

Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-14-26

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ (обзор)

В.А. Дуюнова¹, А.В. Трапезников¹, А.А. Леонов¹, Е.А. Коренева¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Приведены и обобщены данные по модифицированию литейных алюминиевых сплавов. Помимо применения стандартных модификаторов, таких как натрий, стронций, титан, цирконий, скандий и диборид титана, показано положительное влияние на сплавы европия и гафния. Несмотря на то что многие эффективные модификаторы относятся к группе редкоземельных элементов (РЗЭ), не все РЗЭ оказывают сильное влияние. Введение в алюминиевые сплавы таких металлов, как иттербий и эрбий, практически не повлияло на морфологию и размер микроструктуры.

Ключевые слова: литейные алюминиевые сплавы, механические свойства, микроструктура, модифицирование, редкоземельные элементы, флюс

Для цитирования: Дуюнова В.А., Трапезников А.В., Леонов А.А., Коренева Е.А. Модифицирование литейных алюминиевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 4 (122). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-14-26.

Scientific article

MODIFYING OF CAST ALUMINUM ALLOYS (review)

V.A. Dyuunova¹, A.V. Trapeznikov¹, A.A. Leonov¹, E.A. Koreneva¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article presents and summarizes data on the modification of cast aluminum alloys. In addition to the use of standard modifiers such as sodium, strontium, titanium, zirconium, scandium and titanium diboride, a positive effect of europium and hafnium on alloys has been shown. Despite the fact that many effective modifiers belong to the rare earth elements (REE), not all REE have a strong effect. The introduction of metals such as ytterbium and erbium into aluminum alloys had almost no effect on the morphology and size of the microstructure.

Keywords: cast aluminum alloys, mechanical properties, microstructure, modifying, rare earth elements, flux

For citation: Dyuunova V.A., Trapeznikov A.V., Leonov A.A., Koreneva E.A. Modifying of cast aluminum alloys (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 4 (122), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-14-26.

Введение

Алюминий – самый легкий (после магния) конструкционный материал, имеющий удельную прочность, аналогичную сталям. Его повсеместно применяют благодаря технологичности и невысокой стоимости. Широкое распространение получили силумины (сплавы систем Al–Si, Al–Si–Mg и Al–Si–Cu–Mg), магналии (сплавы систем Al–Mg и Al–Mg–Si), а также сплавы системы Al–Cu–Mn. Силумины относятся к

герметичным среднепрочным сплавам, магналии – к коррозионностойким, а сплавы системы Al–Cu–Mn – к высокопрочным. Однако в немодифицированном состоянии алюминиевые сплавы имеют крупнозернистую или пластинчатую морфологию (у силуминов), что снижает их механические свойства.

Зерно в сплавах можно уменьшить двумя основными способами – физическим воздействием на кристаллизующийся расплав или введением модификатора. К физическому воздействию на расплав относятся применение ультразвука [1] и кристаллизация под избыточным давлением [2]. Основными недостатками этого способа являются необходимость использования специального оборудования и сложная масштабируемость процесса. В данной статье рассмотрено измельчение зерна путем ввода модификаторов без применения дорогостоящего или узкоспециализированного оборудования.

Традиционные модификаторы разделяют на два рода (по М.В. Мальцеву): первый род – модифицирование тугоплавкими частицами (инокуляция); второй род – модифицирование поверхностно-активными элементами (лимитация). В первом случае используют правило Данкова–Конобеевского (принцип размерно-структурного соответствия) и электронную теорию Ламихова–Самсонова (акцептирующий критерий $1/Nn$, где N – главное квантовое число недостроенной d -оболочки, а n – число электронов в d -оболочке элемента) [3]. К модификаторам алюминия первого рода относят Ti, Zr, V, TiC, TiB₂ и др.; к модификаторам алюминия второго рода – Na, Sr, Sb, Ba и др.

Модификаторы первого рода в расплаве образуют высокодисперсную коллоидно-дисперсную взвесь. Отдельные частицы этой взвеси служат зародышами, вокруг которых образуются и растут кристаллы. Модификаторы этой группы увеличивают число центров кристаллизации. Они не должны химически взаимодействовать с расплавом, должны быть тугоплавкими, чтобы обеспечить твердую фазу в модифицируемом расплаве, и изоморфными с кристаллами расплава [4]. При этом некоторые модификаторы, согласно данным требованиям, получают непосредственно в расплаве. Так, например, титан сам по себе не является модификатором, а инокулятором служит интерметаллидное соединение Al₃Ti, образующееся в расплаве непосредственно при реакции алюминия и титаносодержащего флюса либо вводимое в расплав в виде лигатуры. Так как модификаторы первого рода воздействуют на зерна α -твердого раствора, они являются достаточно универсальными и подходят для алюминиевых сплавов всех систем.

Модификаторы второго рода в расплаве адсорбируются на границах зародившегося кристалла и снижают скорость его роста, уменьшение которой приводит к увеличению промежутка времени от начала появления зародышей до окончательного затвердевания расплава. Увеличивается также число центров кристаллизации, в результате чего наблюдается более мелкозернистая структура. Данные модификаторы применяют чаще всего в доэвтектических и эвтектических силуминах для превращения грубой эвтектической структуры, содержащей игольчатые кристаллы кремния, в мелкодисперсную.

