega Flores, I. V. Strokin, A. D. Trofimova, V. S. Marinich,  
S. V. Kononov

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

**Abstract.** Despite the high cost of aluminum alloys compared to cast irons and steels, they find wide application in various branches of mechanical engineering due to the significantly lower weight of castings and the reduction in the labor intensity of their mechanical processing. To date, a large number of works have been published on the study of the microstructural parameters of aluminum alloys. Numerous studies of melt crystallization processes

are associated with the fact that there are methods of influencing such key characteristics of the alloy as strength, ductility, corrosion resistance, and thermal conductivity. Forecasting the quality of products obtained from aluminum alloys is one of the most important scientific and technical tasks at the intersection of the theory and technology of foundry production and the adjacent field of materials science. This article provides an overview of existing methods and methods for modifying aluminum and its alloys. The main theories, types of modification, and processes occurring under the action of modifying additives on the melt are described. The methods of introducing modifying elements into the melt are considered. The technologies for obtaining powder mixtures and master alloys with the greatest modifying effect are presented. Methods of cavitation and laser exposure to the melt, enhancing the effect of the modifier, are given. The informational and genetic approaches to the modification process are considered. The main effective modifying additives are summarized and listed: rare earth metals, diamond powder, carbon nanotubes, as well as refractory ceramic compounds: AlN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC, TiC, B<sub>4</sub>C, TiB<sub>2</sub>. The described methods are promising solutions that can make this light and strong metal even more versatile and high-performance material for various industries.

**Keywords:** modifiers, microstructure, aluminum alloys, modification methods, crystal structure

**Financing.** The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 24-19-00064, <https://rscf.ru/project/24-19-00064/>

**For citation:** Noriega Flores M.J., Strokina I.V., Trofimova A.D., Marinich V.S., Konovalov, S.V. Analysis of methods to improve the properties of aluminum alloys. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):110–117. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-110-117](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-110-117)

## Введение

В настоящий момент существуют различные технологии и методы воздействия на структуру алюминиевого сплава, такие как ультразвуковое воздействие, магнитное, физическое (кристаллизация под избыточным давлением) и термомеханическое (нагрев, охлаждение, механическая деформация) [1]. Модифицирование является относительно недорогим и эффективным способом измельчения зерен алюминиевого сплава [2]. Доказано, что использование модификаторов непосредственно влияет на кристаллическую структуру и фазовое распределение материала, а также на его механические и эксплуатационные свойства, улучшая их и делая пригодными для использования в самых разных отраслях промышленности (от авиастроения и автомобилестроения до электротехники и строительной индустрии) благодаря небольшой массе, высокой коррозионной стойкости и простоте изготовления [3]. Несмотря на известность модифицирующих добавок, единого объяснения их влияния на кристаллизацию алюминия до сих пор не существует из-за разнообразной природы их воздействия и условий плавки, литья и термической обработки [4]. В настоящей работе проведен обзор существующих в настоящее время исследований процесса модифицирования алюминия и его сплавов.

## Обсуждение

При модифицировании расплава происходят процессы, влияющие на процесс кристаллизации алюминия или его сплавов:

*I.* Инокуляция происходит с использованием тугоплавких частиц (Ti, Zr, V, TiC, SiC, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiB<sub>2</sub>), которые в расплаве образуют высокодисперсную фазу. Частицы этой взвеси не взаимодействуют химически с расплавом, а играют роль зародышей, от которых происходит рост кристаллов [5]. Некоторые модификаторы рассматриваемого вида получают непосредственно в расплаве в качестве интерметаллидного соединения Al<sub>3</sub>Ti[6].

*2.* Лимитация осуществляется с применением поверхностно-активных элементов (Na, Sr, Sb, Ba), частицы которых адсорбируются на границах зародившегося кристалла и снижают его скорость роста, тем самым увеличивая количество центров кристаллизации, делая структуру сплава мелкозернистой [7].

