

УДК 669.715 : 669.046.516.4 : 669.046.52

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-5-47-56>

Научная статья

Research article



Влияние различных титансодержащих добавок на эффективность модифицирования эвтектического сплава системы алюминий–кремний

А.Д. Шляпцева, И.А. Петров, А.П. Ряховский**Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)**
125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4

✉ Анастасия Дмитриевна Шляпцева (shlyaptsevad@mai.ru)

Аннотация: Изучено влияние титана, в зависимости от способа его ввода в расплав, на структуру и механические свойства эвтектического силумина АК12. Приведены результаты исследований как при одиночном введении титана (расчетное содержание Ti – 0,1 мас.%) различными способами (лигатурой Al–4%Ti, оксидом TiO₂, солью K₂TiF₆, Ti-губкой), так и при совместных добавках титана и стандартного флюса (62,5 % NaCl + 12,5 % KCl + 25 % NaF). Исследования осуществляли путем качественного и количественного анализа макро- и микроструктур сплавов, данных спектрального анализа и механических свойств (предела прочности на разрыв и относительного удлинения). Установлено, что титан оказывает влияние на структуру эвтектического силумина и наиболее эффективен при совместном введении со стандартным флюсом. При этом эффективность модифицирования силуминов титаном зависит от способа его ввода в расплав. Отмечено положительное влияние титана, введенного с помощью фтористой соли K₂TiF₆, лигатуры Al–4%Ti и титановой губки, на измельчение макрозерна, уменьшение расстояния между ветвями дендритов второго порядка твердого раствора (α-Al), а также на диспергирование эвтектического кремния. Наиболее перспективным способом комплексного модифицирования силуминов является совместное введение титансодержащих веществ и флюса на основе солей натрия. Такие составы оказывают комплексное влияние на структуру силумина, заключающееся в одновременном модифицировании различных структурных составляющих алюминиево-кремниевых сплавов. В зависимости от вида титансодержащего вещества при совместной обработке с флюсом относительное удлинение сплава достигает 9,7–11,1 %, что более чем в 4 раза превышает этот показатель для немодифицированного сплава и на 17–37 % выше, чем у сплава, модифицированного натрием. Предел прочности составляет 171–193 МПа, что на 22–38 % больше, чем у немодифицированного сплава, и на 7–21 % выше по сравнению со сплавом, модифицированным натрием.

Ключевые слова: литейные алюминиевые сплавы, титан, натрий, комплексное модифицирование, эвтектический кремний, твердый раствор, макро- и микроструктура, спектральный анализ.

Для цитирования: Шляпцева А.Д., Петров И.А., Ряховский А.П. Влияние различных титансодержащих добавок на эффективность модифицирования эвтектического сплава системы алюминий–кремний. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(5):47–56. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-5-47-56>

Influence of various titanium-containing additives on the modification efficiency of aluminum–silicon eutectic alloy

A.D. Shlyaptseva, I.A. Petrov, A.P. Ryakhovskiy**Moscow Aviation Institute (National Research University)**
4 Volokolamskoe Highway, Moscow, 125993, Russia

✉ Anastasiya D. Shlyaptseva (shlyaptsevad@mai.ru)

Abstract: This study investigates the impact of titanium addition to the eutectic silumin AK12 melt, considering various methods of addition. The research results encompass the sole introduction of titanium (at a calculated amount of 0.1 wt.%) through different forms/methods, such as the Al–4%Ti ligature, TiO₂ oxide, K₂TiF₆ salt, and Ti sponge. Additionally, the study explores the combined addition of titanium and a standard

flux (comprising 62.5 % NaCl + 12.5 % KCl + 25 % NaF). The research involved qualitative and quantitative analyses of macro- and microstructures, spectral analysis data, and mechanical properties (tensile strength and relative elongation) of the alloys. The findings highlight that titanium has a positive influence on the structure of eutectic silumin, with the most effective results achieved when combined with the standard flux. However, the efficiency of silumin modification with titanium varies depending on the method of addition. Specifically, the introduction of titanium in the form of K_2TiF_6 fluoride salt, Al–4%Ti ligature, and titanium sponge positively affected macro grain refinement, reduced the spacing between the secondary dendrite arms of the solid solution (α -Al), and enhanced the dispersion of eutectic silicon. The most promising approach for complex silumin modification involves the joint introduction of titanium-containing substances and a sodium salt-based flux. This combination has a multifaceted impact on the silumin structure, leading to the simultaneous modification of various structural components in aluminum–silicon alloys. Depending on the type of titanium-containing substance, when processed alongside flux, the alloy achieves a relative elongation ranging from 9.7 % to 11.1 %, exceeding the same parameter for the unmodified alloy by more than 4 times and surpassing the sodium-modified alloy's relative elongation by 17–37 %. Furthermore, the ultimate strength reaches levels of 171–193 MPa, representing a 22–38 % improvement compared to the unmodified alloy and a 7–21 % increase compared to the sodium-modified alloy.

Keywords: cast aluminum alloys, titanium, sodium, complex modification, eutectic silicon, solid solution, macro- and microstructure, spectral analysis.

For citation: Shlyaptseva A.D., Petrov I.A., Ryakhovskiy A.P. Influence of various titanium-containing additives on the modification efficiency of aluminum–silicon eutectic alloy. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(5):47–56. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-5-47-56>

Введение

Сплавы системы «алюминий—кремний» широко применяются при производстве фасонного литья в авиастроении, автомобилестроении и других отраслях промышленности. Высокие литейные свойства позволяют получать из этих сплавов сложные тонкостенные и герметичные отливки. Недостатком силуминов являются низкие механические свойства при литье в землю, что объясняется, в первую очередь, формированием грубой микроструктуры сплава. Известно, что литейные сплавы системы Al—Si используются для получения отливок литьем в землю только в модифицированном виде [1; 2].

