

УДК 544.653.3

МОДИФИЦИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЛИГАТУРЫ Al–Zr

© 2021 г. А. А. Филатов^{a, b, *}, А. В. Суздальцев^{a, b}, Ю. П. Зайков^{a, b}^aУральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия^bИнститут высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: fill.romantic@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.01.2021 г.

После доработки 25.01.2021 г.

Принята к публикации 02.02.2021 г.

В настоящей работе исследована возможность применения электролитически полученной лигатуры для измельчения зерна и улучшения свойств сплавов алюминия. Испытания проводили на примере промышленного сплава Al–Si–Fe, в который добавляли разное количество лигатуры Al–Zr с содержанием 10 мас. % циркония при температуре 900°C. Изучено влияние содержания циркония в алюминиевом сплаве и скорости охлаждения на его структуру и свойства. На основании результатов структурного анализа установлено, что добавка циркония в количестве 0.1 мас. % уменьшает средний размер зерна сплава в 4–5 раз, без изменения формы и структуры. Измерение твердости полученных сплавов показывает, что при добавлении циркония в высокочистый алюминий, твердость увеличивается в 1.5 раза при содержании циркония 0.4 мас. % и увеличивается с ростом содержания циркония. В то же время, добавление циркония в сплав АК6 не влияет на твердость по Бринеллю, что предположительно связано с более выраженным действием других легирующих элементов. Отсутствие интерметаллидных соединений в полученных образцах сплава, модифицированного лигатурой Al–Zr, содержащей интерметаллидные включения размером до 50 мкм, указывает на то, что исходную лигатуру Al–Zr можно разливать в слитки и охлаждать при любых условиях, исключая при этом операцию переплавки в миксере и прочие виды обработки.

Ключевые слова: алюминий, цирконий, лигатура, электроосаждение, оксидно-фторидный расплав

DOI: 10.31857/S0235010621030051

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существенно возрастает спрос на алюминиевые лигатуры, как наиболее подходящее сырье для производства многокомпонентных сплавов и композитов на основе алюминия [1, 2]. Наиболее востребованными в аэрокосмической отрасли и электротехнике являются алюминиевые сплавы с добавками циркония, поскольку его содержание в алюминии в пределах 0.2 мас. % существенно измельчает зерно [3], повышает прочность и термоустойчивость свойств при нагреве до 300°C [4]. Существующие технологии получения алюмо-циркониевых лигатур (лигатур Al–Zr) основаны на механическом смешении алюминия с цирконием или алюминотермическом восстановлении его соединений [5–7]. Производство лигатур обоими способами осложнено многостадийностью, высокой температурой процесса и расходом чистых исходных компонентов, а также отсутствием возможности контроля структуры и свойств целевого продукта.

Наиболее перспективным способом получения лигатур Al–Zr представляется совместное электролитическое разложение оксидов алюминия и циркония, растворенных в криолит-глиноземном расплаве. Данный способ позволяет организовать непрерывное производство лигатур в одну стадию, с использованием более дешевого исходного сырья, на базе действующих крупнотоннажных электролизеров, без существенных технологических изменений и соответствующих экономических издержек. Однако, несмотря на все попытки опытно-промышленных реализаций, способ не был внедрен в связи с высокой агрессивностью расплава при относительно высокой рабочей температуре – 960–1000°C. Устранить данный недостаток можно путем использования фторидного расплава с пониженной температурой плавления при сохранении высокой растворимости используемых оксидов [8]. Таким образом, для повышения технико-экономических показателей производства важными являются данные о растворимости и кинетике электровосстановления используемых оксидов, а также о влиянии параметров синтеза на структуру и свойства производимых сплавов.

Ранее нами был разработан метод получения лигатуры Al–Zr с содержанием циркония до 15 мас. % при извлечении циркония из оксида вплоть до 100% [4]. Интерес представляет дальнейшее практическое применение получаемых данным способом лигатур.

