

Научная статья

УДК 669.715:546.661

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-66-84

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЕВРОПИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

И.А. Петров<sup>1</sup>, А.В. Трапезников<sup>1</sup>, Ю.В. Решетников<sup>1</sup>, Е.И. Воробьева<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Рассмотрены различные аспекты применения редкоземельного элемента – европия. Описаны основные области использования европия в различных отраслях промышленности. Показан исторический аспект открытия европия. Приведены результаты исследований по влиянию европия на структуру и механические свойства разных литейных алюминиевых сплавов (силуминов). Рассмотрены различные теории и адсорбционные механизмы, объясняющие процессы модифицирования эвтектического и первичного кремния европием.

**Ключевые слова:** редкоземельные элементы, европий, литейные алюминиевые сплавы, модифицирование, адсорбционные механизмы, механические свойства, микроструктура

**Для цитирования:** Петров И.А., Трапезников А.В., Решетников Ю.В., Воробьева Е.И. Перспективы применения европия для повышения эксплуатационных свойств литейных алюминиевых сплавов // Труды ВИАМ. 2026. № 3 (157). С. 66–84. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-66-84.

Scientific article

## PROSPECTS FOR APPLICATION OF EUROPIUM TO IMPROVE THE PERFORMANCE PROPERTIES OF CASTING ALUMINUM ALLOYS

I.A. Petrov<sup>1</sup>, A.V. Trapeznikov<sup>1</sup>, Yu.V. Reshetnikov<sup>1</sup>, E.I. Vorobyova<sup>1</sup>

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

**Abstract.** This review examines various aspects of the application of the rare earth element europium. The main areas of its application in various industries are described. The historical aspect of the discovery of europium is shown. The results of studies on the effect of europium on the structure and mechanical properties of various cast aluminum alloys (silumins) are presented. Various theories and adsorption mechanisms explaining the processes of modification of eutectic and primary silicon with europium are considered.

**Keywords:** rare earth elements, europium, cast aluminum alloys, modification, adsorption mechanisms, mechanical properties, microstructure

**For citation:** Petrov I.A., Trapeznikov A.V., Reshetnikov Yu.V., Vorobyova E.I. Prospects for application of europium to improve the performance properties of casting aluminum alloys. *Trudy VIAM*, 2026, no. 3 (157), pp. 66–84. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-66-84.

## Введение

В настоящее время значительное внимание уделяется вопросам применения редкоземельных элементов (РЗЭ) и их соединений. Благодаря уникальным физическим и химическим свойствам РЗЭ применяют в самых различных отраслях промышленности. Объем потребления РЗЭ в мире увеличивается за счет развития новых наукоемких высокотехнологичных производств (авиационная, ракетно-космическая, электронная и радиоэлектронная промышленность, производство компонентов компьютеров и вычислительной техники, робототехники). В черной и цветной металлургии РЗЭ применяют для повышения уровня эксплуатационных свойств материалов и изделий из них [1–3]. Добавки РЗЭ используют для повышения качества чугуна (модифицирование структуры, очистка от вредных примесей) и сталей (раскисление, дегазация, десульфурация и микролегирование) [2]. Кроме того, РЗЭ применяют в производстве цветных сплавов, а именно жаропрочных сплавов на никелевой основе (раскисление и повышение структурной стабильности) [4], и для легирования титановых сплавов [5]. Для повышения уровня механических, специальных и технологических свойств в алюминиевых и магниевых сплавах используют ряд РЗЭ, в частности Sc, Y, Nd, Ce, La, Er, Tb и др. [6–8]. Оксиды РЗЭ применяют для улучшения механических свойств, теплостойкости и коррозионной стойкости высокотемпературной керамики, что делает их ценным компонентом для производства защитных покрытий, керамических литейных форм и тиглей, работающих в экстремальных условиях [4, 9–12].

Литейные алюминиевые сплавы используют в автомобильной, авиационной и ракетно-космической промышленности благодаря оптимальному сочетанию основных эксплуатационных (прочность, пластичность, коррозионная стойкость и т. д.) и технологических свойств. Особое значение для повышения эксплуатационных характеристик алюминиевых литейных сплавов имеет измельчение структуры. Такой результат достигается легированием, микролегированием или комплексным модифицированием, при котором разные элементы воздействуют на различные структурные составляющие сплава. В большинстве случаев модифицирование можно рассматривать как введение в сплав добавок в количестве от 0,001 до 0,3 %. Известно большое количество элементов, оказывающих модифицирующее воздействие на структуру литейных алюминиевых сплавов [13]. Наиболее часто в литейном производстве для модифицирования силуминов (сплавы систем Al–Si, Al–Si–Mg и Al–Si–Cu–Mg) используют Na или Sr. В то же время для модифицирования сплавов систем Al–Mg, Al–Mg–Si, Al–Cu–Mn, Al–Zn–Mg и др. применяют Ti, Zr или Sc [14, 15].

Эжен Демарсе в 1896 г. обнаружил полосу спектра нового элемента в материале, содержащем самарий. В 1901 г. в работе [16] он сообщил, что предположения о существовании нового элемента подтвердились. Демарсе предложил назвать новый элемент европием (Eu). В 1903–1904 гг. факт существования европия подтвержден французскими учеными Жоржем Урбэном и Генри Лакомбом. Металлический европий впервые получен лишь в 1937 г. [17]. Европий является наиболее легким элементом среди лантаноидов. Плотность европия составляет 5,245 г/см<sup>3</sup>. Это мягкий РЗЭ, который имеет серебристо-белый цвет и высокую реакционную способность. Он легко окисляется на воздухе, поэтому его хранят в инертной среде или специальных герметичных емкостях, например в парафине.

В настоящее время европий широко используют в различных областях науки и техники. Основное применение европия определяется уникальными люминесцентными характеристиками. Европий – основная составляющая люминофоров, используемых

в электронно-лучевых трубках и плазменных цветных экранах. Соединения европия применяют в ядерной энергетике в качестве поглотителя нейтронов (оксид европия и др.) и в лазерных материалах. В металлургии европий используется в качестве легирующего элемента для улучшения механических и коррозионностойких свойств сплавов [1, 17, 18].