Существует несколько известных теорий, объясняющих измельчение эвтектического кремния добавками натрийсодержащих модификаторов: теория переохлаждения, адсорбционная и коллоидная [5]. Однако ни одна из этих теорий не в состоянии обобщить все наблюдаемые процессы в расплаве [3, 4].

Силумины

Сплавы алюминия с кремнием наиболее широко применяют в промышленности, поскольку они обладают множеством преимуществ – имеют высокую технологичность, герметичность и низкую стоимость.

В немодифицированном состоянии обычная форма частиц кремния в силуминах при затвердевании имеет грубую игольчатую форму, которая оказывает негативное влияние практически на все виды механических свойств. На механические и коррозионные свойства также существенное влияние оказывает размер дендритных зерен и характеристики эвтектического кремния, образующегося во время затвердевания расплава. Следовательно, с помощью модификации необходимо достичь более тонкой волокнистой и мелкозернистой структуры.

Ввиду широкого распространения силуминов в различных областях промышленности разработано большое количество модификаторов для них. Однако, несмотря на это, поиски оптимальных решений для производства продолжаются.

Широкое промышленное применение силуминов началось в 1920-х гг., после того как было установлено, что металлический натрий оказывает модифицирующее воздействие на эвтектический кремний. Далее из-за сложности введения металлического натрия в расплав стали применять натрийсодержащие соли. Однако с целью повышения чистоты сплава после обработки солями, а также для ускорения процесса плавки, спустя полвека начали использовать модифицирование лигатурой Al–Sr.

Исследования влияния натрия (Na) и стронция (Sr) на силумины (как совместно, так и по отдельности) продолжились – публикации выходили в конце XX и в XXI в. [6–14]. Данные исследования касались не только изучения влияния модификаторов на прочность при растяжении и пластичность. Например, показано, что натрий и стронций также увеличивают количество и объем пор и их распределение вдоль отливки. Природу порообразования вследствие введения модификаторов Na и Sr изучали на предмет влияния поверхностного натяжения и объемной усадки. Обнаружено, что добавление 0,005 % (по массе) Na и 0,01 % (по массе) Sr в алюминиевый сплав А356 (аналог сплава АК7ч.) увеличивает объемную усадку из-за снижения поверхностного натяжения жидкости, что приводит к образованию пор. Поры, образовавшиеся на ранних стадиях затвердевания, имеют большую продолжительность роста [8].

В статье [10] представлено исследование свойств при растяжении и разрушении сплавов А356 и А357, модифицированных стронцием. Установлено, что такие сплавы обладают лучшей пластичностью, но имеют более низкое значение предела текучести.

В работе [11] исследованы механические свойства алюминиевого сплава А356 с добавлением Sr. Результаты показали, что модификация способствует улучшению ударной вязкости и удлинению сплава в большей степени, чем пределу прочности при растяжении.

Авторами работ [12, 13] определено, что критический размер эвтектических частиц для зарождения трещин для модифицированных стронцием сплавов (например, А356) составляет ~(25–50) мкм. Кроме того, такие сплавы показали лучшее сопротивление усталости по сравнению с немодифицированными образцами.

Влияние такого способа литья и модифицирования на механические свойства и коррозионное поведение силуминов изучено в работе [14], где представлено проведение электрохимических испытаний потенциодинамической поляризации и спектроскопии сопротивления переменного тока с целью сравнения коррозионных свойств немодифицированного и модифицированного стронцием сплава А356, который подвергали как литью под давлением, так и литью в песчаные формы. Исследовано влияние модифицирования Sr при различных скоростях охлаждения, а также его воздействие на коррозионное поведение сплава.

Микроструктуры модифицированного и немодифицированного сплава А356 приведены на рис. 1 и 2 для образцов, отлитых под давлением и в песчаную форму.

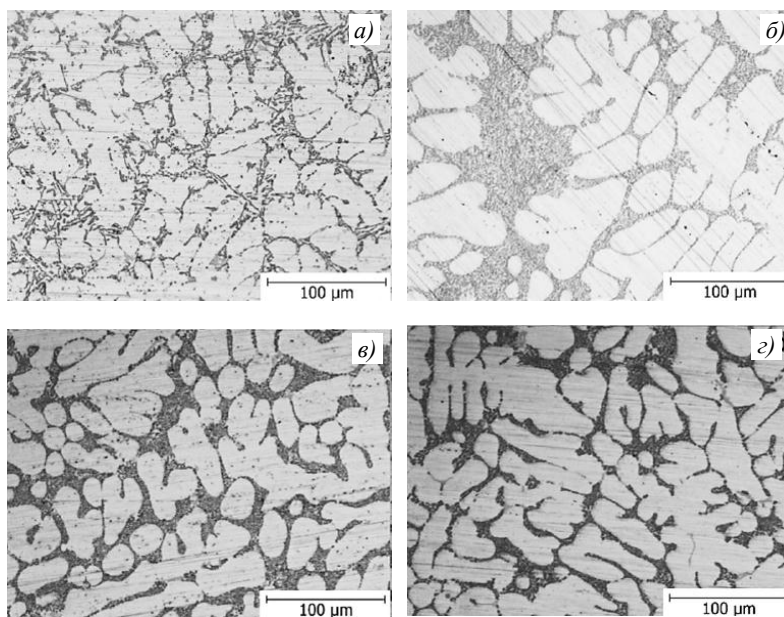


Рис. 1. Микроструктура немодифицированного (*a*) и модифицированного стронцием в количестве 0,012 (*б*), 0,017 (*в*) и 0,025 % (по массе) (*г*) сплава А356, отлитого под давлением