Процесс модифицирования делится на следующие виды:

*I* – включает изменение размеров первичных зерен-дендритов и других продуктов первичной кристаллизации;

*II* – предполагает изменение внутреннего строения зерен-дендритов; в результате ветви дендритов измельчаются и утончаются, а вторичные фазы распределяются более равномерно;

*III* – направлено на изменение структуры эвтектик, содержащих легкоплавкие компоненты, например, силумины [8]; влияние на эвтектические структуры позволяет улучшить такие характеристики материала (как прочность и пластичность) [9].

Ввод модификаторов в расплав может осуществляться по-разному. Самый простой и незатратный способ – введение модификатора в виде

порошка непосредственно в печь при выплавке сплава или добавлением смеси в разливочный ковш перед заливкой металла в формы. Недостатки этого способа очевидны: усвоение модификатора расплавом может быть незначительным, вследствие плохой перемешиваемости и смачиваемости смеси, а также сгоранием большей части модификатора до смачивания расплавом. Поэтому вместо чистого модификатора вводят порошковые смеси с добавками солей и рафинирующих реагентов. Будет происходить взаимодействие солей и оксидов с расплавом алюминия с образованием интерметаллидов, которые будут являться центрами кристаллизации [10]. Совместное использование смеси порошка легирующих добавок и рафинирующих веществ положительно зарекомендовало себя в условиях производственного литья алюминиевых сплавов [11]. Перспективным является инъекционный метод введения модифицирующего порошка в расплавы алюминия или его сплавов. Суть метода в том, что ввод модифицирующего элемента осуществляется высокотемпературной обменной реакцией солевого расплава и алюминия [12].

Наибольшее распространение в промышленности получил способ модифицирования лигатурами, содержащими в своем составе тугоплавкие дисперсные частицы, ввод которых меняет процесс кристаллизации и позволяет снизить газовую пористость и получить более мелкую однородную структуру [2]. Лигатуры в металлургии представляют собой металлические сплавы, содержащие один или несколько легирующих элементов в заданных концентрациях, которые вводятся в расплав основного металла для придания ему требуемых физических, химических и механических свойств. Применение лигатур позволяет уменьшить потери модифицирующих добавок вследствие большей усвояемости в расплаве, улучшить условия выплавки, а также повысить производственные показатели. Лигатуры могут быть представлены различной формы: в виде гранул, порошков, таблеток, слитков, прутков, брикетов, таблетированных смесей и других форм. Эффективное модифицирование алюминиевых сплавов требует не только подбора состава лигатур, но и разработки технологий их получения и применения, обеспечивающих стабильность и повторяемость структуры конечного материала. В работе [13] доказано, что с уменьшением толщины лигатуры, то есть с увеличением скорости охлаждения в процессе ее приготовления существенно измельчаются интерметаллиды и увеличивается их количество. Модифицирующий эффект лигатуры в виде пластины 0,5 мм, полученной закалкой из жидкого состояния, более чем в два раза

превышает эффект применения прутковой лигатуры. В работе [14] в качестве модифицирующей добавки применяли гранулы из того же сплава, что и выплавляли. Грануляцию проводили с высокими скоростями охлаждения, затем гранулы подвергали прессованию в прутки. Увеличение прочностных характеристик выплавляемого сплава в рассматриваемом случае объясняется не только модифицирующим эффектом, но и упрочняющим, связанным с раздроблением при прессовании на мелкодисперсные частицы оксидной пленки  $Al_2O_3$  на гранулах. В работе [15] предложена концепция кавитационного воздействия на агломераты частиц зародышевого типа, вводимые в расплав лигатурным прутком. Доказано, что за счет ультразвукового воздействия происходит интенсивное дробление агломератов модификатора и как следствие, увеличение активных зародышевых частиц.

В работе [16] удалось использовать процесс лазерного модифицирования поверхности образца алюминиевого сплава для повышения коррозионной стойкости, механических свойств и износостойкости в условиях адгезионного и абразивного изнашивания.