Для модифицирования эвтектики в расплав доэвтектических и эвтектических силуминов вводят поверхностно-активные элементы — такие, как натрий, стронций и др. [1; 2]. Под воздействием этих модифицирующих добавок частицы эвтектического кремния при кристаллизации измельчаются и принимают глобулярную форму. В результате повышаются механические свойства сплава, особенно его относительное удлинение.

Для измельчения зерен твердого раствора на базе алюминия (α -Al) в расплав деформируемых и литейных алюминиевых сплавов, в том числе силуминов, вводят зародышеобразующие элементы — Ti, Zr, Sc и др. [1; 3; 4]. При этом эффективность измельчения зерна деформируемых сплавов отличается от таковой в доэвтектических силуминах. Так, известно, что повышенное содержание кремния в сплаве снижает степень измельчения зерна [5].

Среди наиболее эффективных модификаторов α -Al в сплавах на основе алюминия можно отметить титан. Модифицирование титаном получило

широкое распространение применительно к доэвтектическим сплавам с содержанием кремния менее 7 % [1]. При введении его в расплав в количестве 0,05–0,15 % образуются дополнительные центры кристаллизации $TiAl_3$, измельчаются зерна твердого раствора на базе алюминия (α -Al) и значительно повышаются литейные и механические свойства сплавов [1; 6].

Однако имеющиеся в научно-технической литературе данные по модифицирующему влиянию титана (до 0,2 мас.%) на доэвтектические (содержащие более 7 % Si) и эвтектические силумины весьма противоречивы. Считается, что модифицирование таких сплавов титаном не должно вызывать существенного измельчения структуры, так как титан модифицирует дендриты α -Al, а основной структурной составляющей, которая обуславливает комплекс механических свойств силуминов, является кремниевая эвтектика [7; 8].

Кроме этого, в работах [3, 9–11] показано, что значительное количество кремния (7–13 мас.%) снижает эффективность измельчения зерна литейных Al—Si-сплавов, модифицированных титаном. Объясняется это тем, что в расплаве образуются и растут интерметаллиды $TiAlSi$: $(Al, Si)_3Ti$, $(Al, Si)_2Ti$ и др. В результате уменьшается количество частиц $TiAl_3$, являющихся центрами кристаллизации.

Тем не менее отмечается [12–17] положительное влияние титана на структуру до- и эвтектических силуминов. Так, в работе [12] изучено влияние титана, введенного с помощью лигатуры Al—5Ti, на структуру и механические свойства сплава Al—10%Si. Показано, что добавление 0,5 мас.% Al—5Ti способствует измельчению дендритов (α -Al) и обеспечивает мак-

симальное увеличение доли твердого раствора по площади шлифа. Как следствие, повышаются предел прочности при растяжении и относительное удлинение сплава на 9 и 49 % соответственно по сравнению с немодифицированным сплавом.

В работах [13; 14] показано положительное влияние титана, введенного лигатурами Al—10%Ti, Al—5%Ti—1%B, в сочетании со стронцием на измельчение зерен (α -Al) сплава Al—7%Si—Mg. При комплексной обработке расплава титаном и стронцием увеличивается степень измельчения частиц эвтектического кремния по сравнению со сплавом с добавлением только Sr. Авторам [2] это объясняется тем, что кремниевая эвтектика приобретает модифицированный характер, так как, являясь ведомой фазой, кристаллизуется в ограниченном пространстве между осями дендритов, расстояние между которыми уменьшается под воздействием модификатора — титана.

Также титан хорошо сочетается с такими модификаторами эвтектического кремния, как натрий [17], стронций [13; 14; 18], барий [19; 20] и др. Поэтому титансодержащие добавки, например соль K_2TiF_6 , диоксид титана TiO_2 , входят в состав некоторых комплексных модифицирующих флюсов для силуминов, оказывающих влияние на различные структурные составляющие сплавов [19; 20].

Цель настоящего исследования — изучение влияния титана на структуру и свойства эвтектического силумина в зависимости от способа его ввода в расплав: лигатурой Al—4%Ti; титановой губкой; солью K_2TiF_6 ; диоксидом титана TiO_2 . Также исследовали влияние титансодержащих добавок при совместном введении со стандартным флюсом, модифицирующим эвтектику в силуминах состава, %: 62,5NaCl + 12,5KCl + 25NaF.

Материалы и методика эксперимента

В качестве модельного сплава был выбран силумин эвтектического состава АК12, химический состав которого, согласно данным спектрального анализа, следующий, мас. %:

Al	Основа	Ti.....	0,0031
Si.....	11,53	Zn	0,0092
Cu	0,0021	Mo	0,0026
Mg.....	0,0006	Fe.....	0,358
Mn	0,0026		

Для модифицирования силуминов использовали титансодержащие добавки: диоксид ти-

тана TiO_2 (ТУ 6-10-1356-73), лигатуру Al—4%Ti (ГОСТ 11739.20-99), соль K_2TiF_6 (ТУ 20.13.62-023-69886968-2017), титановую губку марки ТГ-90 (ГОСТ 17746-79), а также стандартный флюс состава 62,5 % NaCl (ГОСТ 4233-77) + 12,5 % KCl (ГОСТ 4568-95) + 25 % NaF (ГОСТ 4463-76) [21]. Количество вводимых Ti-добавок определялось из расчета содержания титана в веществе 0,1 мас.%. Титановую губку вводили с учетом 5 % угара, стандартный флюс — в количестве 1,5 % от массы плавки.