В данной статье рассматривается влияние европия на структуру и механические свойства различных силуминов, а также теории и механизмы, объясняющие процессы модифицирования европием эвтектического и первичного кремния в силуминах.

### Теории и механизмы модифицирования европием

Для объяснения процесса модифицирования силуминов обычно используют теорию переохлаждения и адсорбционную теорию.

Основой теории переохлаждения являются данные термического анализа. Согласно теории переохлаждения [19], модифицирование силуминов понижает температуру начала кристаллизации эвтектики. При этом понижается температура первичной кристаллизации  $\alpha$ -твердого раствора и кремния. Вследствие переохлаждения кристаллизация протекает очень быстро, что приводит к резкому возрастанию количества центров кристаллизации и получению модифицированной структуры. Основное положение адсорбционной теории заключается в избирательной адсорбции модификатора на гранях кристалла кремния, что затрудняет его рост. Торможение роста кристаллов эвтектического кремния приводит к пересыщению жидкости атомами кремния и образованию при этом новых кристаллов кремния, т. е. модифицированию структуры [20].

Общепризнаны следующие адсорбционные механизмы модифицирования. В работе [21] представлен механизм «отравления» (Twin plane re-entrant edge (TPRE) – входящая в двойную плоскость кромка), который предполагает, что модифицирующий элемент адсорбируется в активных точках роста во входящих углах двойников, затрудняя рост кристаллов кремния и изменяя его направление. В результате дезактивируется механизм TPRE и кристаллы кремния растут более изотропным образом. Другой механизм (Impurity-induced twinning (ИТ) – двойникование, вызванное примесями) предложен в работе [22]. Основная идея механизма ИТ заключается в том, что атомы модифицирующего элемента внедряются в кремний путем адсорбции на фронте роста кристалла на границе раздела твердой и жидкой фаз. Это приводит к образованию новых двойников и, следовательно, обеспечивает их рост в разных направлениях. Согласно механизму ИТ, только элементы, характеризующиеся «идеальным» соотношением атомных радиусов ( $r_i/r \approx 1,646$ , где  $r_i$  – атомный радиус элемента,  $r$  – атомный радиус кремния), являются модификаторами.

Очевидно, что существуют различия в способности элементов с «идеальным» соотношением размеров  $r_i/r$  влиять на плотность роста двойников (создавать двойникование). Они, безусловно, зависят от других факторов, отличных от соотношения размеров  $r_i/r$ . На рис. 1 показана зависимость относительных атомных радиусов ряда РЗЭ от атомного радиуса кремния.

Например, Na имеет меньшее соотношение атомных радиусов ( $r_i/r = 1,59$ ), но гораздо более эффективен, чем Yb ( $r_i/r = 1,66$ ) или Ca ( $r_i/r = 1,68$ ), которые находятся в непосредственной близости друг от друга. Элементы Sr и Ba имеют схожие значения соотношения  $r_i/r$  (1,84 и 1,86 соответственно) и эффекты. Помимо фазовых равновесий для бинарных систем, должны учитываться такие факторы, как температура плавления, давление паров, свободная энергия образования оксидов и скорость охлаждения.

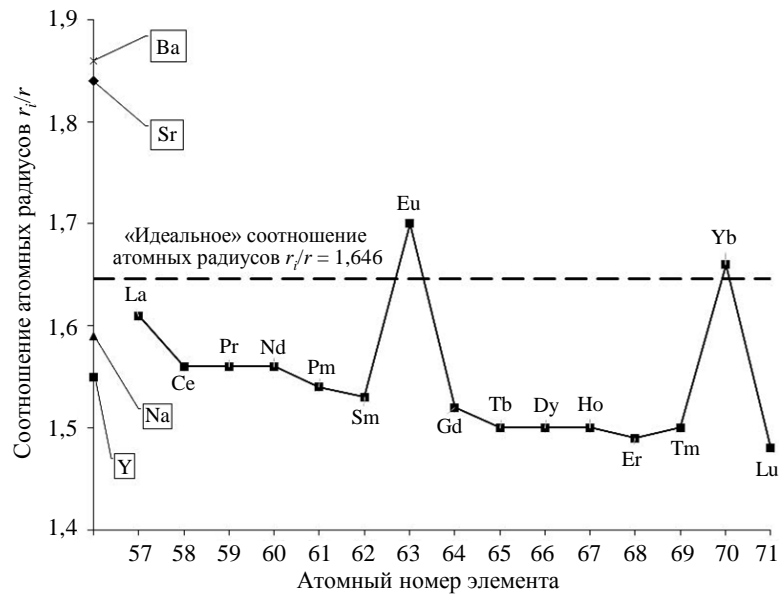
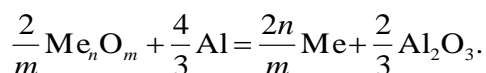


Рис. 1. Соотношение атомных радиусов редкоземельных элементов, Y, Na, Sr, Ba ( $r_i$ ) и кремния ( $r$ ) [23, 24]

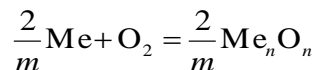
Щелочные элементы имеют низкую температуру плавления и высокое давление паров, что способствует их быстрому распределению по всему расплаву. Наиболее эффективным в этом отношении является Na. На практике модифицирующий эффект Na сохраняется недолго, так как элемент быстро выгорает. Щелочноземельные элементы имеют температуру плавления, близкую к температуре алюминиевых сплавов, но относительно низкое давление паров. Они растворяются довольно быстро и сохраняют модифицирующий эффект в расплаве гораздо дольше, чем щелочные металлы, что обеспечивает преимущества использования Sr или Ba на практике. Большинство РЗЭ (например, европий) имеют схожую температуру плавления, поэтому растворяются практически с той же скоростью, что и щелочноземельные элементы, но также сохраняют модифицирующий эффект в расплаве в течение длительного времени только за счет давления паров [22].