В качестве дисперсной упрочняющей фазы при модифицировании алюминиевых сплавов наиболее часто используют керамические частицы тугоплавких соединений: нитриды ( $AlN$ ,  $Si_3N_4$ ) [17]; карбиды ( $SiC$ ,  $TiC$ ,  $B_4C$ ) [18 – 20]; оксиды ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ) [21]; бориды ( $TiB_2$ ) [22; 23] и композиции на их основе [24]. Введение и равномерное распределение в объеме расплава алюминия этих химических соединений представляет собой большую проблему, так как частицы модификатора легко слипаются в агломераты и плохо смачиваются жидким алюминием [25]. Решением этой проблемы может быть применение технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) керамических частиц в расплавах [26]. СВС представляет собой последовательную химическую реакцию в расплаве реагентов с образованием конечных продуктов [27]. Частицы керамических соединений не вводятся извне с окисленными поверхностями и адсорбированными газами и влагой, а образуются непосредственно в объеме алюминиевого расплава, что существенно повышает межфазную прочность [26].

Положительный эффект модифицирования алюминиевых сплавов отмечен при введении в расплав редкоземельных элементов (РЗЭ) [28]. В работе [29] доказано положительное влияние добавки скандия (примерно 0,02 % от массы расплава) на прочностные характеристики сплава вследствие измельчения макроструктуры более чем в

два раза. Добавление гадолиния совместно с цирконием и скандием позволило в работе [30] добиться гораздо более выраженного измельчения зерна при одновременном улучшении текучести алюминиевого сплава. В работе [5] рассматривается положительное влияние европия и гафния на сплавы. Однако показано, что введение в алюминиевые сплавы таких редкоземельных металлов как иттербий и эрбий практически не дало эффекта модифицирования в объеме расплава.

Существуют данные по эффективному модифицированию алюминиевых сплавов частицами наноструктурированного тугоплавкого алмазного порошка, являющимся сопутствующим продуктом при получении искусственных алмазов. Добавление тугоплавких частиц алмазного порошка в расплав способствует измельчению структуры сплава и создает условия для равномерного распределения упрочняющих интерметаллидов при термической обработке отливок из модифицированного сплава [31].

Добавление углеродных нанотрубок в алюминиевые сплавы улучшает зернистую структуру сплава, делает ее однородной, что способствует повышению механических свойств (твердости и прочности при растяжении отливок) [32].

Необходимо отметить, что существует три современных теории: синтез сплавов, электронное и геновое модифицирование. В первых двух теориях рассматриваются непосредственно химические реакции, а свойства расплава и особенности структуры модификаторов не учитываются [33]. Теория генового модифицирования основывается на наличии в расплаве унаследованных элементов структуры шихтовых металлов размером от 5 до 200 нм, которые оказывают генетическое влияние на структуру закристаллизовавшихся сплавов. [7]. Модифицирование рассматривается как система, включающая геномы: модифицирующего (исходного) жидкого алюминиевого сплава и микрокристаллического модификатора (МКМ). Рассматриваемая теория учитывает наследственное влияние шихтообразующих составляющих, расплава и модификатора в системе шихта → расплав → модификатор → модифицированный сплав. Предусматривая наследственное влияние используемых материалов при модифицировании можно уменьшить расходы дефицитных модификаторов, обеспечить высокий эффект модифицирования и получить улучшенные характеристики литых и деформированных изделий из алюминиевых сплавов.

В работе [34] представлен информационный подход к процессу модифицирования. От зародышевой частицы модификатора идет поток информации, заставляющий атомы алюминия в кластере располагаться в пространстве опреде-

ленным образом: атомы алюминия «пристраиваются» к существующей кристаллической решетке сначала материала зародышевой частицы, а потом и к кристаллической решетке расплава. Исходя из этого, необходим центр кристаллизации такого размера, чтоб поток информации от него значительно превышал поток информации от кластера критического размера. Если ввести в расплав порядка 10 тыс. штук на  $1 \text{ см}^3$  зародышевых частиц размером примерно 5 мкм и распределить их равномерно в объеме расплава, то в затвердевшем расплаве должны образоваться зерна диаметром около 0,5 мм, что согласуется с данными работ [34; 35].