В данной работе по ранее отработанной методике была синтезирована партия лигатуры Al–Zr с содержанием циркония до 15 мас. %, и изучена модифицирующая способность лигатуры на примере алюминиевого сплава.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Приготовление расплавов

Для получения лигатур использовали расплав KF–NaF–AlF₃; исходные компоненты расплавов (соли KF·HF, NaF, AlF₃ и NH₄F квалификации х. ч., производство ОАО “Вектон”) были максимально очищены от примесных элементов и влаги по ранее описанной методике [9]. Чистый KF получали путем термического разложения KF·HF нагреванием соли в течение 12 ч до температуры 900°C, что позволило попутно удалить оксидные примеси взаимодействием с образующимся HF. Удаление оксидных примесей из AlF₃ производили путем его выдержки в смеси с избыточным количеством NH₄F в течение 6–8 ч при 450–500°C. Смесь NaF–AlF₃ и KF–AlF₃ получали простым сплавлением компонентов в присутствии NH₄F для более полной очистки. Для этого получали эквимольные смеси KF–AlF₃ и NaF–AlF₃, которые затем корректировали до расплава с заданным мольным соотношением $CR = ([NaF] + [KF])/[AlF_3]$ добавками KF и NaF.

Для удаления электроположительных (по отношению к алюминию) примесей расплавы подвергали потенциостатическому электролизу в течение 2-х часов при потенциале графитового катода 0.2 В относительно потенциала алюминиевого электрода [10].

Синтез лигатур

Исходную лигатуру Al–Zr получали электролизом расплава KF–NaF–AlF₃ с периодической подгрузкой ZrO₂ при температуре 800°C в электролизерах на силу тока от 10 до 100 А [11]. Подгрузку ZrO₂ осуществляли в соответствии с растворимостью оксида в исследуемом расплаве [12]. Синтез лигатуры проводили в графитовом контейнере на воздухе при постоянном перемешивании алюминия со скоростью 100 об./мин [13]. Перемешивание алюминия осуществляли при помощи графитовой мешалки, которая дополнительно являлась токоподводом к алюминиевому катоду, расположенному на дне контейнера. Анодом служил графитовый цилиндр. Катодную плотность тока в

процессе электролиза поддерживали равной 0.5 A/cm^2 на основании результатов поляризационных измерений в используемом расплаве [14, 15]. Электролиз периодически приостанавливали для извлечения лигатуры Al–Zr из электролизера. Часть (примерно половину) лигатуры извлекали металлическим тиглем и сливали в стальную изложницу. Параллельно в электролит загружали аналогичную массу чистого алюминия и продолжали электролиз.

Модификация сплава АК6

Модификацию сплава лигатурой осуществляли в высокотемпературной камерной электропечи ПВК-1.4 25 по известным методикам [16, 17]. Слиток сплава АК6 загружали в печь в графитовом тигле. Печь нагревали до 900°C , после чего убирали шлак с поверхности сплава, и добавляли расчетное количество лигатуры Al–Zr. Тигель со сплавом выдерживали в печи 10 минут при температуре 900°C , после чего сплав перемешивали графитовой мешалкой, извлекали тигель из печи, и выливали сплав в графитовую изложницу.

Анализ результатов

Для определения структуры полученных лигатур и сплавов изготавливали шлифы при помощи режущего и шлифовального оборудования (Struers, Дания). Для изучения микроструктуры и оценки размера зерна, полученные образцы были протравлены в 10% водном растворе плавиковой кислоты, с продолжительностью травления от 10 с до 1 мин, при необходимости проводили осветление поверхности шлифа в концентрированной азотной кислоте. Структурные исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе Quanta-200 с приставкой EDAX и оптическом микроскопе Neophot-21. Объемную долю фаз и размер структурных составляющих определяли по стандартным методикам количественного анализа с помощью компьютерных программ в металловедческом комплексе Siams-700. Макроструктуру изучали на бинокулярном микроскопе Микромед MC2 Zoom 2CR. Твердость образцов определяли по Бринеллю в соответствии с ГОСТ 9012-59 на твердомере ТШ-2м при нагрузке 2500 Н с диаметром шарика 5 мм. Элементный и фазовый состав полученных лигатур и сплавов определяли атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой, а также рентгенофазовым анализом с использованием спектрометра iCAP 6300 Duo (Thermo scientific, США) и дифрактометра Rigaku D/MAX-2200VL/PC (Rigaku, Япония).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Всего в процессе электролизных испытаний было получено более 50 образцов высоколегированных сплавов с содержанием циркония до 15 мас. %, а также проведена серия экспериментов на укрупненном полупромышленном электролизере при варьировании параметров синтеза. Чтобы исключить влияние прочих примесных элементов, для данного эксперимента была изготовлена лигатура Al–Zr с использованием высокочистого алюминия марки АВЧ в качестве основы. Согласно результатам химического анализа, полученная лигатура содержит 10 мас % Zr. Типичная микрофотография полученной лигатуры с содержанием циркония 10 мас. % представлена на рис. 1.