В зависимости от применяемого элемента фазовые диаграммы алюминия делятся на две категории. К первой категории относятся фазовые диаграммы алюминия с редкоземельными и щелочноземельными элементами, которые обладают повышенной растворимостью в жидком состоянии, низкой растворимостью в твердом состоянии и образуют соединения. Ко второй категории относятся фазовые диаграммы алюминия с щелочными элементами, имеющими незначительную растворимость в твердом состоянии и ограниченную растворимость в жидком состоянии, а также монотектические точки при очень небольших концентрациях. Диаграммы данного типа обеспечивают эффективный механизм повышения концентрации модифицирующего элемента на фронте роста твердой и жидкой фаз. Образование тройных соединений типа  $Al_nSi_mMe$  может являться показателем того, что модифицирующий элемент, вероятно, будет адсорбироваться на фронте роста кристаллов кремния. Следовательно, при благоприятном соотношении атомных радиусов  $r_i/r$  вероятность образования двойников возрастает [22].

Модифицирующие элементы, такие как щелочные и щелочноземельные металлы, а также РЗЭ, проявляют высокое химическое сродство к кислороду и могут образовывать оксиды. Взаимодействие оксидов металлов с алюминием может быть представлено в общем виде следующим уравнением:



К основным условиям самопроизвольного протекания реакции относится более высокая термодинамическая прочность оксида алюминия по сравнению с оксидами восстанавливаемых металлов. Проведенные термодинамические расчеты для реакции образования оксидов щелочных металлов и некоторых РЗЭ по общей реакции



при температурах плавки (1000–1100 К) показали, что большинство щелочных металлов (за исключением лития), а также европий образуют оксиды, имеющие меньшее абсолютное значение свободной энергии Гиббса  $\Delta G^0$ , чем оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Для реакции образования оксида европия  $\Delta G_{1000 \text{ К}}^0 = -138$  кДж/моль. По степени прочности оксидов элементы располагаются в следующем порядке: Cs, Rb, K, Na, Eu, Al, La, Ce, Ba, Li, Sc, Sr, Y, Nd, Yb, Pr, Sm, Gd, Dy, Tb, Er [25, 26]. Элементы, располагающиеся левее Al, могут быть восстановлены алюминием из кислородных соединений. При этом чем меньше величина свободной энергии Гиббса образования оксида, тем более активно развивается реакция восстановления.

Следует отметить, что, растворяя восстановленный элемент, алюминий выводит его из зоны реакции и тем самым препятствует протеканию вторичных реакций (окисление), а также испарению элементов.

Свободная энергия Гиббса реакции взаимодействия оксида европия с алюминием имеет отрицательное значение ( $\Delta G_{1000 \text{ К}}^0 = -1182$  кДж/моль), что свидетельствует о термодинамической возможности протекания данной реакции в прямом направлении и отличает поведение европия в расплаве от других РЗЭ.

В таблице приведены некоторые физические и кристаллографические свойства Eu и  $\text{Al}_4\text{Eu}$  [22, 26–28].

**Физические и кристаллографические свойства Eu и  $\text{Al}_4\text{Eu}$**

Показатель	Значения показателей	
	Eu	$\text{Al}_4\text{Eu}$
Температура плавления, °С	826	–
Температура кипения, °С	1529	–
Давление паров над расплавом при температуре 1000 К, МПа	$1,8 \cdot 10^{-5}$	–
Поверхностное натяжение, Н/м	264	–
Тип решетки	ОЦК	ОЦТ
Параметр кристаллической решетки $a$ , нм	0,4581	4,42
Температура образования интерметаллида, °С	–	628
Примечание. ОЦК – объемноцентрированная кубическая решетка, ОЦТ – объемноцентрированная тетрагональная решетка.		

Исходя из механизма модифицирования эвтектического кремния ПТ, европий находится в доступном диапазоне соотношения атомных радиусов  $r_i/r = 1,70$  для модифицирования эвтектического кремния. Согласно данным таблицы, европий должен являться эффективным модификатором эвтектического кремния.

Большой интерес представляет использование европия для модифицирования силуминов. В ряде работ [29–43] показано, что европий оказывает модифицирующее воздействие на структуру силуминов, приводя к повышению уровня механических свойств. Помимо измельчения основных структурных составляющих силумина (кремний в эвтектике  $\alpha + \text{Si}$  и  $\alpha\text{-Al}$ ), европий положительно влияет на морфологию Fe-содержащей фазы (подавляет игольчатую структуру).

### Применение европия в доэвтектических силуминах

Исследования ряда авторов [29–36] показали, что введение европия в доэвтектические силумины положительно влияет на микроструктуру и механические свойства. Установлено, что для эффективного модифицирования эвтектического кремния в сплаве состава Al–5Si достаточно введения 0,05 % Eu. В то же время для доэвтектических силуминов с большим содержанием кремния для получения измельченного эвтектического кремния с тонковолокнистой морфологией нужно вводить Eu в количестве от 0,1 до 0,16 % для сплава состава Al–7Si, до 0,24 % – для сплава состава Al–10Si (рис. 2).