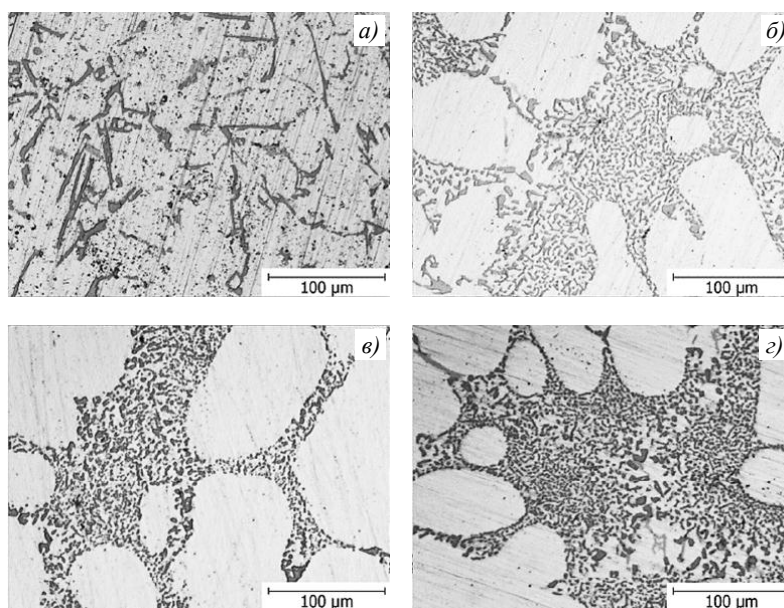


Рис. 2. Микроструктура немодифицированного (*a*) и модифицированного стронцием в количестве 0,012 (*б*), 0,017 (*в*) и 0,025 % (по массе) (*г*) сплава А356, отлитого в песчаные формы

Немодифицированный сплав А356 имеет богатую дендритную структуру алюминия (Al) с грубой игольчатой фазой кремния (Si) (рис. 1, *a* и рис. 2, *a*). Данная структура более выражена в образцах, отлитых в песчаную форму (рис. 2, *a*), чем в образцах, отлитых под давлением (рис. 1, *a*). Это связано с тем, что более низкая скорость охлаждения способствует росту Si. Наблюдается также, что игольчатая форма кремния меняется на волокнистую благодаря добавлению стронция. При этом влияние данного эффекта на микроструктуру сплава проявляется в обоих процессах литья. Следует отметить, что независимо от содержания Sr (0,012; 0,017 и 0,025 % (по массе)) все микроструктуры (рис. 1 и 2) имеют схожий вид. С учетом возможного выгорания стронция

при длительной разливке предпочтительнее использовать его в количестве 0,025 % (по массе) [15, 16].

В результате эксперимента, проведенного для изучения влияния модификатора на коррозионную стойкость сплава, выявлено, что в эвтектической области коррозия в основном происходит вокруг частиц кремния. Формирование защитного оксидного слоя зависит от формы его частиц. Огрубление частиц Si приводит к образованию гетерогенной структуры, что затрудняет рост защитной оксидной пленки. При модификации структура кремния становится мелкозернистой, что способствует росту защитной оксидной пленки и, следовательно, положительно влияет на показатель коррозионной стойкости.

Таким образом, выбор стронция в качестве модификатора обусловлен тем, что при его добавлении в расплав происходит снижение эвтектической температуры сплава [17–19], что способствует повышению жидкотекучести. Полученная микроструктура содержит более мелкие фазы Si, и, следовательно, механические свойства также повышаются [20].

Улучшение свойств сплавов, получаемых на основе возврата, представляет большой практический интерес и экономическую целесообразность. Вторичные сплавы отличаются от чистых большим содержанием железа (Fe), которое находится в сплаве в виде крупных игольчатых интерметаллидов. Модифицирование данных сплавов, например силумина А356 с содержанием 1,5 % (по массе) железа, описано в работе [21]. Определено, что содержание ванадия (V) не оказывает явного влияния на размер зерна α -Al в сплаве А356 с высоким содержанием Fe. Оптимальное содержание ванадия в количестве 0,8 % (по массе) благоприятно влияет на улучшение механических свойств данного сплава. В частности, эти результаты могут быть связаны с образованием фаз типа «китайский шрифт», уменьшением игольчатых фаз β -Fe (Al_5FeSi) и снижением пористости. Такие элементы, как Be, La, Co, Y, Mo и Li, имеют более высокую стоимость, чем ванадий, и недостаточно эффективны для модифицирования при высоком содержании железа.

Избыточное количество ванадия ухудшает механические свойства сплавов, поскольку приводит к образованию фазы VSi_2 , интерметаллидов большого размера, богатых железом, и к увеличению пористости.