Основная часть циркония в полученных лигатурах представлена фазами интерметаллидных соединений переменного состава, что согласуется с диаграммой плавокости [18]. В связи с наличием фаз интерметаллидных соединений, размер которых достигает 50 мкм, и неоднородным распределением циркония в объеме сплава, возникает во-

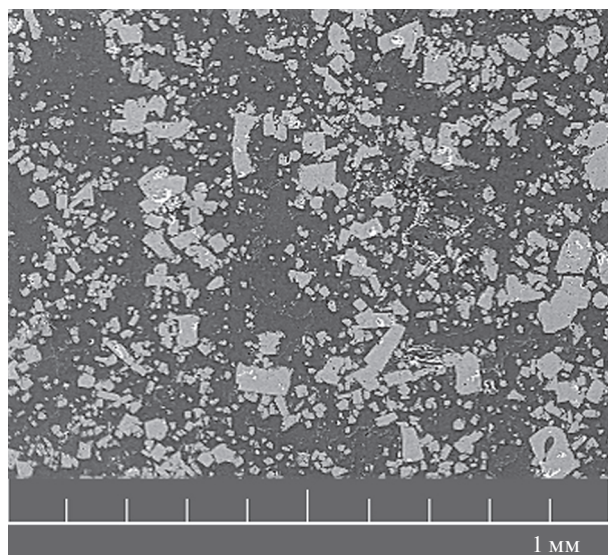


Рис. 1. Микрофотография лигатуры Al–Zr.

прос о модифицирующей способности полученных лигатур для модификации промышленных сплавов на основе алюминия.

Для более детального изучения модифицирующей способности лигатуры, а также поведения интерметаллидных соединений в процессе модификации, была проведена серия экспериментов по модифицированию алюминиевого сплава АК6. Химический состав исходного сплава АК6 представлен в табл. 1.

При изучении макроструктуры полученных сплавов было установлено, что добавка циркония уже в количестве 0,1 мас. % существенно измельчает зерно (рис. 2), что согласуется с известными представлениями о влиянии циркония на макроструктуру алюминиевых сплавов [16–20]. Более детальный расчет среднего размера зерна при помощи программы Siams-700 показывает среднее уменьшение размера зерна в 4–5 раз, дальнейшее увеличение содержания циркония уже не оказывает влияния на средний размер зерен.

При изучении микроструктуры и расчете среднего размера зерна в программе Siams-700 было установлено, что добавка циркония снижает средний размер зерен, но не влияет на микроструктуру сплава (рис. 3). Отмечено также отсутствие фаз интерметаллидных соединений в полученном сплаве. Дополнительно было установлено, что добавка циркония в чистый алюминий повышает его твердость по Бринелю на 15–20 ед., но не влияет на твердость при наличии других легирующих элементов.