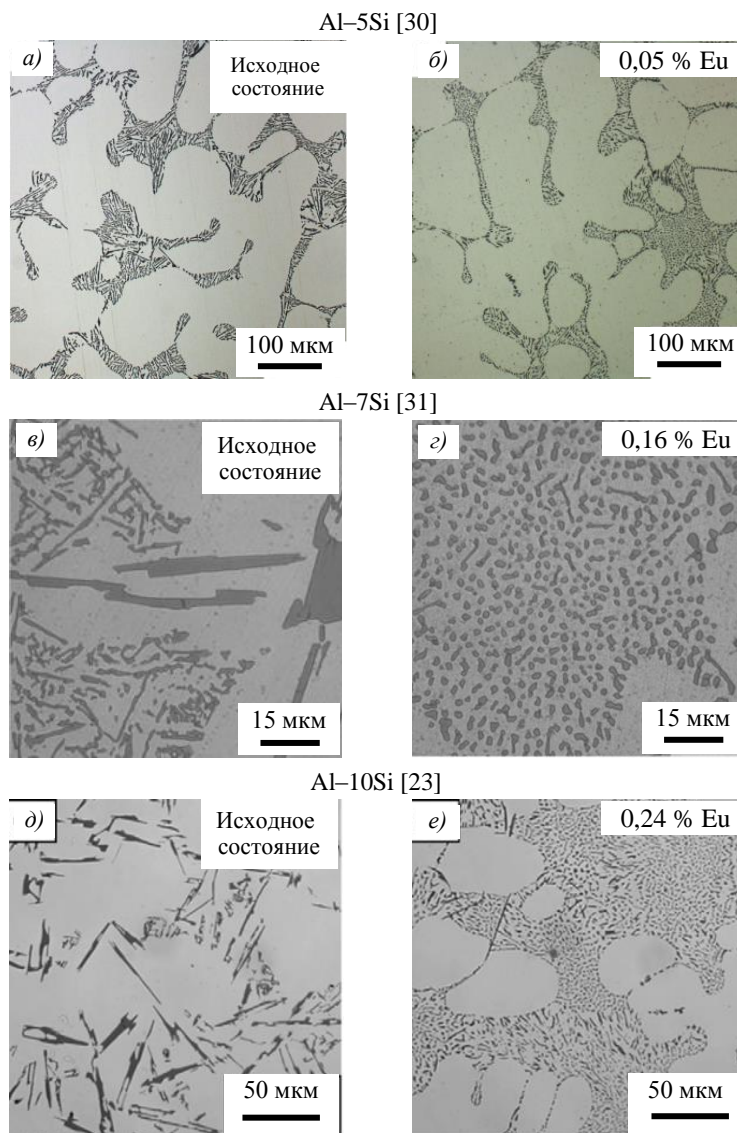


Рис. 2. Микроструктуры доэвтектических силуминов с различным содержанием кремния в исходном состоянии (а, в, д) и модифицированных европием (б, z, е)

В работе [35] исследованы микроструктура и механические свойства алюминиевого сплава А356 с добавлением Eu. Подтверждено, что 0,1 % Eu эффективно модифицирует эвтектический Si и уменьшает расстояние между вторичными дендритными ветвями  $\alpha$ -Al. Измельчение микроструктуры в сплаве А356, содержащем 0,1 % Eu, в сочетании с термообработкой Т6 повышает предел прочности до 265 МПа и пластичность до 14,7 % относительно показателей исходного сплава.

Модифицирование эвтектического Si, вызванное добавлением европия, исследовано авторами работ [32, 34] с помощью методов структурно-фазового анализа (сканирующая электронная микроскопия с системой энергодисперсионной спектроскопии) и дифференциальной сканирующей калориметрии. Согласно результатам дифференциальной сканирующей калориметрии, введение Eu приводит к переохлаждению расплава и способствует появлению большего количества зародышей эвтектического кремния. Исследование микроструктуры показало, что внутри эвтектического кремния обнаружено множество двойников частиц Si. Кроме того, фаза  $Al_2Si_2Eu$  наблюдается как вблизи, так и внутри эвтектического Si (рис. 3–5), что, предположительно, препятствует росту кристаллов Si. Образование большой плотности двойников кремния можно объяснить адсорбцией атомов европия.

Экспериментальные и теоретические исследования авторов работы [36] выявили различные функции атомов европия в процессе роста эвтектического Si в сплавах системы Al–Si:

- адсорбируются в активных точках роста во входящих углах двойников, что затрудняет и изменяет направление роста кристаллов кремния, запуская механизм «отравления» TPPE (рис. 6, а);
- внедряются в кремний путем адсорбции на фронте роста кристалла кремния на границе раздела твердой и жидкой фаз, запуская механизм ИТ (рис. 6, б);
- располагаются перед растущими двойниками Si, образуя сплошной слой, богатый европием, что свидетельствует о захвате растворенного вещества внутри эвтектического Si (рис. 6, в).

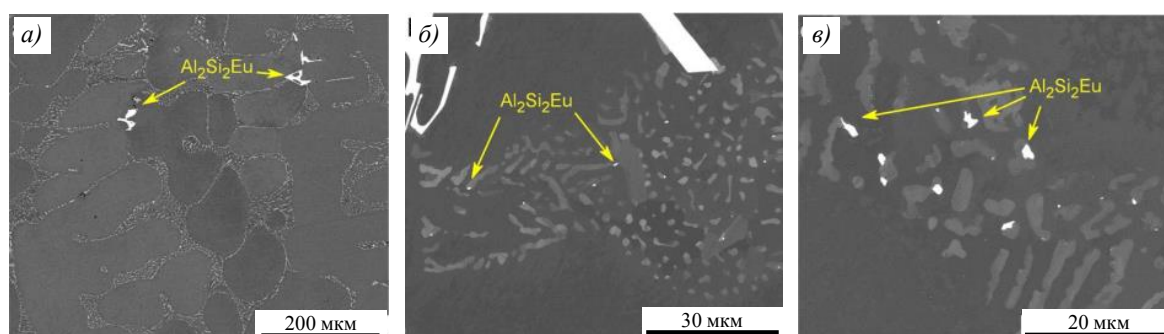


Рис. 3. Микроструктура сплава состава Al–5Si с содержанием 0,05 % Eu, полученная с помощью сканирующей электронной микроскопии: а – модифицированная эвтектическая фаза и доэвтектические крупные интерметаллидные фазы  $Al_2Si_2Eu$ ; б, в – более мелкие интерметаллидные фазы  $Al_2Si_2Eu$ , образовавшиеся в процессе роста эвтектики [34]