Достаточно большой интерес представляют исследования влияния редкоземельных элементов (РЗЭ) на сплавы. Так, несмотря на то, что РЗЭ имеют схожие химические свойства, их влияние на сплав может быть различным. Например, в статье [22] авторы изучали влияние европия (Eu) и иттербия (Yb) на микроструктуру модельного сплава состава Al–5 % (по массе) Si. Содержание указанных элементов в данном сплаве составляло 0,05 и 0,61 % (по массе) соответственно. Определено, что Eu превращает Si в кораллоподобную структуру, а Yb – нет. Результаты атомно-зондовой томографии показали, что Eu присутствует в фазе Si в форме кластеров тройного соединения Al_2Si_2Eu , а Yb отсутствует в фазе Si. Это свидетельствует о том, что наличие кластеров тройных соединений внутри кремния является необходимым условием формирования кораллоподобной структуры. Иттербий же присутствует как тройное соединение Al_2Si_2Yb в виде пластинчатой фазы, а соединение Al_2Si_2Eu в сплаве представляет собой более компактные формы. По-видимому, недостаток данного исследования заключается в десятикратном превышении содержания Yb над Eu, т. е. избыток иттербия мог привести к изменению структуры.

В другой публикации [23] исследовали влияние эрбия (Er) на сплав А380 (аналог отечественного сплава АК8МЗч.). Эрбий вводили в количестве 0,1 % (по массе). Несмотря на снижение средней площади кремниевой фазы (с 1026,16 до 347,19 $\mu\text{м}^2$), ее форма и размер изменились незначительно (рис. 3).

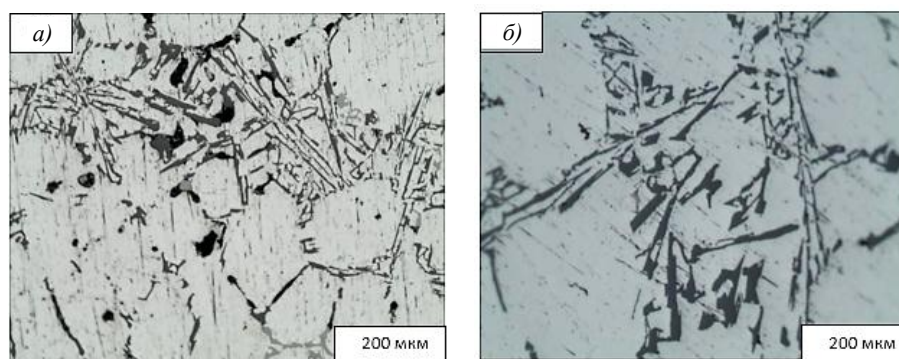


Рис. 3. Микроструктуры алюминиевых немодифицированного (а) и модифицированного эрбием (б) сплавов

Механические свойства сплава А380 после введения эрбия не изменились (см. таблицу).

Механические свойства сплава А380, содержащего 0,1 % (по массе) эрбия (Er)

Содержание Er, % (по массе)	σ_b , МПа	δ , %	НВ
–	154,90	1,20	83,3
0,1	156,95	1,31	83,6

Приведенные в таблице значения довольно низкие. По-видимому, это связано с тем, что они получены для сплава в литом состоянии.

Скандий также положительно влияет на механические свойства силуминов [24–26]. Так, совместное модифицирование сплава АЛ4МС титаном, цирконием и скандием позволяет достичь предела прочности при растяжении $\sigma_b \geq 275$ МПа и относительного удлинения $\delta \geq 5$ %. Получаемое значение относительного удлинения – самое высокое среди медистых силуминов.

Заэвтектические силумины из-за наличия в структуре кристаллов первичного кремния можно отнести к обособленной группе алюминиевых сплавов. Для них применяют модификаторы и для α -Al, и для кремниевой эвтектики, и для первичного кремния. Для последнего традиционно используют фосфор, который вводят в виде лигатуры CuP.

В статье [27] показано, что оптимальное содержание фосфора в сплаве состава Al–25 % (по массе) Si составляет 0,08 % (по массе). При этом размер зерен первичного кремния уменьшается с 92,54 до 23,84 мкм при добавлении фосфора. Морфология первичного кремния изменяется от неправильной до многоугольной. Исследовали также влияние добавок мишметалла на данный сплав. Выяснили, что содержание мишметалла в количестве 0,5 % (по массе) изменило морфологию эвтектического кремния от пластинчатой до стержнеобразной, при этом размер зерен первичного кремния не изменился.

Фосфор также вводили в доэвтектические силумины совместно с европием [28]. Определено, что в сплаве образуется соединение EuP, оказывающее модифицирующий эффект. Однако измельчение выражено слабее, чем при введении стронция.

Сплавы системы Al–Cu–Mn

Карбид и диборид титана (TiB_2) используют для измельчения зерна алюминиевых сплавов. Благодаря хорошей кристаллографической совместимости с матрицей и некоторым другим механизмам эти фазы выступают в качестве центров зарождения. В работе [29] исследованы микроструктура и механические свойства

сплава состава Al–4 % (по массе) Cu с лигатурами, содержащими частицы TiB₂. Помимо улучшения качества зерна, эти частицы (при их добавлении в достаточном количестве) могут действовать как армирующие элементы. Внедрение частиц TiB₂ в данный сплав привело к увеличению значения предела текучести при растяжении. Аналогичные результаты получены и другими исследователями [30, 31].