### Выводы

Существующие теории модифицирования алюминия и его сплавов недостаточно разработаны, многие их положения являются спорными. Отсутствует единая классификация модификаторов. Для удовлетворения растущих потребностей промышленности, постоянные исследования и экспериментальные разработки в области модифицирования постоянно расширяют спектр применения алюминиевых сплавов.

Для оптимизации свойств алюминиевых сплавов применяются различные методы модифицирования расплава: добавление порошкообразных рафинирующих смесей, лигатур различной формы и разных способов производства; ультразвуковое, лазерное воздействие, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, термомеханическая обработка, разработка новых технологий литья и другие.

Перспективными модифицирующими добавками в настоящее время являются редкоземельные металлы, а также тугоплавкие наночастицы нитридов алюминия, кремния, карбиды и бориды кремния и титана.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sun W., Zhu Y., Marceau R., Wang L., Zhang Q., Gao X., Hutchinson C. Precipitation strengthening of aluminum alloys by room-temperature cyclic plasticity. *Science*. 2019; 363(6430):972–975. <https://colab.ws/articles/10.1126/science.aav7086>
2. Костин И.В., Безруких А.И., Беляев С.В., Фролов В.Ф., Губанов И.Ю., Лесив Е.М., Степаненко Н.А. Исследование технологии модифицирования при литье плоских слитков 5XXX серии. *Журнал Сибирского федерального университета. Химия*. 2017; 10(1):90–98.
3. Калинина Н.Е., Джур Е.А., Калинин В.Т., Носова Т.В., Кашенкова А.В. Влияние модифицирования на структуру и механиче-

- ские свойства сложнoleгированных алюминиевых сплавов. *Вестник двигателестроения. Конструкционные материалы*. 2016;1:118–120.
4. Тошев М.Т. Применение нитридов в качестве модификаторов сплавов алюминия. *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. 2019;1(45):93–96. EDN: PWGTKR.
  5. Дуюнова В.А., Трапезников А.В., Леонов А.А., Коренева Е.А. Модифицирование литейных алюминиевых сплавов (обзор). *Труды ВИАМ*. 2023; 4(122):14–26. EDN: PODXET. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2023-0-4-14-26>
  6. Альтман М.Б., Стромская Н.П. Повышение свойств стандартных литейных алюминиевых сплавов. М.: Металлургия. 1984:128.
  7. Никитин В.И., Никитин К.В. Генное модифицирование алюминиевых литейных и деформируемых сплавов. *Металлургия машиностроения*. 2016;5:10–14. EDN: WMNMXR.
  8. Гуреева М.А. Модифицирование слитков алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si кальцием. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2015;9:3–7. EDN: UHLAVF.
  9. Shabel B.S. Friction and Wear of Aluminum-Silicon Alloys. *National Institute of Standards and Technology*. 2013;18:10.
  10. Антонов М.М., Шамсутдинова М. Г., Орелкина Т.А. Модифицирование алюминиевых сплавов универсальными порошковыми веществами. *XVII международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых. Екатеринбург, 5–9 декабря 2016: сборник научных трудов. Ч. 2*. Екатеринбург: Издательство Уральского университета. 2016:292–295.
  11. Гребнев Ю.В., Жаркова В.Ф., Окопный О.С. Комплексный процесс модифицирования и фильтрационного рафинирования литейных сплавов алюминия. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2012; 9(96):161–164. EDN: PAXPH.
  12. Скачков В.М., Яценко С.П. Модифицирование алюминиевых сплавов редкими металлами – основа перспективных материалов в строительстве и транспорте. *Нанотехнологии в строительстве. Научный интернет-журнал*. 2016;8(3):60–69. EDN: VZZFDP. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2016-8-3-60-69>
  13. Филиппова И.А., Белов В.Д., Дибров И.А. Модифицирование алюминиевых сплавов лигатурами Al5TiB, закаленными из жидкого состояния. *Литейщик России*. 2011;3:38–40. EDN: NTVNWV.
  14. Крушенко Г.Г. Модифицирование алюминиевыми гранулами алюминиевых деформируемых сплавов при литье слитков. *Решетневские чтения*. 2009; 1:331–332. EDN: VBEGGV.
  15. Эскин Г.И., Бочвар С.Г. Модифицирование алюминиевых сплавов акустическим воздействием. *Технология легких сплавов*. 2018;3:14–19. EDN: YLFMHR.
  16. Саврай Р.А., Малыгина И.Ю., Макаров А.В., Осинцева А.Л., Роговая С.А., Колобылин Ю.М. Влияние лазерного легирования порошковыми смесями Cu – Zn – Ti и Si – Cu на структуру и свойства литейного алюминиевого сплава. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2019;21(4):70–84. EDN: LWRSCQ. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.4-70-84>
  17. Premkumar M., Chu M.G. Al-TiC particulate composite produced by a liquid state in situ process. *Materials Science and Engineering A*. 1995; 202(1–2):172–178. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)09787-2](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)09787-2)
  18. Liu X., Zhenqing W., Zuogui Z., Xiufang B. The relationship between microstructures and refining performances of Al-Ti-C master alloys. *Materials Science and Engineering A*. 2002; 332(1–2):70–74. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01751-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01751-8)
  19. Birol Y. Grain Refining Efficiently of Al-Ti-C Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2006; 422(1-2):128–131. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.11.059>
  20. Cai X., Dong B., Lin S., Liu D. Improvements of microstructure and mechanical properties of wire-arc directed energy deposition 2024 aluminum alloy after adding TiC nanoparticles. *Virtual and Physical Prototyping*. 2025;20(1):22. <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2024.2442489>
  21. Апакашев Р. А., Валиев Н.Г., Красиков С.А., Хазин М.Л. Исследование высокотемпературного взаимодействия оксида кремния (IV) с алюминием и его сплавами. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2021; 1:271–283. EDN: ONJYUM.
  22. Bustos Ó., Leiva R., Allende R., Sanchez Ch. Effect of magnetic stirring, grain modification and refinement on the solidification structure of an A356 aluminum alloy. *Revista Materia*. 2021;26(1):1–16. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210001.1227>
  23. Moustafa E., Mosleh A. Effect of (Ti – B) modifier elements and FSP on 5052 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;823:153–745. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153745>