Отсутствие фаз интерметаллидных соединений циркония в модифицированных образцах сплава АК6, полученных при разной скорости кристаллизации, указывает на то, что электролитически получаемая лигатура Al–Zr не требует дополнительной тер-

Таблица 1. Состав исследуемого сплава АК6

Fe	Si	Mn	Ni	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Остальное
0.7	0.7–1.2	0.4–0.8	0.1	0.1	93.3–96.7	1.8–2.6	0.4–0.8	0.3	Всего 0.1

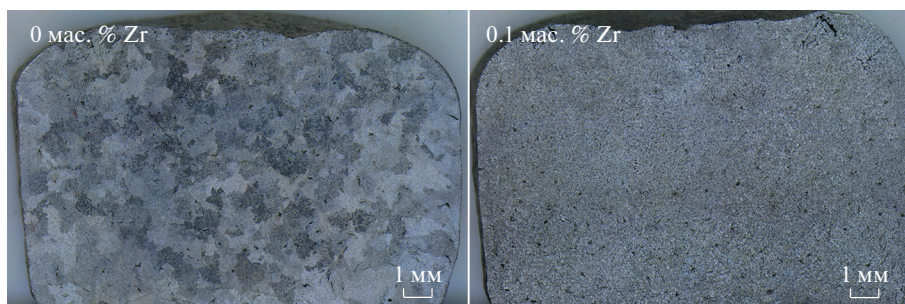


Рис. 2. Сравнение макроструктуры сплава АК6 без добавки циркония и с содержанием циркония 0.1 мас. %.

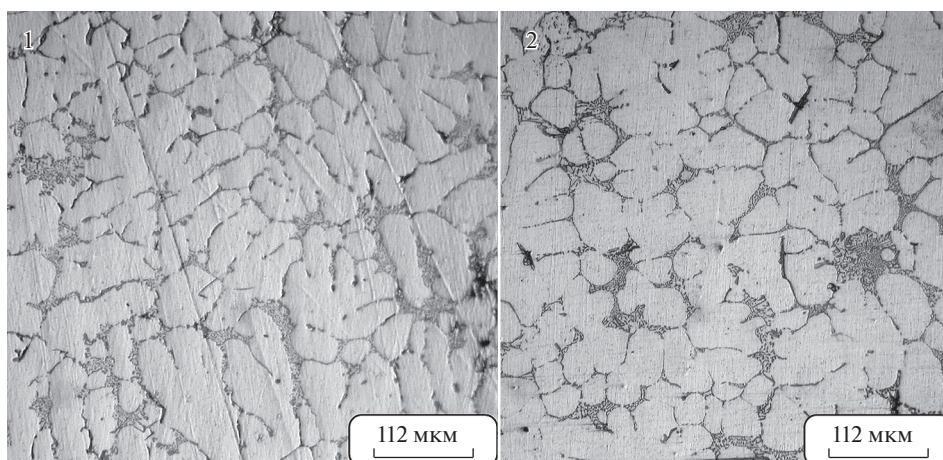


Рис. 3. Микрофотографии сплава АК6: слева – 0; справа – 0.1 мас. % Zr.

мической или ультразвуковой обработки с целью уменьшения размеров фаз интерметаллидных соединений.

ВЫВОДЫ

В данной работе была изучена модифицирующая способность лигатуры Al–Zr с содержанием 10 мас. % циркония, полученной электролизом расплава KF–NaF–AlF_3 на электролизере с токовой нагрузкой до 100 А. Проверку модифицирующей способности лигатуры выполняли на примере легирования и модифицирования сплава АК6 добавками циркония 0.1, 0.3, и 0.5 мас. %.