Фтористые и хлористые соли (NaF , KCl , $NaCl$, K_2TiF_6), а также порошок диоксида титана перед плавкой просушивались при $t = 150 \div 200$ °C в течение 2 ч для удаления влаги.

Экспериментальные плавки проводились в электрической печи сопротивления. Каждый эксперимент повторяли 3 раза.

Обработку расплава лигатурой Al—4%Ti и титановой губкой осуществляли при температурах 740 и 800 °C соответственно. После замешивания, растворения и выдержки выполняли дегазацию расплава аргоном.

Комплексную обработку лигатурой Al—4%Ti и стандартным флюсом, а также титановой губкой и стандартным флюсом производили последовательно. Сначала обрабатывали расплав лигатурой при $t = 740$ °C и губкой при $t = 800$ °C, после замешивания и выдержки вводили стандартный флюс при $t = 740$ °C.

При обработке расплава солью K_2TiF_6 , стандартным флюсом и диоксидом титана TiO_2 расплав предварительно дегазировали аргоном, а затем, при $t = 750$, 740 и 780 °C соответственно, засыпали добавки на поверхность расплава.

Комплексную обработку стандартным флюсом и солью K_2TiF_6 осуществляли последовательно. Сначала обрабатывали расплав стандартным флюсом при $t = 740$ °C, далее, после замешивания и выдержки, вводили соль K_2TiF_6 при $t = 750$ °C. Комплексную обработку диоксидом титана и стандартным флюсом производили совместно при $t = 780$ °C.

После обработки добавками расплав выстаивали 15 мин, с поверхности снимали шлак и выполняли заливку образцов для механических испытаний в песчано-глинистую форму при температуре 710 °C.

Определение механических свойств (предела прочности на разрыв и относительного удлинения) проводили с помощью испытательной системы «Instron 5982» (Instron, США).

Для оценки макро- и микроструктур образцов

сплава АК12 готовили шлифы по принятым методам. Макрошлифы травили 10 %-ным раствором хлористой меди и осветляли в концентрированной азотной кислоте.

Микроструктурные исследования проводили на универсальном исследовательском микроскопе «Olympus GX51» (Olympus Corp., Япония), оснащенном анализатором изображений «Image-Pro» (Media Cybernetics, США).

Дисперсность эвтектики оценивали по средней длине частиц кремния в эвтектических колониях ($\bar{l}_{Si}$). Средний размер зерна ($\bar{d}$) определяли методом случайных секущих как отношение длины секущей к числу пересечений секущей с границами зерна. Для анализа распределения дендритов твердого раствора по площади шлифа устанавливали расстояние между дендритными осями второго порядка SDAS ($\bar{\lambda}_2$) [22]. Для корректного анализа проводили не менее 50 измерений, а полученные значения усредняли. Статистический анализ результатов исследования $\bar{l}_{Si}$ и $\bar{\lambda}_2$ проведен с применением компьютерной программы «Statistica 10».

Изучение химического (элементного) состава опытных образцов осуществляли с использованием искрового оптико-эмиссионного спектрометра Q4 TASMANN-170 (Bruker Quantron GmbH, Германия).

Результаты и их обсуждение

Результаты исследований показали, что титан, введенный с помощью титансодержащих добавок, оказывает влияние на свойства и структуру сплава АК12 (рис. 1).

Повышение механических свойств сплава и измельчение его структурных составляющих наблюдаются при введении всех составов, за исключением одиночного введения диоксида титана, когда отсутствует переход титана в сплав (рис. 1, д).

При одиночном введении титановой губки, лигатуры и соли происходит повышение механических свойств по сравнению с исходным сплавом: относительное удлинение (δ) возрастает в 2,5, 2,2 и 3,1 раза соответственно, предел прочности (σ_B) увеличивается на 24, 19 и 25 % соответственно.

Согласно данным спектрального анализа (рис. 1, в), при обработке каждой титансодержащей добавкой из рассмотренных отмечается высокая степень усвоения расплавом модифицирующего элемента: выход титана из лигатуры — 100 %, из соли и губки — 80 %.

Повышение механических свойств сплава яв-

ляется следствием модифицирования структуры. Согласно данным качественного (рис. 2) и количественного (рис. 1, з—е) структурного анализа, модифицирование сплава АК12 титансодержащими добавками способствует, в первую очередь, уменьшению расстояния между дендритными осями второго порядка ($\bar{\lambda}_2$) твердого раствора на основе алюминия (α -Al) (рис. 1, д).

В результате модифицирования дендриты приобретают более компактную морфологию — по сравнению с исходным сплавом $\bar{\lambda}_2$ уменьшается в 1,5–2,0 раза (рис. 2, в2, з2, д2). Также титан способствует измельчению макрозерна (более чем в 5 раз) (рис. 1, з; рис. 2, в3, з3, д3).

Однако титан, введенный лигатурой, титановой губкой и солью K_2TiF_6 , оказывает влияние не только на дендриты твердого раствора (α -Al) и макрозерно, но и приводит к уменьшению среднего размера кремния в эвтектике (рис. 2, в1, з1, д1). По сравнению с исходным сплавом средний размер кремния сокращается в 1,5, 2,5 и 3,5 раза соответственно (рис. 1, е). Модифицирование титансодержащими веществами вызывает измельчение дендритов α -Al, уменьшение междендритных расстояний и разделение эвтектики на микрообъемы, расположенные в межосных пространствах. Эвтектика кристаллизуется в более ограниченном пространстве между ветвями дендритов, а измельчение кремния происходит в результате ограничения возможности его роста в таких микрообъемах. Эта гипотеза согласуется с работами [23; 24].