24. Ding H., Liu X., Yu L., Zhao G. The influence of forming processes on the distribution and morphologies of TiC in Al–Ti–C master alloys. *Scripta Materialia*. 2007; 57(7):575–578.
25. Титова Ю.В., Майдан Д.А., Тимошкин И.Ю. Исследование ввода нанопорошка нитрида алюминия марки СВС-Аз в расплав алюминия для приготовления ex-situ композитов Al – (1–10 %) AlN. *Современные материалы, техника и технологии*. 2017; 6(14):138–144. EDN: ZXYAYX.
26. Пантелеева А.В., Никонова Р.М. Модифицирование алюминия упрочняющими фазами TiB<sub>2</sub> и TiC методом СВС в расплаве. *Химическая физика и мезоскопия*. 2019; 21(1):65–69. EDN: WYLFWL.  
<http://dx.doi.org/10.15350/17270529.2019.1.9>
27. Сычев А.Е., Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез наноматериалов. *Успехи химии*. 2004;73(2):157–170.
28. Никитин К.В., Никитин В.И., Черников Д.Г. Наследственное влияние структуры магналиев на их деформируемость при холодной прокатке. *Металлургия машиностроения*. 2014;6:13–15. EDN: ТККСТТ.
29. Bayoumy D., Wu X., Zhu Yu., Kan W., Huang A. The latest development of Sc-strengthened aluminum alloys by laser powder bed fusion. *Elsevier Ltd*. 2023; 149:1–17.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmst.2022.11.028>
30. Xiao W., Xu C. Synergistic effects of Gd and Zr on grain refinement and eutectic Si modification of Al-Si cast alloy. *Materials Science & Engineering A*. 2017. 693:93–100.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.097>
31. Знаменский Л.Г., Ивочкина О.В., Речкалов И.В. Рафинирование и модифицирование сплавов рециклинговыми наноструктурированными материалами. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия»*. 2015;15(4):68–72. EDN: VAVXUT.  
<http://dx.doi.org/10.14529/met150409>
32. Elshalakany A.B., Osman T., Khattab A., Azzam B.S., Zaki M. Microstructure and Mechanical Properties of MWCNTs Reinforced A356 Aluminum Alloys Cast Nanocomposites Fabricated by Using a Combination of Rheocasting and Squeeze Casting Techniques. *Journal of Nanomaterials*. 2014;5:1–14.  
<http://dx.doi.org/10.1155/2014/386370>
33. Никитин В.И., Никитин К.В. Развитие и применение явления структурной наследственности в алюминиевых сплавах. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2014;7(14):424–429.
34. Амосов Е.А. О модифицировании сплавов алюминия. *Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты*. 2013;4:123–128. EDN: REBIOZ.
35. Никитин В.И., Никитин К.В. Проблема наследственности шихтовых материалов в технологиях легких сплавов: история, состояние, перспективы. *Технология легких сплавов*. 2020;2:21–35. EDN: TUSYKT.