Частицы диборида титана, используемые для модификации алюминиевых сплавов, наиболее эффективны, поскольку обладают высокой твердостью и проводимостью [32]. В отличие от частиц карбида кремния, частицы TiB₂ не реагируют на алюминий, поэтому при их использовании можно избежать образования нестабильных продуктов на границе «частица–матрица» [33].

При разработке новых сплавов прослеживается тенденция к увеличению номенклатуры применяемых модификаторов. Так, в сплаве AL7 титан и цирконий находятся в примесях. Сплавы AM5 (AL19) и AM4,5Кд (BAL10), разработанные на основе сплава AL7, содержат титан в составе основных элементов и цирконий – в примесях. При разработке сплава BAL14 за основу взят сплав AM4,5Кд (BAL10), и цирконий перенесен в основные элементы. В примесях к сплаву BAL14 появились модификаторы иттрий и индий.

Современный высокопрочный сплав BAL20 системы Al–Cu–Mn с добавлением магния (Mg) и цинка (Zn), как и силумины, модифицируют совместным добавлением титана, циркония и скандия [34].

Сплавы данной группы реже, чем силумины, применяют в промышленности из-за их невысокой технологичности, к тому же данные сплавы рекомендуются к эксплуатации при повышенных температурах (до 300 °С) – в этом случае мелкозернистая структура снижает жаропрочность. Отчасти поэтому в научно-технической литературе представлено на порядок меньше публикаций на данную тематику.

Магналии

Для повышения механических свойств и модифицирования структуры в магналии уже с начала 1960-х гг. вводят в небольшом количестве такие элементы, как титан (Ti) и цирконий (Zr) [35]. При этом оптимальное содержание циркония составляет 0,1–0,2 % (по массе), а титана – 0,1–0,25 % (по массе) при отдельном введении в сплав. Дальнейшее увеличение содержания данных модификаторов приводит к снижению механических свойств вследствие образования крупных игольчатых интерметаллидов Al₃Ti и Al₃Zr.

Введение в сплав марганца (Mn) и хрома (Cr) способствует измельчению зерна, но менее эффективно, чем при добавлении титана и циркония. Наиболее значительного модифицирующего эффекта достигают при введении комплекса переходных элементов: Ti, Zr, Mn и Cr. Это можно объяснить уменьшением растворимости каждого из элементов в присутствии другого, что приводит к образованию существенно большего количества интерметаллидов – центров кристаллизации, а это в свою очередь накладывает определенные ограничения на верхний предел вводимых переходных металлов [36].

Комплексное модифицирование магналиев – необходимое условие получения высококачественного сплава, и ни один из современных литейных сплавов не обходится без добавления титана, циркония, скандия и бора [37–40].

Схожее влияние титана и циркония на алюминиевые сплавы обусловлено их нахождением в одной группе в Периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева (4-я группа). Гафний (Hf), очевидно, также может применяться для модифицирования, поскольку находится в той же группе. Более выраженные

металлические свойства гафния способствуют и более сильному его модифицирующему действию по сравнению с цирконием.

Так, в работе [41] исследовано влияние Hf на микроструктуру, механические свойства и стабильность упрочняющих частиц типа Al_3Sc в сплаве марки 01570 системы Al–Mg с добавлением скандия (Sc) и циркония. Данный сплав – деформируемый, но по химическому составу близок к отечественному литейному сплаву АМг5Мц (АЛ28). Содержание Zr варьировали от 0,003 до 0,09 % (по массе), содержание Sc выдерживали в диапазоне $0,23 \pm 0,03$ % (по массе). Сплав испытывали при содержании Hf в количестве 0,1 и 0,2 % (по массе), а также без него.

В результате определено, что размер зерна в микроструктуре сплава марки 01570 с добавлением гафния почти в два раза меньше, чем у образца, полученного без него (рис. 4). Авторы не смогли точно установить причину измельчения микроструктуры – по-видимому, это происходит благодаря наличию в расплаве частиц Al_3Hf или же добавление гафния привело к снижению растворимости скандия, большее количество которого оказалось вовлеченным в модификацию микроструктуры.

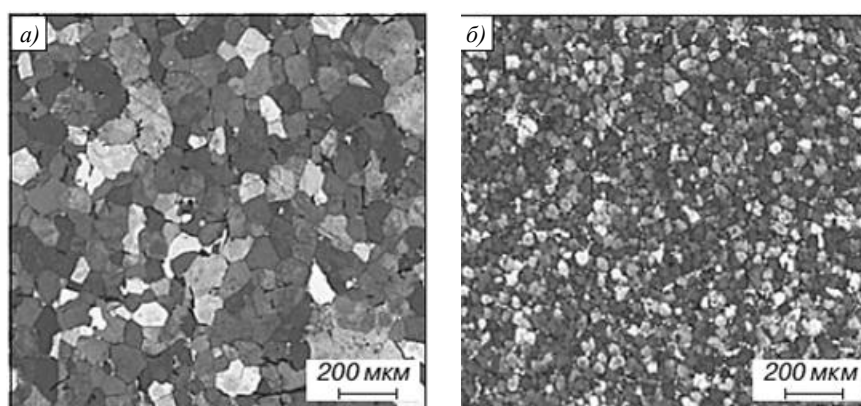


Рис. 4. Сравнение микроструктуры образцов сплава марки 01570 без гафния (а), а также с добавлением 0,2 % (по массе) гафния и 0,06 % (по массе) циркония (б)

Комплексное легирование тремя компонентами (Sc, Zr и Hf) демонстрирует лучший результат: в то время как размер зерна остается в пределах 60 мкм в образцах, содержащих два компонента (Sc, Zr или Sc, Hf), составы с тремя переходными металлами имеют вдвое меньший размер зерна.