При этом соль K_2TiF_6 способствует большему измельчению эвтектики по сравнению с другими титансодержащими добавками. Предполагается, что причина этого заключается в дополнительном влиянии на эвтектику калия, содержащегося в соли и являющегося модификатором эвтектики поверхностно-активного действия [25]. Дополнительное влияние губки на измельчение эвтектического кремния, вероятно, связано с длительным временем выдержки сплава (>30 мин) при повышенной температуре (>780 °C) [26].

Для исследований комплексного влияния добавки титана его вводили совместно с флюсом на основе солей натрия и калия. Стандартный Na-содержащий флюс широко используется для модифицирования эвтектики в силуминах [1; 2]. Согласно адсорбционной теории модифицирования, натрий, являясь поверхностно-активным элементом, адсорбируется на поверхности растущих кристаллов кремния, что приводит к их замедленному

росту. В результате в переохлажденных условиях создается тонкая модифицированная структура сплава.

Относительное удлинение сплава АК12, модифицированного Na-содержащим флюсом, выше, чем при обработке всеми ранее исследуемыми

титаносодержащими добавками, и достигает значения 8,1 %, что в 3 раза больше, чем без модифицирования. Флюс оказывает модифицирующее влияние на эвтектический кремний (рис. 3, а1), однако не влияет на расстояние между дендритами 2-го порядка и диаметр макрозерна (рис. 3, а2, а3).

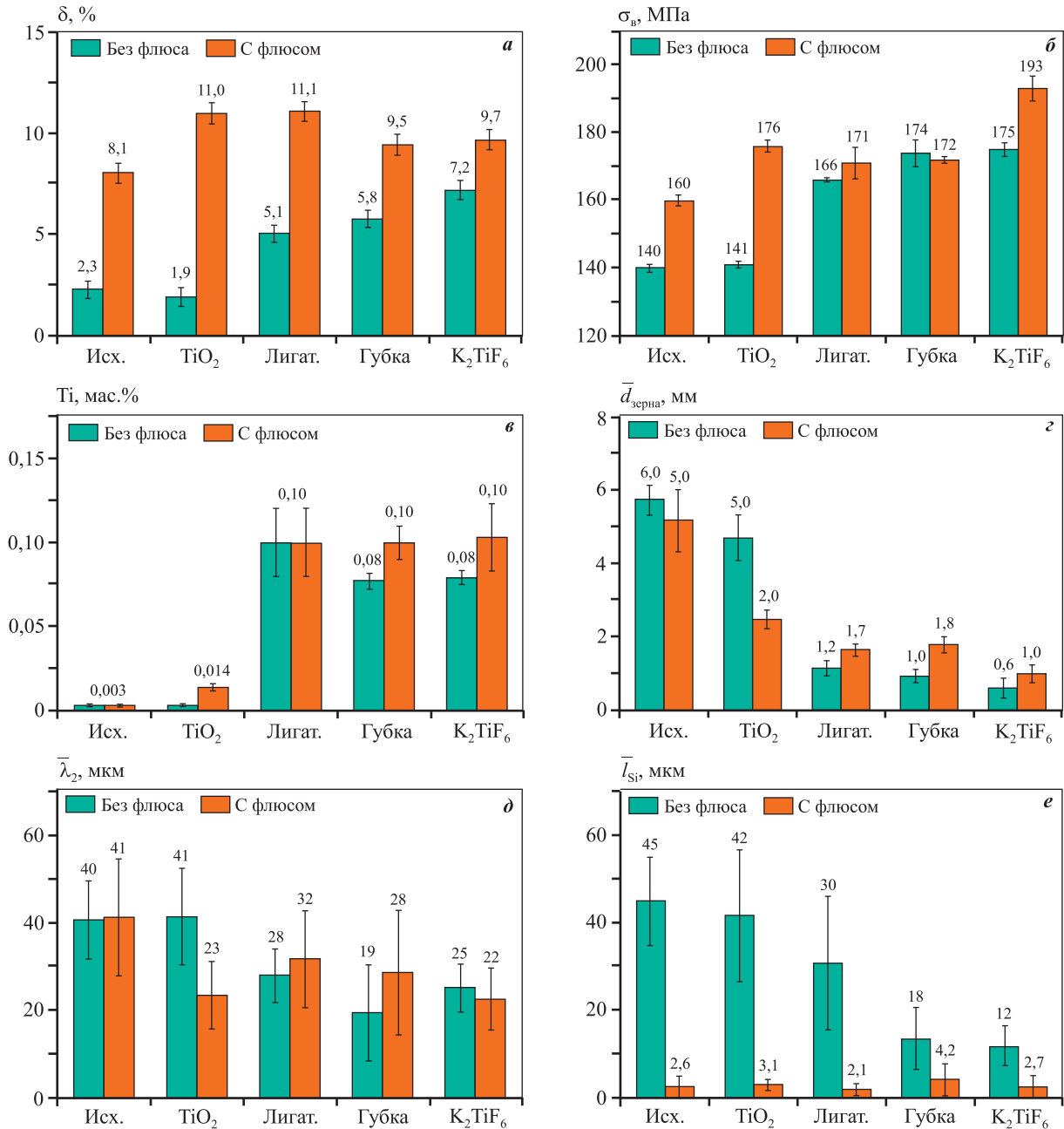


Рис. 1. Влияние способов ввода титана на механические свойства и параметры структуры сплава АК12

а – относительное удлинение; б – предел прочности на разрыв; в – содержание титана в сплаве, по данным спектрального анализа; г – средний диаметр макрозерна; д – среднее расстояние между дендритными осями второго порядка; е – средняя длина частиц эвтектического кремния