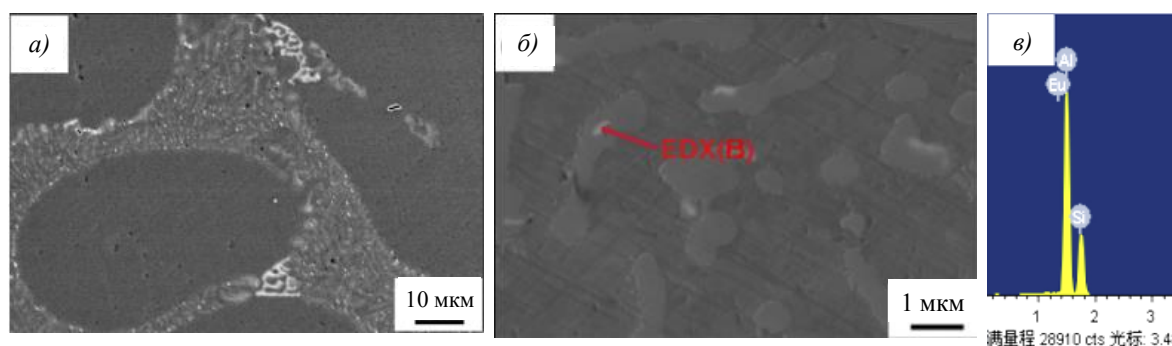


Рис. 4. Микроструктура сплава A356, полученная с помощью сканирующей электронной микроскопии (а), энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа (Energy-dispersive X-ray (EDX)) в точке (б), и состав фазы  $Al_2Si_2Eu$  (в) [35]

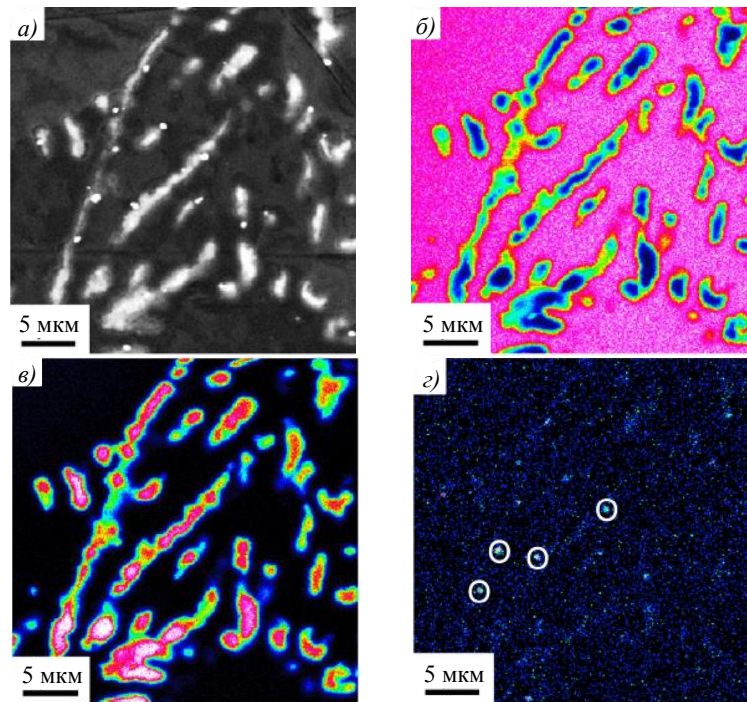


Рис. 5. Изображение, полученное с помощью сканирующей электронной микроскопии (а), и элементное картирование (б – Al; в – Si; г – Eu) исследуемого участка образца из сплава состава Al–5Si, модифицированного 0,05 % Eu [30]

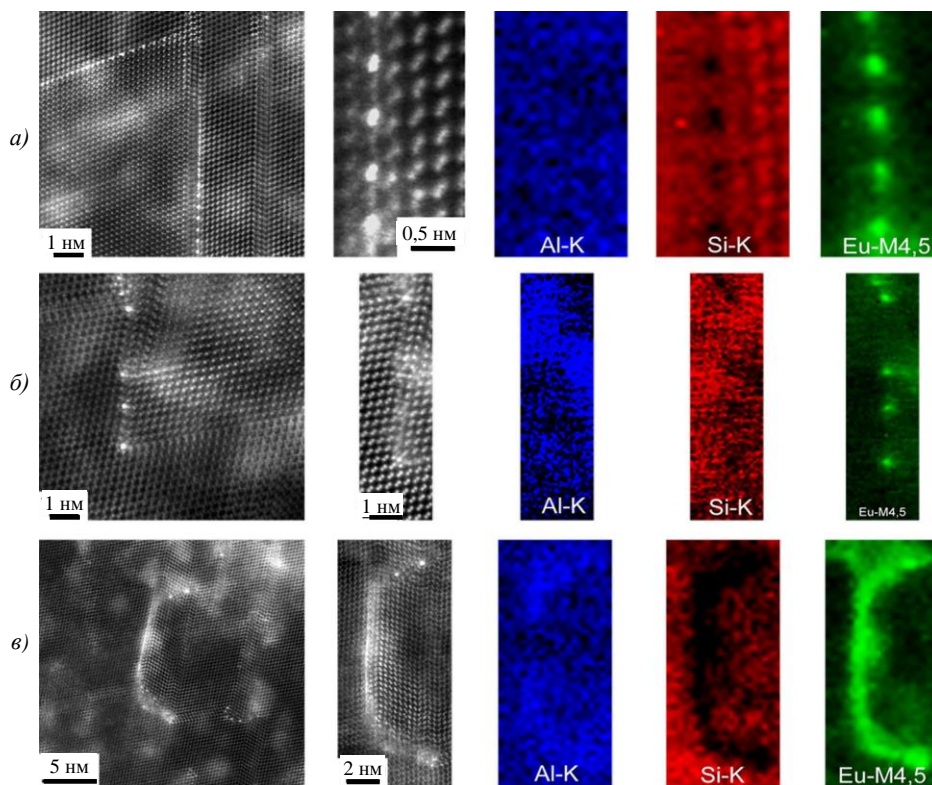


Рис. 6. Изображения высокого разрешения, полученные с помощью высокоугловой кольцевой темнопольной сканирующей просвечивающей электронной микроскопии, и карты спектроскопии потерь энергии электронами для Al, Si и Eu в сплаве состава Al–5Si–0,05Eu. Атомы Eu расположены между двумя атомами Si на границе входа в двойниковую плоскость (а), на пересечении граней Si и двойников (б), перед растущими двойниками Si, образуя непрерывный слой, богатый Eu (в) [36]

Данные исследования не только демонстрируют экспериментальное подтверждение общепринятых механизмов «отравления» ТРЕ и ПТ, но и позволяют понять функции атомов Eu в процессе роста эвтектического Si.