## REFERENCES

1. Sun W., Zhu Y., Marceau R., Wang L., Zhang Q., Gao X., Hutchinson C. Precipitation strengthening of aluminum alloys by room-temperature cyclic plasticity. *Science*. 2019;363(6430):972–975.  
<https://colab.ws/articles/10.1126/science.aav7086>
2. Kostin I.V., Bezrukikh A.I., Belyaev S.V., Frolov V.F., Gubanov I.Yu., Lesiv E.M., Stepanenko N.A. Research of modification technology during casting of flat ingots of 5XXX series. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Khimiya*. 2017;10(1):90–98. (In Russ.).
3. Kalinina N.E., Dzhur E.A., Kalinin V.T., Nosova T.V., Kashenkova A.V. The influence of modification on the structure and mechanical properties of complex aluminum alloys. *Vestnik dvigatelestroeniya. Konstruktsionnye materialy*. 2016;1:118–120. (In Russ.).
4. Toshev M.T. Application of nitrides as modifiers of aluminum alloys. *Politekhnikeskii vestnik. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*. 2019;1(45):93–96. EDN: PWGTKR. (In Russ.).
5. Duyunova V.A., Trapeznikov A.V., Leonov A.A., Koreneva E.A. Modification of cast aluminum alloys (review). *Труды ВИАМ*. 2023; 4(122):14–26. EDN: PODXET. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2023-0-4-14-26>
6. Al'tman M.B., Stromskaya N.P. Improving the properties of standard cast aluminum alloys. Moscow: Metallurgiya. 1984:128. (In Russ.).
7. Nikitin V.I., Nikitin K.V. Genetic modification of aluminum casting and wrought alloys. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2016;5:10–14. EDN: WMNMXR. (In Russ.).
8. Gureeva M.A. Modification of aluminum alloy ingots of the Al-Mg-Si system with calcium. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2015; 9:3–7. EDN: UHLAVF. (In Russ.).
9. Shabel B. S. Friction and Wear of Aluminum-Silicon Alloys. *National Institute of Standards and Technology*. 2013;18:10.
10. Antonov M.M., Shamsutdinova M. G., Orelkina T.A. Modification of aluminum alloys with universal powder substances. *XVII International Scientific and Technical Ural School-Seminar of Metallurgists – Young Scientists. Ekaterinburg, December 5–9, 2016: collection of scientific papers. Part 2*. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta. 2016:292–295. (In Russ.).
11. Grebnev Yu.V., Zharkova V.F., Okopnyi O.S. Integrated process for modification and filtration refining of aluminum casting alloys. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnich-*