Fig. 1. The influence of different titanium introduction methods on the mechanical properties and structural parameters of the AK12 alloy

а – relative elongation; б – tensile strength; в – titanium content in the alloy according to spectral analysis data; г – average diameter of the macro grain; д – average secondary dendrite arm spacing; е – average length of eutectic silicon particles

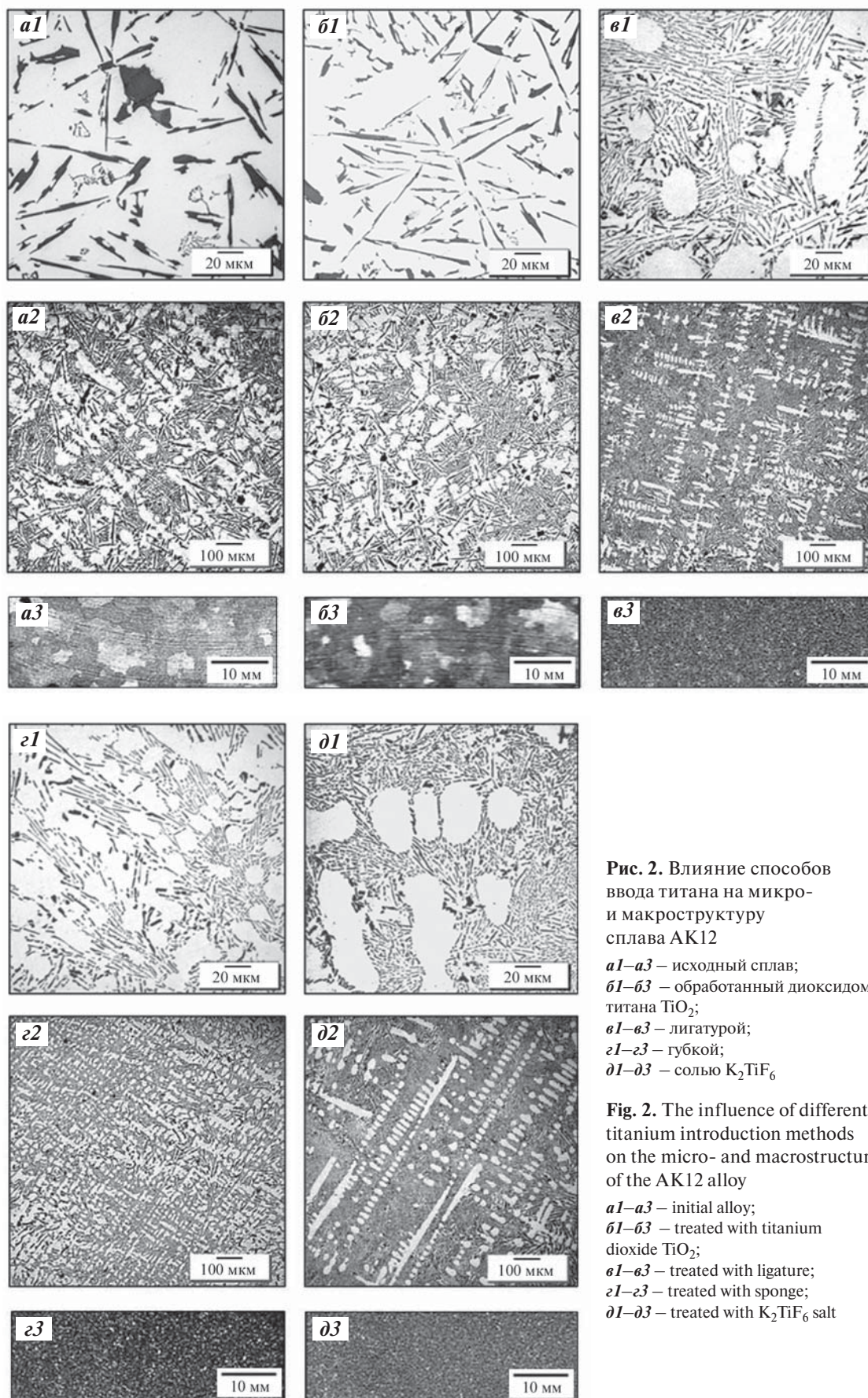


Рис. 2. Влияние способов ввода титана на микро- и макроструктуру сплава АК12

a1–a3 – исходный сплав;
б1–б3 – обработанный диоксидом титана TiO_2 ;
в1–в3 – лигатурой;
з1–з3 – губкой;
д1–д3 – солью K_2TiF_6

Fig. 2. The influence of different titanium introduction methods on the micro- and macrostructure of the AK12 alloy

a1–a3 – initial alloy;
б1–б3 – treated with titanium dioxide TiO_2 ;
в1–в3 – treated with ligature;
з1–з3 – treated with sponge;
д1–д3 – treated with K_2TiF_6 salt