Помимо европия, для модифицирования доэвтектических силуминов и повышения уровня механических свойств сплавов иногда применяют совместное введение элементов, например Eu + Er, Eu + Ta и TiB<sub>2</sub> [37–39].

### Применение европия в заэвтектических силуминах

Исследования авторов работ [40–43] показали, что введение европия положительно влияет на микроструктуру и механические свойства заэвтектических силуминов. Данные по оптимальному количеству европия для достижения эффективного измельчения первичного и эвтектического кремния в заэвтектических силуминах разнятся. Для получения измельченного первичного и эвтектического кремния в заэвтектическом силумине с содержанием кремния 16 % вводят 0,2 (рис. 7) или 0,8 % Eu, а для сплава А390 используют 0,6 % Eu.

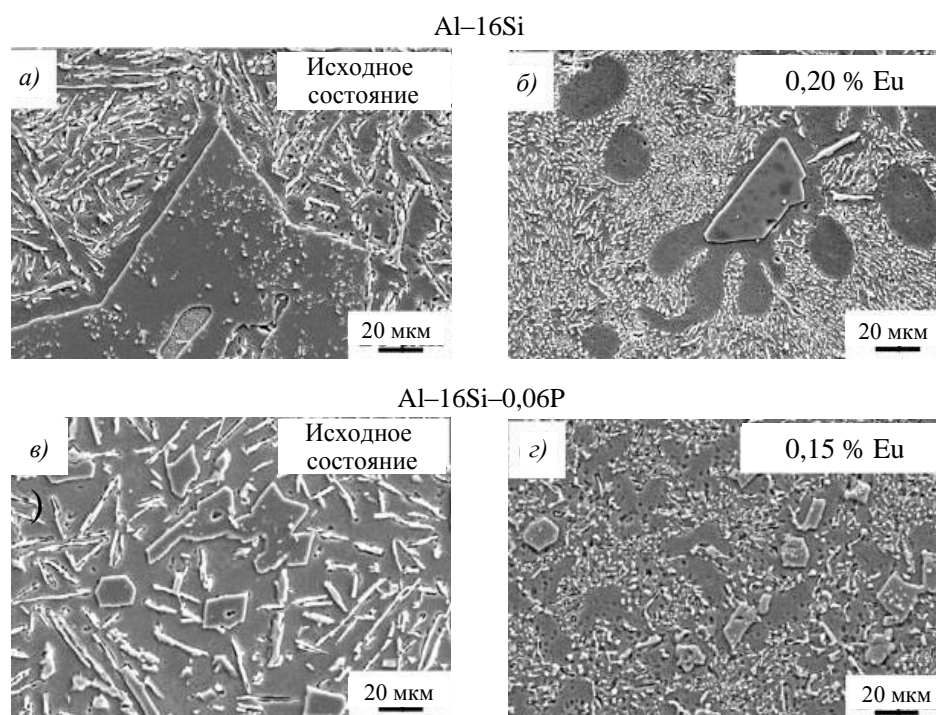


Рис. 7. Микроструктуры заэвтектических силуминов в исходном состоянии (а, в) и модифицированных европием (б, г) [40]

Влияние добавки Eu на измельчение первичного Si и эвтектики в сплавах состава Al-16Si изучено авторами работы [40] с помощью методов структурно-фазового анализа (сканирующая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, электронно-зондовый микроанализ, просвечивающая электронная микроскопия) и термического анализа. Исследование микроструктуры сплава состава Al-16Si, модифицированного 0,2 % Eu, показало, что в структуре присутствует фаза Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>Eu, которая наблюдается как вблизи, так и внутри эвтектического Si. Внутри эвтектического кремния обнаружено множество двойников частиц Si. В то же время внутри первичного кремния не обнаружено достаточного количества Eu, что не способствует явному образованию двойников, как в частицах эвтектического кремния (рис. 8). Следовательно, измельчение

первичного Si в исследованном сплаве не вызвано адсорбционным механизмом ИТ и механизмом «отравления» TPPE, как у эвтектического кремния. Согласно результатам термического анализа, с увеличением содержания Eu с 0,05 до 0,20 % в сплаве состава Al–16Si повышается степень переохлаждения расплава, что способствует одновременному измельчению первичного кремния и модифицированию эвтектического кремния. Разные механизмы модифицирования Eu в первичном и эвтектическом Si могут быть обусловлены различными условиями их роста, что приводит к различным параметрам адсорбции Eu на границе раздела фаз в Si.