- eskogo universiteta*. 2012;9(96):161–164. EDN: PAXPJH. (In Russ.).
12. Skachkov V.M., Yatsenko S.P. Modification of aluminum alloys with rare metals is the basis for promising materials in construction and transport. *Nanotekhnologii v stroitel'stve. Nauchnyi internet-zhurnal*. 2016;8(3):60–69. EDN: VZZFDP. (In Russ.). <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2016-8-3-60-69>
  13. Filippova I.A., Belov V.D., Dibrov I.A. Modification of aluminum alloys with Al<sub>5</sub>TiB ligatures quenched from liquid state. *Liteishchik Rossii*. 2011;3:38–40. EDN: NTVNWV. (In Russ.).
  14. Krushenko G.G. Modification of aluminum deformable alloys with aluminum granules during casting of ingots. *Reshetnevskie chteniya*. 2009;1:331–332. EDN: VBEGGV. (In Russ.).
  15. Eskin G.I., Bochvar S.G. Modification of aluminum alloys by acoustic action. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2018;3:14–19. EDN: YLFMHR. (In Russ.).
  16. Savrai R.A., Malygina I.Yu., Makarov A.V., Osintseva A.L., Rogovaya S.A., Kolobylin Yu.M. The influence of laser alloying with Cu – Zn – Ti and Si – Cu powder mixtures on the structure and properties of cast aluminum alloy. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*. 2019; 21(4):70–84. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.4-70-84>. EDN: LWRSCQ. (In Russ.).
  17. Premkumar M., Chu M.G. Al-TiC particulate composite produced by a liquid state in situ process. *Materials Science and Engineering A*. 1995; 202(1–2):172–178. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)09787-2](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)09787-2)
  18. Liu X., Zhenqing W., Zuogui Z., Xiufang B. The relationship between microstructures and refining performances of Al-Ti-C master alloys. *Materials Science and Engineering A*. 2002; 332(1–2):70–74. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01751-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01751-8)
  19. Birol Y. Grain Refining Efficiently of Al-Ti-C Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2006; 422(1–2):128–131. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.11.059>
  20. Cai X., Dong B., Lin S., Liu D. Improvements of microstructure and mechanical properties of wire-arc direct energy deposition 2024 aluminum alloy after adding TiC nanoparticles. *Virtual and Physical Prototyping*. 2025;20(1):22. <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2024.2442489>
  21. Apakashev R. A., Valiev N.G., Krasikov S.A., Khazin M.L. Study of high-temperature interaction of silicon (IV) oxide with aluminum and its alloys. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2021;1:271–283. EDN: ONJYUM. (In Russ.).
  22. Bustos Ó., Leiva R., Allende R., Sanchez Ch. Effect of magnetic stirring, grain modification and refinement on the solidification structure of an A356 aluminum alloy. *Revista Materia*. 2021;26(1):1–16. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210001.1227>
  23. Moustafa E., Mosleh A. Effect of (Ti – B) modifier elements and FSP on 5052 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;823:153–745. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153745>
  24. Ding H., Liu X., Yu L., Zhao G. The influence of forming processes on the distribution and morphologies of TiC in Al – Ti – C master alloys. *Scripta Materialia*. 2007;57(7):575–578.
  25. Titova Yu.V., Maidan D.A., Timoshkin I.Yu. Study of the introduction of aluminum nitride nanopowder grade SVS-Az into the aluminum melt for the ex-situ preparation of Al – (1 – 10 %) AlN composites. *Современные материалы, техника и технологии*. 2017;6(14):138–144. EDN: ZXYAYX. (In Russ.).
  26. Panteleeva A.V., Nikonova R.M. Modification of aluminum with strengthening phases TiB<sub>2</sub> and TiC by the SHS method in the melt. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*. 2019; 21(1):65–69. EDN: WYLFWL. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.15350/17270529.2019.1.9>
  27. Sychev A.E., Merzhanov A.G. Self-propagating high-temperature synthesis of nanomaterials. *Uspekhi khimii*. 2004; 73(2):157–170. (In Russ.).
  28. Nikitin K.V., Nikitin V.I., Chernikov D.G. Hereditary influence of magnalia structure on their deformability during cold rolling. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2014;6:13–15. EDN: TKKCTT. (In Russ.).
  29. Bayoumy D., Wu X., Zhu Yu., Kan W., Huang A. The latest development of Sc-strengthened aluminum alloys by laser powder bed fusion. *Elsevier Ltd*. 2023;149:1–17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmst.2022.11.028>
  30. Xiao W., Xu C. Synergistic effects of Gd and Zr on grain refinement and eutectic Si modification of Al – Si cast alloy. *Materials Science & Engineering A*. 2017. 693:93–100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.097>
  31. Znamenskii L.G., Ivochkina O.V., Rechkalov I.V. Refining and modification of alloys with recycled nanostructured materials. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Metallurgiya»*. 2015;15(4):68–72. EDN: VAVXUT. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.14529/met150409>
  32. Elshalakany A.B., Osman T., Khattab A., Azzam B.S., Zaki M. Microstructure and Mechanical Properties of MWCNTs Reinforced A356 Aluminum Alloys Cast Nanocomposites Fabricated by Using a Combination of Rheocasting and Squeeze Casting Techniques. *Journal of Nanomaterials*. 2014;5:1–14. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/386370>
  33. Nikitin V.I., Nikitin K.V. Development and application of the phenomenon of structural heredi-