На основании результатов микроструктурного анализа установлено, что добавка циркония в количестве 0.1 мас. % уменьшает средний размер зерна сплава в 4–5 раз. Измерение твердости полученных сплавов показывает, что при добавлении циркония в высокочистый алюминий, твердость увеличивается в 1.5 раза при содержании циркония 0.4 мас. % и увеличивается с ростом содержания циркония. В то же время, добавление циркония в сплав АК6 не влияет на твердость по Бринеллю, что предположительно связано с более выраженным действием других легирующих элементов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-90144.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Inoue A. Amorphous, nanoquasicrystalline and nanocrystalline alloys in Al-based systems // *Progress in Materials Science*. 1998. **43**. P. 365–520.
2. Меньшикова С.Г., Ширинкина И.Г., Бродова И.Г., Бражкин В.В. Структура сплава Al90Y10 при кристаллизации под давлением // *Расплавы*. 2019. № 1. С. 18–23.
3. Напалков В.И., Махов С.В. Легирование и модифицирование алюминия и магния. МИСиС: М. 2002. 375 с.
4. Suzdaltsev A.V., Pershin P.S., Filatov A.A., Nikolaev A.Yu., Zaikov Yu.P. Review—Synthesis of aluminum master alloys in oxide-fluoride melts: A Review // *J. Electrochemical Society*. 2020. **167**. № 10. P. 102503.
5. Баранов В.Н., Лопатина Е.С., Дроздова Т.Н., Сидельников С.Б., Гильманшина Т.Р., Трифоненков Л.П. Исследование влияния параметров литья на структуру сплава системы Al–Zr // *Литейное производство*. 2011. № 11. С. 16–18.
6. Першин П.С., Филатов А.А., Суздальцев А.В., Зайков Ю.П. Алюмотермическое получение сплавов Al–Zr в расплаве KF–AlF₃ // *Расплавы*. 2016. № 5. С. 413–421.
7. Красиков С.А., Агафонов С.Н., Ченцов В.П., Жилина Е.М. Влияние фазообразования на характер межфазных взаимодействий при алюмотермическом восстановлении циркония из его диоксида // *Расплавы*. 2015. № 2. С. 60–64.
8. Дедюхин А.Е., Аписаров А.П., Ткачева О.Ю., Редькин А.А., Зайков Ю.П., Фролов А.В., Гусев А.О. Растворимость Al₂O₃ в расплавленной системе KF–NaF–AlF₃ // *Расплавы*. 2009. № 2. С. 23–28.
9. Nikolaev A.Yu., Suzdaltsev A.V., Polyakov P.V., Zaikov Yu.P. Cathode process at the electrolysis of KF–AlF₃–Al₂O₃ melts and suspensions // *J. Electrochemical Society*. 2017. **164**. № 8. H5315–H5321.
10. Суздальцев А.В., Храмов А.П., Зайков Ю.П. Углеродный электрод для электрохимических исследований в криолит-глиноземных расплавах при 700–960°C // *Электрохимия*. 2012. **48**. С. 1251–1263.
11. Filatov A.A., Pershin P.S., Suzdaltsev A.V., Nikolaev A.Yu., Zaikov Yu.P. Synthesis of Al–Zr master alloys via the electrolysis of KF–NaF–AlF₃–ZrO₂ melts // *J. Electrochemical Society*. 2018. **165**. № 2. E28–E34.
12. Pershin P.S., Kataev A.A., Filatov A.A., Suzdaltsev A.V., Zaikov Yu.P., Synthesis of Al–Zr alloys via ZrO₂ aluminum-thermal reduction in KF–AlF₃-based melts // *Met. and Mat. Trans. B*. 2017. **48**. P. 1962–1969.
13. Суздальцев А.В., Филатов А.А., Николаев А.Ю., Панкратов А.А., Молчанова Н.Г., Зайков Ю.П. Извлечение скандия и циркония из их оксидов при электролизе оксидно-фторидных расплавов // *Расплавы*. 2018. № 1. С. 5–13.
14. Филатов А.А., Першин П.С., Николаев А.Ю., Суздальцев А.В. Получение сплавов и лигатур Al–Zr при электролизе расплавов KF–NaF–AlF₃–ZrO₂ // *Цветные металлы*. 2017. № 11. С. 27–31.
15. Nikolaev A.Yu., Suzdaltsev A.V., Zaikov Yu.P. Cathode process in the KF–AlF₃–Al₂O₃ melts // *J. Electrochemical Society*. 2019. **166**. № 15. D784–D791.
16. Brodova I.G., Stolyarov V.V., Manukhin A.B., Yablonskikh T.I., Bashlykov D.V., Soshnikova E.P., Zolotova N.A. Formation of ultrafine structure in a rapidly solidified Al–Zr alloy under the effect of severe plastic deformation // *Physics of Metals and Metallography*. 2001. **91**. P. 494–499.
17. Ткачева О.Ю., Бродова И.Г., Архипов П.А., Зайков Ю.П. Влияние условий кристаллизации на структуру и модифицирующую способность Al–Sc-сплавов // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2016. № 6. С. 55–64.
18. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник в 3 т. М.: Машиностроение, 1996.
19. Birbilis N., Buchheit R.G. Electrochemical characteristics of intermetallic phases in aluminum alloys—an experimental survey and discussion // *J. Electrochemical Society*. 2005. **152**. № 4. B140–B151.