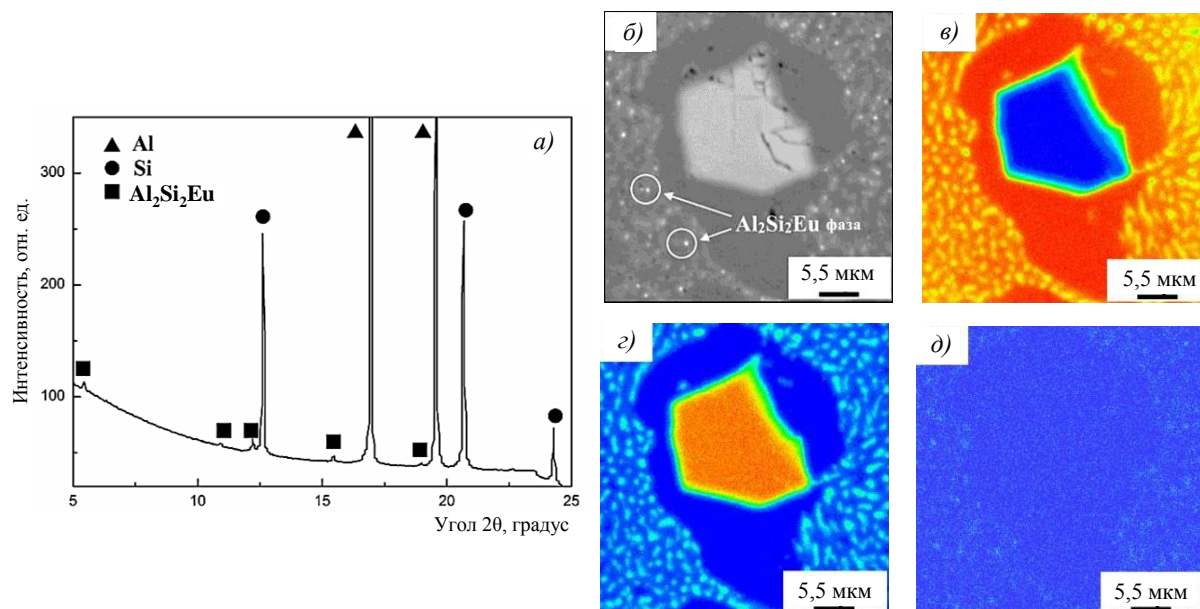


Рис. 8. Рентгенограмма (а), микроструктура, полученная с помощью сканирующей электронной микроскопии (б), и элементное картирование (в – Al, г – Si, д – Eu) исследуемого участка образца из сплава состава Al–16Si, модифицированного 0,2 % Eu [40]

В дальнейшем авторы работы [40] показали, что примесь фосфора в заэвтектическом силумине оказывает значительное влияние на эффективность измельчения РЗЭ первичного Si. Измельчение первичного Si в сплаве состава Al–16Si с добавкой европия и фосфора вызвано двумя различными механизмами, включая механизмы гетерогенного зародышеобразования AlP и переохлаждения расплава Eu. При добавлении 0,15 % Eu предел прочности сплава состава Al–16Si–0,06P повысился с 140,8 до 144,8 МПа, относительное удлинение – с 6,6 до 9,8 %. Однако для модифицирования первичного Si в заэвтектических силуминах с высоким содержанием кремния соотношение Eu:P не должно превышать 3,33. В противном случае эффективность измельчения первичного Si будет снижена из-за взаимного «отравления» Eu и P.

В работе [41] авторы изучили влияние Eu в концентрациях от 0,3 до 0,9 % на кремниевую фазу и механические свойства заэвтектического силумина состава Al–16Si. Введение 0,8 % Eu привело к образованию измельченного сфероидизированного первичного и модифицированного эвтектического кремния (рис. 9). Предел прочности и относительное удлинение увеличились на 16,26 и 166 % соответственно относительно показателей исходного сплава. Измельчение первичного кремния вызвано переохлаждением расплава Eu. Сфероидизацию первичного кремния можно объяснить механизмами «отравления» TPPE и ИТ из-за адсорбции Eu на параллельных двойниках, пересекающихся двойниках и во входящих углах двойников.

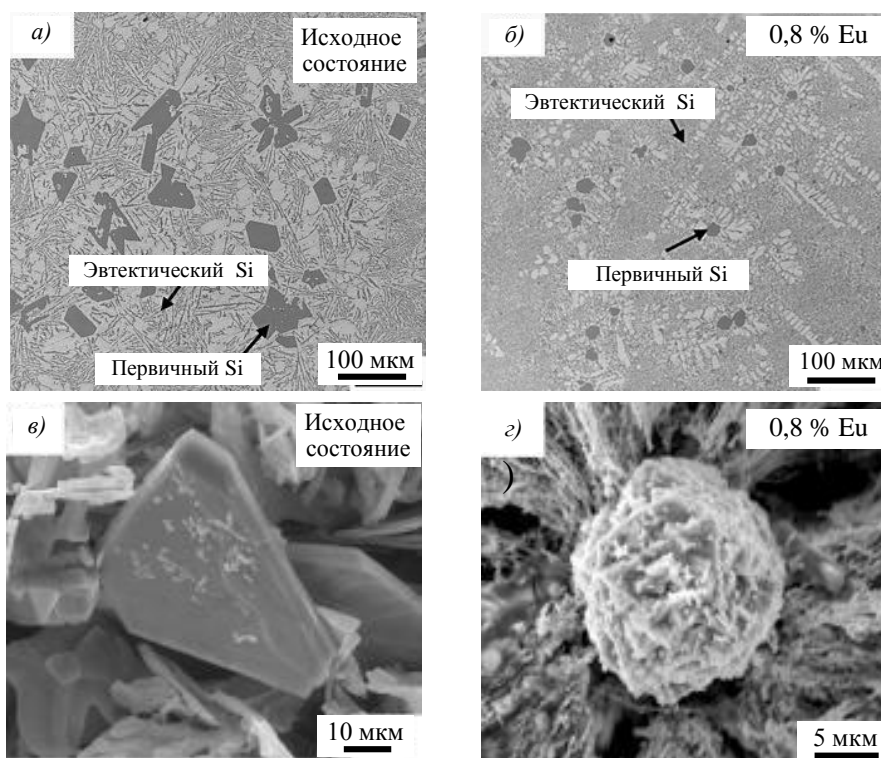


Рис. 9. Микроструктура (а, б) и трехмерная морфология (в, г) первичного кремния в сплаве состава Al–16Si в исходном состоянии и модифицированном 0,8 % Eu [41]

В дальнейших работах [42, 43] авторы исследовали влияние Eu в концентрациях от 0,3 до 0,7 % на микроструктуру и механические свойства сплава А390. Микроструктурный анализ (рис. 10) показал, что добавление 0,6 % Eu приводит как к эффективно-му измельчению и сфероидизации первичного кремния, так и к модифицированию эвтектического кремния в сплаве А390. Кроме того, достигаются измельчение интерметаллидных фаз Al–Si–Fe–Mn и фрагментация фаз Al<sub>2</sub>Cu.