Известно также [42] положительное влияние на сплав состава Al–10,5 % (по массе) Mg добавления молибдена в количестве 0,1 % (по массе) с одновременной обработкой фторцирконатом калия. В этом случае происходит значительное измельчение зерна сплава.

Заключения

Модифицирование литейных алюминиевых сплавов позволяет повысить их механические и коррозионные свойства. Однако при этом не существует универсального модификатора, рекомендованного даже для одной группы сплавов. Общепринятым фактом является то, что комплексное воздействие на сплав (например, ввод тугоплавких инокуляторов различного состава и физическое воздействие) предпочтительнее, чем каждый из способов по отдельности.

Для силуминов рекомендуется совместный ввод модификаторов первого и второго родов, например титана и стронция. При этом наилучшего результата достигают при комбинации элементов, входящих в каждую группу, т. е. с титаном вводят цирконий и скандий, а со стронцием – натрий.

Заэвтектические силумины, помимо перечисленного ранее, модифицируют фосфором, измельчающим первичный кремний.

Для модифицирования сплавов системы Al–Cu–Mn и магналиев применяют комплексное использование элементов-инокуляторов (Ti, Zr, Sc, В, Hf), являющихся модификаторами первого рода.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. Эскин Г.И., Бочвар С.Г. Модифицирование алюминиевых сплавов акустическим воздействием // Технология легких сплавов. 2018. № 3. С. 14–19.
2. Липчин Т.Н. Структура и свойства цветных сплавов, затвердевших под давлением. М.: Металлургия, 1994. 128 с.
3. Никитин К.В. Модифицирование и комплексная обработка силуминов: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. 92 с.
4. Альтман М.Б., Стромская Н.П. Повышение свойств стандартных литейных алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1984. 128 с.
5. Мальцев М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. 2-е изд. М.: Металлургия, 1970. 346 с.
6. Lu L., Nogita K., Dahle A.K. Combining Sr and Na additions in hypoeutectic Al–Si foundry alloys // Material Science and Engineering A. 2005. Vol. 399. P. 244–253.
7. Li J.H., Barrirero J., Engstler M. et al. Nucleation and growth of eutectic Si in Al–Si alloys with Na addition // Metallurgical and Materials Transactions A. 2015. Vol. 46. P. 1300–1311.
8. Emadi D., Gruzleski J.E., Toguri J.M. The effect of Na and Sr modification on surface tension and volumetric shrinkage of A356 alloy and their influence on porosity formation // Metallurgical and Materials Transactions B. 1993. Vol. 24 (6). P. 1055–1063.
9. Iwahori H., Yonekura K., Yamamoto Y., Nakamura M. Occurring behavior of porosity and feeding capabilities of sodium- and strontium-modified Al–Si alloys // Transactions of the American Foundrymen's Society. 1990. Vol. 98. P. 167–173.
10. Wang Q.G. Microstructural effects on the tensile and fracture behavior of aluminum casting alloys A356/357 // Metallurgical and Materials Transactions A. 2003. Vol. 34 (12). P. 2887–2899.
11. Gruzleski J.E., Closset B.M. The treatment of liquid aluminum-silicon alloys. Des Plaines: American Foundrymen's Society, Inc., 1990. 256 p.
12. Wang Q.G., Apelian D., Lados D.A. Fatigue behavior of A356–T6 aluminum cast alloys. Part I. Effect of casting defects // Journal of Light Metals. 2001. Vol. 1 (1). P. 73–84.
13. Wang Q.G., Apelian D., Lados D.A. Fatigue behavior of A356–T6 aluminum cast alloys. Part II. Effect of microstructural constituents // Journal of Light Metals. 2001. Vol. 1 (1). P. 85–97.
14. Öztürk İ., Ağaoğlu G.H., Erzi E. et al. Effects of strontium addition on the microstructure and corrosion behavior of A356 aluminum alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2018. Vol. 763. P. 384–391. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.05.341.
15. Uludağ M., Çetin R., Dispinar D., Tiryakioğlu M. Characterization of the effect of melt treatments on melt quality in Al–7 wt. % Si–Mg Alloys // Metals. 2017. Vol. 7 (5). P. 157–172. DOI: 10.3390/met7050157.
16. Eguskiza S., Niklas A., Fernández-Calvo A.I. et al. Study of strontium fading in Al–Si–Mg and Al–Si–Mg–Cu alloy by thermal analysis // International Journal of Metalcasting. 2015. Vol. 9 (3). P. 43–50.
17. Dahle A.K., Nogita K., McDonald S.D. et al. Eutectic modification and microstructure development in Al–Si Alloys // Material Science and Engineering A. 2005. Vol. 413. P. 243–248.
18. Closset B., Gruzleski J.E. Structure and properties of hypoeutectic Al–Si–Mg alloys modified with pure strontium // Metallurgical and Materials Transactions A. 1982. Vol. 13 (6). P. 945–951.