20. Brodova I.G., Bashlykov D.V., Manukhin A.B., Stolyarov V.V., Soshnikova E.P. Formation of nanostructure in rapidly solidified Al–Zr alloy by severe plastic deformation // *Scripta Materialia*. 2001. **44**. P. 1761–1764.

MODIFYING ABILITY OF THE Al–Zr MASTER ALLOY

A. A. Filatov^{1, 2}, A. V. Suzdaltsev^{1, 2}, Yu. P. Zaikov^{1, 2}

¹*Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia*

²*Institute of High-Temperature Electrochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia*

In the present study, the possibility of applying an electrolytic master alloy was studied in order to reduce the grain size and improve the properties of aluminum alloys. The experiments were carried with Al–Si–Fe alloy, by the way of illustration, to which a different amount of Al–Zr master alloy with a content of 10 wt % zirconium was added at 900°C. The effect of the zirconium content in aluminum alloy and the rate of its cooling on structure and properties was revealed. It was found that the addition of zirconium to the alloy refines the grain by 4–5 times without changing the shape and structure. The measurement of hardness of the obtained alloys revealed that when zirconium was added to high-purity aluminum the hardness increased by 1.5 times at a zirconium content of 0.4 wt % and rised with an increase in zirconium content. Moreover, the zirconium addition to the AK6 alloy leads to a slight increase in hardness, according to Brinell, which is associated with a more pronounced effect of other alloying elements and the absence of an additive effect of the addition of zirconium on hardness in their presence. The absence of intermetallic compounds in the obtained AK6 alloy samples of the AK6 alloy at different rates of crystallization modified with the Al–Zr master alloy, containing intermetallic inclusions up to 50 μm in size, indicated that the initial Al–Zr master alloy can be poured into ingots and cooled under any conditions, without the operation remelting in a mixer and other types of processing.

Keywords: aluminum, zirconium, master alloy, electrodeposition, oxide-fluoride melt

REFERENCES

1. Inoue A. Amorphous, nanoquasicrystalline and nanocrystalline alloys in Al-based systems // *Progress in Materials Science*. 1998. **43**. P. 365–520.
2. Menshikova S.G., Shirinkina I.G., Brodova I.G., Brazhkin V.V. Structure of the Al90Y10 alloy formed upon pressure solidification // *Russian Metallurgy*. 2019. № 2. P. 135–138.
3. Napalkov V.I., Makhov S.V. Legirovaniye i modifitsirovaniye alyuminiya i magniya [Alloying and modification of magnesium and aluminium]. Moscow: MISiS. 2002. [In Russian].
4. Suzdaltsev A.V., Pershin P.S., Filatov A.A., Nikolaev A.Yu., Zaikov Yu.P. Review—Synthesis of aluminum master alloys in oxide-fluoride melts: A Review // *J. Electrochemical Society*. 2020. **167**. № 10. P. 102503.
5. Baranov V.N., Lopatina E.S., Drozdova T.N., Sidelnikov S.B., Gilmanshina T.R., Trifonenkov L.P. Issledovaniye vliyaniya parametrov lit'ya na strukturu splava sistemy Al–Zr [Study of the influence of casting parameters on the structure of the alloy of the Al–Zr system] // *Liteinoe proizvodstvo*. 2011. № 11. P. 16–18. [In Russian].
6. Pershin P.S., Filatov A.A., Suzdaltsev A.V., Zaikov Yu.P. Alyumotermicheskoye polucheniye splavov Al–Zr v rasplave KF–AlF₃ [Alumothermic production of Al–Zr alloys in the KF–AlF₃ melt] // *Rasplavy*. 2016. № 5. P. 413–421. [In Russian].
7. Krasikov S.A., Agafonov S.N., Chentsov V.P., Zhilina E.M. Influence of phase formation on the interphase interactions during the aluminothermic reduction of zirconium from its dioxide // *Russian Metallurgy*. 2015. № 8. P. 615–618.
8. Dedyukhin A.E., Apisarov A.P., Tkacheva O.Yu., Redkin A.A., Zaikov Yu.P., Frolov A.V., Gusev A.O. Rastvorimost' Al₂O₃ v rasplavlennoy sisteme KF–NaF–AlF₃ [Solubility of Al₂O₃ in the molten KF–NaF–AlF₃ system] // *Rasplavy*. 2009. № 2. P. 23–28. [In Russian].
9. Nikolaev A.Yu., Suzdaltsev A.V., Polyakov P.V., Zaikov Yu.P. Cathode process at the electrolysis of KF–AlF₃–Al₂O₃ melts and suspensions // *J. Electrochemical Society*. 2017. **164**. №8. H5315–H5321.
10. Suzdaltsev A.V., Khramov A.P., Zaikov Yu.P. Carbon electrode for electrochemical studies in cryolite-alumina melts at 700–960°C // *Rus. J. Electrochemistry*. 2012. **48**. P. 1153–1159.