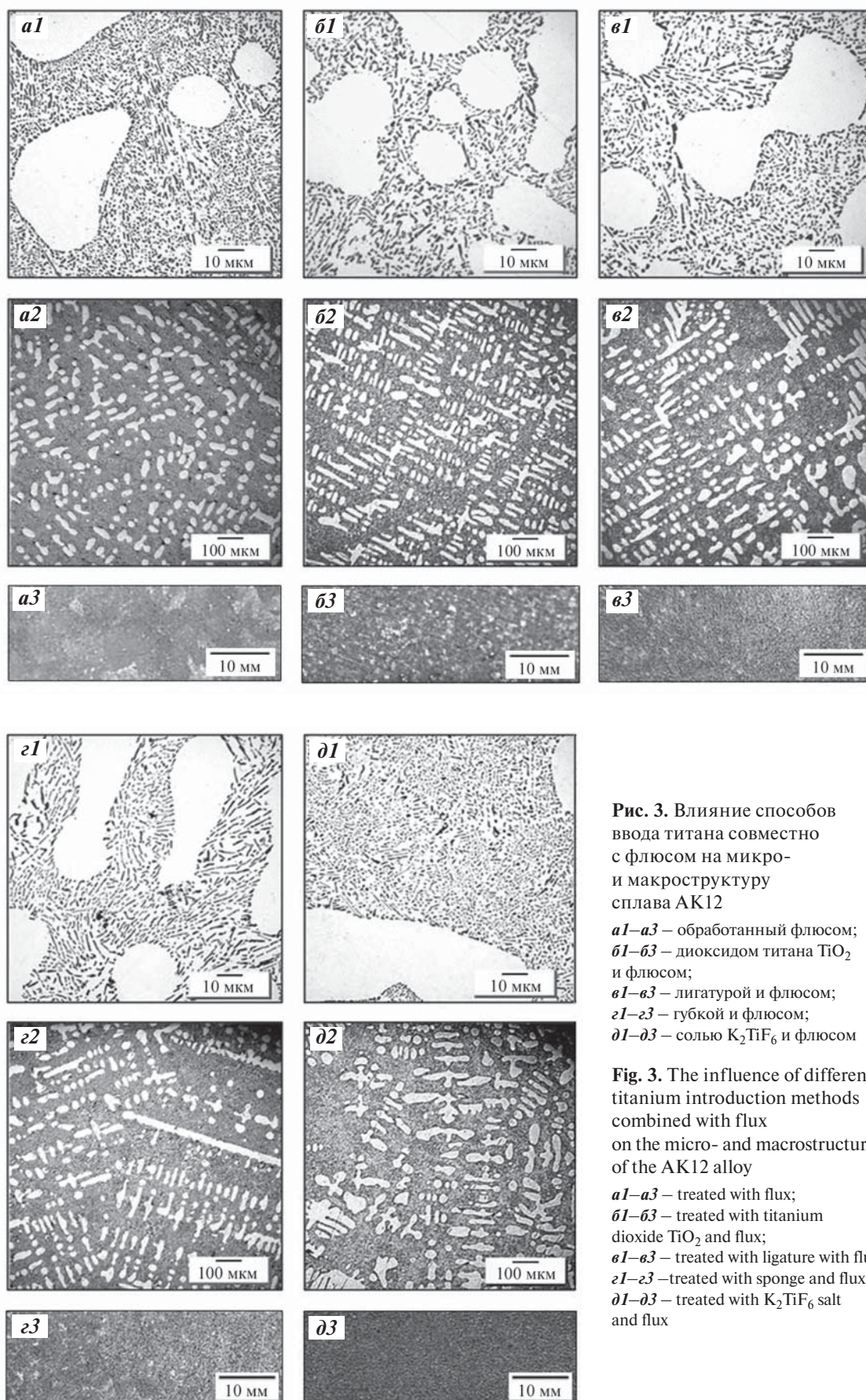


Рис. 3. Влияние способов ввода титана совместно с флюсом на микро- и макроструктуру сплава АК12

a1–a3 – обработанный флюсом;
б1–б3 – диоксидом титана TiO₂ и флюсом;
в1–в3 – лигатурой и флюсом;
г1–г3 – губкой и флюсом;
д1–д3 – солью K₂TiF₆ и флюсом

Fig. 3. The influence of different titanium introduction methods combined with flux on the micro- and macrostructure of the AK12 alloy

a1–a3 – treated with flux;
б1–б3 – treated with titanium dioxide TiO₂ and flux;
в1–в3 – treated with ligature with flux;
г1–г3 – treated with sponge and flux;
д1–д3 – treated with K₂TiF₆ salt and flux

Совместное введение флюса и титансодержащих добавок (диоксида титана TiO_2 , лигатуры и соли K_2TiF_6) способствует еще большему повышению уровня свойств. По сравнению с обработкой натрийсодержащим флюсом показатель δ оказался выше на 36, 37 и 20 %, σ_B — на 10, 7 и 21 % соответственно. Титановая губка совместно с флюсом также обуславливает повышение свойств, однако в меньшей степени (δ выше на 17 %, σ_B — на 7,5 %).

Более высокие механические свойства сплава связаны с измельчением структуры, особенно дендритов твердого раствора ($\alpha\text{-Al}$) (рис. 3, б2, в2, г2, д2), и макроструктуры (рис. 3, б3, в3, г3, д3). Так, добавление титансодержащих добавок к флюсу практически не влияет на степень измельчения эвтектического кремния (рис. 3, б1, в1, г1, д1). При модифицировании натрием и титаном, так же как и при модифицировании только натрием, кремний в эвтектике глобулярный, сильно измельченный (по сравнению с исходным сплавом средняя длина частиц кремния уменьшается в 10–20 раз). Добавление Ti-содержащих добавок к натриевому флюсу приводит к сокращению расстояния между дендритными осями в 1,3–1,9 раза (рис. 1, д), диаметра макрозерна — в 2–4 раза (рис. 1, г), и, как следствие, наблюдается повышение свойств сплава.

Стандартный флюс способствует повышению выхода титана из диоксида титана (с 0 до 14 %) в расплаве. Такое влияние объясняется тем, что фторидно-хлоридный флюс понижает межфазное натяжение, улучшает смачивание твердых оксидных частиц расплавом [27; 28]. Кроме того, диоксид титана растворяется во фтористых солях. Это приводит к алюминотермическому восстановлению диоксида титана до титана в расплаве силумина, и в результате повышается усвояемость титана расплавом [17].