37. Левчук В.В., Трапезников А.В., Пентюхин С.И. Коррозионностойкие литейные алюминиевые сплавы (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 7 (67). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-33-40.
38. Белов Е.В., Дуюнова В.А., Леонов А.А., Трапезников А.В. Метод повышения герметичности и упрочнения литейных коррозионностойких свариваемых магналиев // Труды ВИАМ. 2020. № 6–7 (89). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-11-18.
39. Антипов К.В., Оглодкова Ю.С., Курынцев С.В., Сафиуллин Э.И. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и свойства листов из алюминий-литиевого сплава В-1469 // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-16-26.
40. Кузнецов А.О., Оглодков М.С., Климкина А.А. Влияние химического состава на структуру и свойства сплава системы Al–Mg–Si // Труды ВИАМ. 2018. № 7 (67). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-3-9.
41. Яшин В.В., Арышенский Е.В., Дриц А.М., Латушкин И.А. Влияние добавок переходного металла гафния на микроструктуру алюминиевого сплава 01570 // Цветные металлы. 2020. № 11. С. 84–90.
42. Постников Н.С. Коррозионностойкие алюминиевые сплавы. М.: Metallurgia, 1976. 300 с.

References

1. Eskin G.I., Bochvar S.G. Modification of aluminum alloys by acoustic impact. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2018, no. 3, pp. 14–19.
2. Lipchin T.N. *Structure and properties of non-ferrous alloys hardened under pressure*. Moscow: Metallurgiya, 1994, 128 p.
3. Nikitin K.V. *Modification and complex processing of silumins: textbook*. 2nd ed., rev. and add. Samara: Samara State Tech. Univ., 2016, 92 p.
4. Altman M.B., Stromskaya N.P. *Improving the properties of standard cast aluminum alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1984, 128 p.
5. Maltsev M.V. *Metallography of industrial non-ferrous metals and alloys*. 2nd ed. Moscow: Metallurgiya, 1970, 346 p.
6. Lu L., Nogita K., Dahle A.K. Combining Sr and Na additions in hypoeutectic Al–Si foundry alloys. *Material Science and Engineering A*, 2005, vol. 399, pp. 244–253.
7. Li J.H., Barrirero J., Engstler M. et al. Nucleation and growth of eutectic Si in Al–Si alloys with Na addition. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, vol. 46, pp. 1300–1311.
8. Emadi D., Gruzleski J.E., Toguri J.M. The effect of Na and Sr modification on surface tension and volumetric shrinkage of A356 alloy and their influence on porosity formation. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1993, vol. 24 (6), pp. 1055–1063.
9. Iwahori H., Yonekura K., Yamamoto Y., Nakamura M. Occurring behavior of porosity and feeding capabilities of sodium- and strontium-modified Al–Si alloys. *Transactions of the American Foundrymen's Society*, 1990, vol. 98, pp. 167–173.
10. Wang Q.G. Microstructural effects on the tensile and fracture behavior of aluminum casting alloys A356/357. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2003, vol. 34 (12), pp. 2887–2899.
11. Gruzleski J.E., Closset B.M. *The treatment of liquid aluminum-silicon alloys*. Des Plaines: American Foundrymen's Society, Inc., 1990, 256 p.
12. Wang Q.G., Apelian D., Lados D.A. Fatigue behavior of A356–T6 aluminum cast alloys. Part I. Effect of casting defects. *Journal of Light Metals*, 2001, vol. 1 (1), pp. 73–84.
13. Wang Q.G., Apelian D., Lados D.A. Fatigue behavior of A356–T6 aluminum cast alloys. Part II. Effect of microstructural constituents. *Journal of Light Metals*, 2001, vol. 1 (1), pp. 85–97.
14. Öztürk İ., Ağaoğlu G.H., Erzi E. et al. Effects of strontium addition on the microstructure and corrosion behavior of A356 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 763, pp. 384–391. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.05.341.
15. Uludağ M., Çetin R., Dispınar D., Tiryakioğlu M. Characterization of the effect of melt treatments on melt quality in Al–7 wt. % Si–Mg Alloys. *Metals*, 2017, vol. 7 (5), pp. 157–172. DOI: 10.3390/met7050157.