11. Filatov A.A., Pershin P.S., Suzdaltsev A.V., Nikolaev A.Yu., Zaikov Yu.P. Synthesis of Al–Zr master alloys via the electrolysis of $\text{KF–NaF–AlF}_3\text{–ZrO}_2$ melts // J. Electrochemical Society. 2018. **165**. № 2. E28–E34.
12. Pershin P.S., Kataev A.A., Filatov A.A., Suzdaltsev A.V., Zaikov Yu.P. Synthesis of Al–Zr alloys via ZrO_2 aluminum-thermal reduction in KF–AlF_3 -based melts // Met. and Mat. Trans. B. 2017. **48**. P. 1962–1969.
13. Suzdaltsev A.V., Filatov A.A., Nikolaev A.Y., Pankratov A.A., Molchanova N.G., Zaikov Yu.P. Extraction of scandium and zirconium from their oxides during the electrolysis of oxide-fluoride melts // Russian Metallurgy. 2018. № 2. P. 133–138.
14. Filatov A.A., Pershin P.S., Nikolaev A.Yu., Suzdaltsev A.V. Polucheniye splavov i ligatur Al–Zr pri elektrolize rasplavov $\text{KF–NaF–AlF}_3\text{–ZrO}_2$ [Obtaining of Al–Zr alloys and ligatures during the electrolysis of $\text{KF–NaF–AlF}_3\text{–ZrO}_2$ melts] // Tsvetnye Metally. 2017. № 11. P. 27–31. [In Russian].
15. Nikolaev A.Yu., Suzdaltsev A.V., Zaikov Yu.P. Cathode process in the $\text{KF–AlF}_3\text{–Al}_2\text{O}_3$ melts // J. Electrochemical Society. 2019. **166**. № 15. D784–D791.
16. Brodova I.G., Stolyarov V.V., Manukhin A.B., Yablonskikh T.I., Bashlykov D.V., Soshnikova E.P., Zolotova N.A. Formation of ultrafine structure in a rapidly solidified Al–Zr alloy under the effect of severe plastic deformation // Physics of Metals and Metallography. 2001. **91**. P. 494–499.
17. Tkacheva O.Y., Brodova I.G., Arhipov P.A., Zaikov Yu.P. Influence of crystallization conditions on the structure and modifying ability of Al–Sc alloys // Rus. J. Non-Ferrous Metals. 2017. **58**. № 1. P. 67–74.
18. Lyakishev N.P. Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem [State diagrams of double metallic systems]: a Handbook in 3 Vols: V. 1, Moscow: Mashinostroenie. 1996. [In Russian].
19. Birbilis N., Buchheit R.G. Electrochemical characteristics of intermetallic phases in aluminum alloys—an experimental survey and discussion // J. Electrochemical Society. 2005. **152**. № 4. B140–B151.
20. Brodova I.G., Bashlykov D.V., Manukhin A.B., Stolyarov V.V., Soshnikova E.P. Formation of nanostructure in rapidly solidified Al–Zr alloy by severe plastic deformation // Scripta Materialia. 2001. **44**. P. 1761–1764.