Несомненным положительным эффектом модифицирования силуминов титаном является длительность сохранения модифицирующего воздействия. Согласно ранее проведенным исследованиям, титан, введенный с помощью K_2TiF_6 [20] и TiO_2 [19], при его содержании в сплаве, равном 0,05–0,15 % в зависимости от состава комплексных флюсов, оказывает модифицирующий эффект в течение 5 ч и после нескольких переплавов.

Выводы

1. Показан положительный эффект применения титана для модифицирования эвтектического силумина. Титан в количестве 0,05–0,1 мас.% ока-

зывает положительное влияние на структуру и механические свойства сплава АК12. Однако уровень свойств и степень модифицирования структуры зависят от способа ввода титана. При его введении без флюса наиболее эффективным является способ ввода с помощью соли K_2TiF_6 .

2. Отмечено положительное влияние титана, введенного с помощью соли K_2TiF_6 , лигатуры $\text{Al-4\%Ti}$ и Ti-губки, на измельчение макрозерна, уменьшение расстояния между дендритными осями второго порядка α -твердого раствора, а также на диспергирование эвтектического кремния сплава АК12.

3. Наиболее эффективным способом ввода титана в расплав силумина является совместное введение титансодержащих веществ и флюса на основе солей натрия из расчета 0,1 % Ti и 1,5 % флюса от массы плавки. Такие составы оказывают комплексное влияние на структуру силумина, заключающееся в одновременном измельчении макрозерна, уменьшении расстояния между дендритными осями второго порядка твердого раствора ($\alpha\text{-Al}$) за счет титана, измельчении и облагораживании кремния в эвтектике с помощью натрия. В результате относительное удлинение модифицированного сплава АК12 при литье в песчано-глинистую форму достигает 9,5–11,1 %, предел прочности — 171–193 МПа.

Список литературы/References

1. Напалков В.И., Махов С.В., Поздняков А.В. Модифицирование алюминиевых сплавов. М.: МИСиС, 2017. 348 с.
2. Никитин К.В. Модифицирование и комплексная обработка силуминов. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. 92 с.
3. Easton M.A., Qian M., Prasad A., StJohn D.H. Recent advances in grain refinement of light metals and alloys. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2016;20(1):13–24.
<https://doi.org/10.1016/j.cossms.2015.10.001>
4. Feng Gao, Zhongyun Fan. Solute effect on grain refinement of Al- and Mg-alloys: An overview of the recent advances made by the LiME research hub. *Metals*. 2022;12(9):1488.
<https://doi.org/10.3390/met12091488>
5. Joachim Gröbner, Djordje Mirković, Rainer Schmid-Fetzer. Thermodynamic aspects of grain refinement of Al–Si alloys using Ti and B. *Materials Science and Engineering: A*. 2005;395(1):10–21.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.11.048>