16. Eguskiza S., Niklas A., Fernández-Calvo A.I. et al. Study of strontium fading in Al–Si–Mg and Al–Si–Mg–Cu alloy by thermal analysis. *International Journal of Metalcasting*, 2015, vol. 9 (3), p. 43–50.
17. Dahle A.K., Nogita K., McDonald S.D. et al. Eutectic modification and microstructure development in Al–Si Alloys. *Material Science and Engineering A*, 2005, vol. 413, pp. 243–248.
18. Closset B., Gruzleski J.E. Structure and properties of hypoeutectic Al–Si–Mg alloys modified with pure strontium. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1982, vol. 13 (6), pp. 945–951.
19. Dahle A.K., Nogita K., McDonald S.D. et al. Eutectic nucleation and growth in hypoeutectic Al–Si alloys at different strontium levels. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2001, vol. 32 (4), pp. 949–960.
20. Samuel A.M., Doty H.W., Valtierra S., Samuel F.H. Effect of grain refining and Sr-modification interactions on the impact toughness of Al–Si–Mg cast alloys. *Materials and Design*, 2014, vol. 56, pp. 264–273.
21. Lin B., Li H., Xu R. et al. Effects of Vanadium on Modification of Iron-Rich Intermetallics and Mechanical Properties in A356 Cast Alloys with 1.5 wt. % Fe. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, vol. 28, pp. 475–484. DOI: 10.1007/s11665-018-3798-4.
22. Barrirero J., Pauly C., Engstler M. et al. Eutectic modification by ternary compound cluster formation in Al–Si alloys. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, art. 5506. DOI: 10.1038/s41598-019-41919-2.
23. Ahmad R., Wahab N.A., Hasan S. et al. Effect of Erbium Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminium Alloy. *Key Engineering Materials*, 2019, vol. 796, pp. 62–66. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.796.62.
24. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Rare metals and rare earth elements – materials of modern and future high technologies. *Trudy VIAM*, 2013, no. 2, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 05, 2022).
25. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
26. Mazalov I.S., Mazalov P.B., Suhov D.I., Sulyanova E.A. Influence of hot isostatic pressing parameters on structure and properties of cobalt-based alloys obtained by selective laser melting. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 06, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-3-14.
27. Zhang H., Wang D., Qinc K. et al. Effect of Compound Modification and Cooling Rate on Microstructure and Mechanical Properties of Al–25 % Si Alloy. *Materials Science Forum*, 2016, vol. 877, pp. 27–32. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.877.27.
28. Li J.H., Ludwig T.H., Oberdorfer B., Schumacher P. Solidification behavior of Al–Si based alloys with controlled additions of Eu and P. *International Journal of Cast Metals Research*, 2018, vol. 31, no. 6, pp. 319–331. DOI: 10.1080/13640461.2018.1480891.
29. Krishna N.N., Sivaprasad K., Susila P. Strengthening contributions in ultra-high strength cryorolled Al–4 % Cu–3 % TiB₂ in situ composite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, vol. 24, pp. 641–647.
30. Krishna N.N., Sivaprasad K. High temperature tensile properties of cryorolled Al–4 % Cu–3 % TiB₂ in-situ composites. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2011, vol. 64, pp. 63–66.
31. Mandal A., Maiti R., Chakraborty M., Murty B.S. Effect of TiB₂ particles on aging response of Al–4 % Cu alloy. *Material Science and Engineering A*, 2004, vol. 386, pp. 296–300.
32. Wu S.Q., Zhu H.G., Tjong S.C. Wear Behavior of In Situ Al-Based Composites Containing TiB₂, Al₂O₃, and Al₃Ti Particles. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1999, vol. 30a, pp. 243–247.
33. Promakhov V.V., Khmeleva M.G., Zhukov I.A. et al. Influence of Vibration Treatment and Modification of A356 Aluminum Alloy on Its Structure and Mechanical Properties. *Metals*, 2019, vol. 9, pp. 87. DOI: 10.3390/met9010087.
34. Ogorodov D.V., Trapeznikov A.V., Popov D.A., Pentuykhin S.I. The development of casting heat-resistant aluminum alloys (To the 120th anniversary since the birth of I.F. Kolobnev). *Trudy VIAM*, 2017, no. 2 (50), paper no. 12. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: December 05, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-12-12.

35. Belousov N.N. Cast aluminum-magnesium alloys. *Cast aluminum alloys*. Ed. I.N. Friedlander. Moscow: Oborongiz, 1961, pp. 52–65.
36. Cherkasov V.V. *Foundry welded corrosion-resistant aluminum alloy VAL16: method. management*. Moscow: VIAM, 1990, 84 p.
37. Levchuk V.V., Trapeznikov A.V., Pentyukhin S.I. Corrosion-resistant foundry aluminum alloys (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 7 (67), paper no. 4. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 05, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-33-40.
38. Belov E.V., Duyunova V.A., Leonov A.A., Trapeznikov A.V. Method of increasing tightness and hardening of cast corrosion-resistant welded magnalias. *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 05, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-11-18.
39. Antipov K.V., Oglodkova Yu.S., Kuryntsev S.V., Safiullin E.I. Investigation of the influence of heat treatment modes on the structure and properties of sheets of aluminum-lithium alloy V-1469. *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 05, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-16-26.
40. Kuznetsov A.O., Oglodkov M.S., Klimkina A.A. The influence of chemical composition on structure and properties of Al–Mg–Si alloy. *Trudy VIAM*, 2018, no. 7 (67), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 05, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-3-9.
41. Yashin V.V., Aryshenskii E.V., Drits A.M., Latushkin I.A. Influence of additives of the transition metal hafnium on the microstructure of aluminum alloy 01570. *Tsvetnye metally*, 2020, no. 11, pp. 84–90.
42. Postnikov N.S. *Corrosion resistant aluminum alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1976, 300 p.

Информация об авторах

Дуюнова Виктория Александровна, начальник Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Трапезников Андрей Владимирович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Леонов Александр Андреевич, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Коренева Елизавета Александровна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Information about the authors

Victoria A. Duyunova, Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey V. Trapeznikov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander A. Leonov, Head of laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Elizaveta A. Koreneva, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 21.12.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 27.12.2022.

The article was submitted 21.12.2022; approved and accepted for publication after reviewing 27.12.2022.