ty in aluminum alloys. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii*. 2014;7(14):424–429. (In Russ.).

34. Amosov E.A. On the modification of aluminum alloys. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: problemy i rezul'taty*. 2013; 4:123–128. EDN: REBIOZ. (In Russ.).
35. Nikitin V.I., Nikitin K.V. The problem of heredity of charge materials in light alloy technologies: history, status, prospects. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2020;2:21–35. EDN: TUSYKT. (In Russ.).

**Сведения об авторах:**

**Мария Хосе Нориега Флорес**, аспирант кафедры Обработка металлов давлением и материаловедения. *ЕВРАЗ ЗСМК*, Сибирский государственный индустриальный университет  
*E-mail*: cereso13@hotmail.es  
*ORCID*: 0009-0001-2475-1349

**Ирина Владимировна Строкина**, к.т.н., доцент кафедры обработки металлов давлением *ЕВРАЗ ЗСМК*, Сибирский государственный индустриальный университет  
*E-mail*: strokina\_iv@sibsiu.ru  
*ORCID*: 0000-0003-3719-8949  
*SPIN-код*: 3928-1409

**Арина Денисовна Трофимова**, лаборант УНИ, Сибирский государственный индустриальный университет  
*E-mail*: arinaatrva/053@mail.ru  
*ORCID*: 0009-0008-5441-2381

**Виталий Сергеевич Маринич**, лаборант УНИ, Сибирский государственный индустриальный университет  
*E-mail*: marinich\_vs@mail.ru  
*ORCID*: 0009-0000-5083-6226

**Сергей Валерьевич Коновалов**, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет  
*E-mail*: konovalov@sibsiu.ru

*ORCID*: 0000-0003-4809-8660  
*SPIN-код*: 4391-7210

**Information about the authors:**

**Mariya Khose Noriega Flores**, Postgraduate student of the D Department of Metal Forming, *EVRAZ ZSMK*, Siberian State Industrial University  
*E-mail*: cereso13@hotmail.es  
*ORCID*: 0009-0001-2475-1349

**Irina V. Strokina**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor Department of Metal Forming, *EVRAZ ZSMK*, Siberian State Industrial University  
*E-mail*: strokina\_iv@sibsiu.ru  
*ORCID*: 0000-0003-3719-8949  
*SPIN-код*: 3928-1409

**Arina D. Trofimova**, UNI Laboratory Assistant, Siberian State Industrial University  
*E-mail*: arinaatrva/053@mail.ru  
*ORCID*: 0009-0008-5441-2381

**Vitaly S. Marinich**, UNI Laboratory Assistant, Siberian State Industrial University  
*E-mail*: marinich\_vs@mail.ru  
*ORCID*: 0009-0000-5083-6226

**Sergei V. Konovalov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University  
*E-mail*: konovalov@sibsiu.ru  
*ORCID*: 0000-0003-4809-8660  
*SPIN-код*: 4391-7210

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

Поступила в редакцию 22.05.2025  
После доработки 04.06.2025  
Принята к публикации 08.06.2025

Received 22.05.2025  
Revised 04.06.2025  
Accepted 08.06.2025