6. Ahmad Mostafa. Mechanical properties and wear behavior of aluminum grain refined by Ti and Ti + B. *International Journal of Surface Engineering and Interdisciplinary Materials Science*. 2019;7(1):1–19.
<https://doi.org/10.4018/IJSEIMS.2019010101>
7. Белов Н.А., Алабин А.Н., Карачарова Е.Г., Емелина Н.Б. О целесообразности легирования силуминов добавками титана и циркония. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2010;(4):46–52.
Belov N.A., Alabin A.N., Karacharova E.G., Emelina N.B. Appropriateness of doping silumins with titanium and zirconium additives. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2010;51(4):308–315.
<https://doi.org/10.3103/S1067821210040097>
8. Белов Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. М.: МИСиС, 2010. 511 с.
9. Muzaffer Zeren, Erdem Karakulak. Influence of Ti addition on the microstructure and hardness properties of near-eutectic Al–Si alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008;450(1–2):255–259.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.10.131>
10. Himmeler David, Randelzhofer Peter, Körner Carolin. Formation kinetics and phase stability of in-situ Al₃Ti particles in aluminium casting alloys with varying Si content. *Results in Materials*. 2020;7:100103.
<https://doi.org/10.1016/j.rinma.2020.100103>
11. Shant Prakash Gupta. Intermetallic compounds in diffusion couples of Ti with an Al–Si eutectic alloy. *Materials Characterization*. 2002;49(4):321–330.
[https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(02\)00342-X](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(02)00342-X)
12. Liu Ya-ling, Wu Chang-jun, Tu Hao, Lu Xiao-wang, Wang Jian-hua, Su Xu-ping. Microstructure and mechanical properties of Al–10Si alloy modified with Al–5Ti. *China Foundry*. 2018;15:405–410.
<https://doi.org/10.1007/s41230-018-8034-1>
13. Golbahar B., Samuel A.M., Doty H.W., Valtierra S., Samuel F.H. Effect of grain refiner on the tensile and impact properties of Al–Si–Mg cast alloys. *Materials & Design (1980–2015)*. 2014;56:468–479.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.058>
14. Lee Ji-Young, Lee Jung-Moo, Son Kwang-Suk, Jang Jae-il, Cho Young-Hee. A study on the interaction between a Sr modifier and an Al–5Ti–1B grain refiner in an Al–7Si–0.35Mg casting alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023;938:168598.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168598>
15. Wu Yuna, Zhang Jianfeng, Liao Hengcheng, Li Gaiye, Wu Yuping. Development of high performance near eutectic Al–Si–Mg alloy profile by micro alloying with Ti. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016;660:141–147.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.11.083>
16. Никитин К.В., Тимошкин И.Ю., Никитин В.И. Влияние способов получения лигатуры AlTi на ее структуру и эффективность при модифицировании алюминиевых сплавов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2018;(4):45–52.
Nikitin K.V., Timoshkin I.Yu., Nikitin V.I. Influence of methods of producing the AlTi master alloy on its structure and efficiency in the grain refinement of aluminum alloy. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2018;59(5):512–519.
<https://doi.org/10.3103/S1067821218050115>
17. Shlyaptseva A.D., Petrov I.A., Ryakhovskii A.P. Prospects of using titanium dioxide as a component of modifying composition for aluminum casting alloys. *Materials Science Forum*. 2019;946:636–643.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.636>
18. Mallapur D.G., Kori S.A., Udupa K.R. Influence of Ti, B and Sr on the microstructure and mechanical properties of A356 alloy. *Journal of Materials Science*. 2011;46:1622–1627.
<https://doi.org/10.1007/s10853-010-4977-3>
19. Shlyaptseva A.D., Petrov I.A., Ryakhovsky A.P., Medvedeva E.V., Tcherdyntsev V.V. Complex structure modification and improvement of properties of aluminium casting alloys with various silicon content. *Metals*. 2021;11(12):1946. <https://doi.org/10.3390/met11121946>
20. Петров И.А., Ряховский А.П., Моисеев В.С., Бобрышев Б.Л., Шляпцева А.Д. Перспективы использования углеродсодержащего материала для обработки силуминов. *Литейщик России*. 2016;(1):28–32.
Petrov I.A., Ryakhovskii A. P., Moiseev V.S., Bobryshev B.L., Shlyaptseva A.D. Perspectives for use of carbon-containing materials for treatment of silumins. *Liteishchik Rossii*. 2016;(1):28–32. (In Russ.).
21. Галдин Н.М., Чернега Д.Ф., Иванчук Д.Ф. Цветное литье: Справочник. М.: Машиностроение, 1989. 528 с.
22. Henk G. Merkus. Particle size measurements: Fundamentals, practice, quality. Springer Science+Business Media, 2009. 534 p.
23. Боом Е.А. Природа модифицирования сплавов типа силумин. М.: Металлургия, 1972. 69 с.
24. Mondolfo L.F. Aluminium alloys, structure and properties, London; Boston: Butterworths, 1976. 971 p.
25. Ashtari P., Tezuka H., Sato T. Modification of Fe-containing intermetallic compounds by K addition to Fe-rich AA319 aluminum alloys. *Scripta Materialia*. 2005;53(8):937–942.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.06.022>
26. Деев В.Б., Феоктистов А.В., Селянин И.Ф., Швидков Н.И., Зайнутдинов Х.Ф. Влияние режимов высокотемпературной обработки расплавов на фор-

мирование структуры и свойства силуминов. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2003;(10): 28–31.

Deev V.B., Feoktistov A.V., Selyanin I.F., Shvidkov N.I., Zainutdinov K.F. Influence of high-temperature treatment of melt on silumin structure and properties. *Steel in Translation*. 2003;33(10):20–24.

27. Напалков В.И., Махов С.В. Легирование и модифицирование алюминия и магния. М.: МИСиС, 2002. 376 с.

28. Zhang G., Lu W., Wu X., Yang B., Tan Y., Xu Z., Tang H., Zeng J., Wang J. A new strategy on designing fluxes for aluminum alloy melt refinement. *Materials*. 2023;16(6):2322. <https://doi.org/10.3390/ma16062322>

Информация об авторах

Анастасия Дмитриевна Шляпцева — к.т.н., ст. преподаватель кафедры 1101 Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ).

<https://orcid.org/0000-0001-9081-9930>

E-mail: shlyaptsevad@mai.ru

Игорь Алексеевич Петров — к.т.н., доцент кафедры 1101 МАИ.

<https://orcid.org/0000-0001-6393-1900>

E-mail: petrovia2@mai.ru

Александр Павлович Ряховский — к.т.н., доцент кафедры 1101 МАИ.

<https://orcid.org/0009-0005-5444-7558>

E-mail: fpk-mati@mail.ru

Information about the authors

Anastasiya D. Shlyaptseva — Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department 1101, Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI).

<https://orcid.org/0000-0001-9081-9930>

E-mail: shlyaptsevad@mai.ru

Igor' A. Petrov — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department 1101 of MAI.

<https://orcid.org/0000-0001-6393-1900>

E-mail: petrovia2@mai.ru

Aleksandr P. Ryakhovsky — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department 1101 of MAI.

<https://orcid.org/0009-0005-5444-7558>

E-mail: fpk-mati@mail.ru

Вклад авторов

А.Д. Шляпцева — определение цели работы, проведение испытаний, обработка и анализ результатов исследований, написание и подготовка статьи.

И.А. Петров — проведение экспериментальных плавов и испытаний, обработка и анализ результатов исследований, написание и подготовка статьи.

А.П. Ряховский — обработка и анализ результатов исследований, написание и подготовка статьи.

Contribution of the authors

A.D. Shlyaptseva — defined the research objectives, conducted testing, processed and analyzed the study results, and contributed to writing and preparing the article.

I.A. Petrov — conducted experimental melting and testing, processed and analyzed research results, and contributed to writing and preparing the article.

A.P. Ryakhovsky — processed and analyzed research results and contributed to writing and preparing the article.

Статья поступила в редакцию 27.04.2023, доработана 06.07.2023, подписана в печать 11.07.2023

The article was submitted 03.04.2023, revised 19.06.2023, accepted for publication 23.06.2023