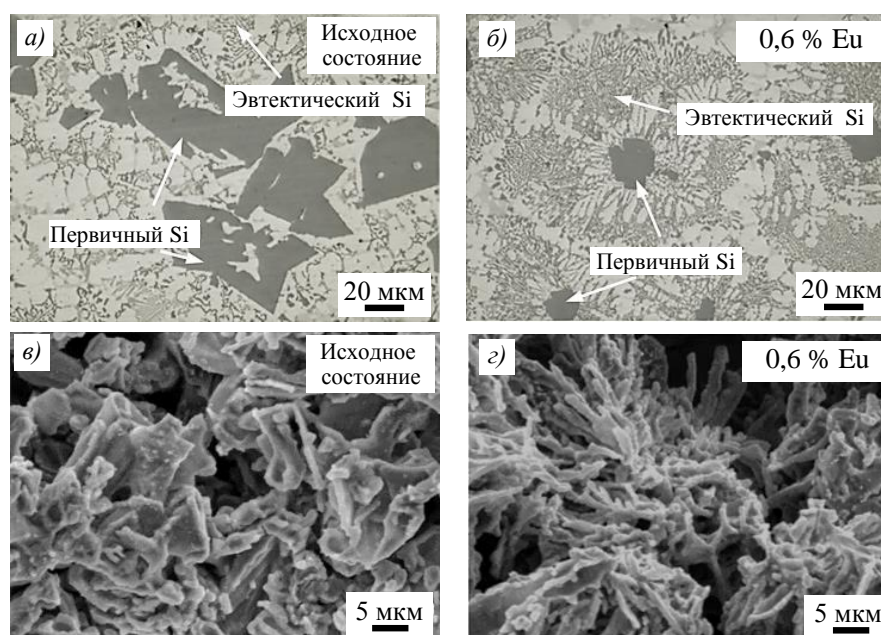


Рис. 10. Микроструктура (а, б) и трехмерная морфология (в, г) эвтектического кремния в сплаве А390 в исходном состоянии и модифицированном 0,6 % Eu [43]

Измельчение микроструктуры в сплаве А390 с содержанием 0,6 % Eu в сочетании с термообработкой Т6 повышает предел прочности с 193,1 до 241,2 МПа и пластичность с 0,73 до 1,47 % относительно показателей исходного сплава. Результаты электронно-зондового микроанализа указывают на предпочтительность осаждения Eu внутри первичного кремния (рис. 11). Результаты дифракции обратно отраженных электронов также показывают, что добавление 0,6 % Eu приводит к значительному увеличению плотности двойникования в первичном кремнии. В дальнейшем авторы провели структурный анализ с помощью методов высокоугловой кольцевой темнопольной сканирующей просвечивающей электронной микроскопии и атомно-зондовой томографии.

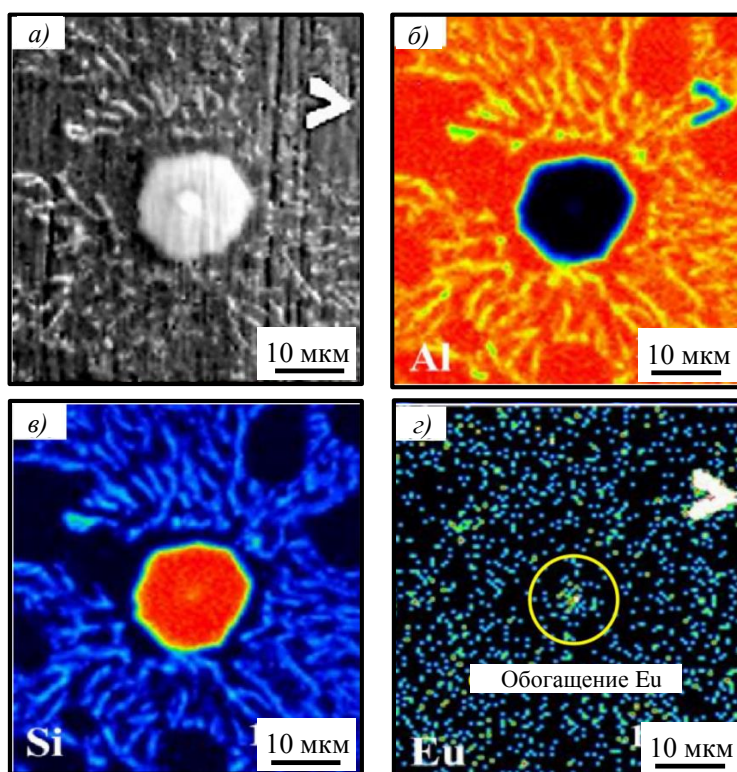


Рис. 11. Микроструктура, полученная с помощью сканирующей электронной микроскопии (а), и элементное картирование (б–д) исследуемого участка образца из сплава А390, модифицированного 0,6 % Eu [42]

Структурный анализ показал, что в сплаве, модифицированном Eu, в шаровидном первичном кремнии выявлены изогнутые границы двойников, границы субзерен и особые границы двойников. Анализ результатов атомно-зондовой томографии показал, что атомы Al и Eu присутствовали в модифицированном первичном кремнии в виде шаровидных, Т-образных, прямых и изогнутых стержнеобразных кластеров (рис. 12).

Согласно полученным данным, авторы работы [43] предложили адсорбционный механизм модифицирования первичного кремния из пяти этапов:

- шаровидные кластеры образуют параллельные и пересекающиеся двойники;
- прямые стержнеобразные кластеры запускают механизм «отравления» TPPE;
- Т-образные кластеры приводят к образованию многослойных пересекающихся двойников;
- изогнутые стержнеобразные кластеры вызывают образование изогнутых двойников;
- изогнутые стержнеобразные кластеры образуют особые двойники.

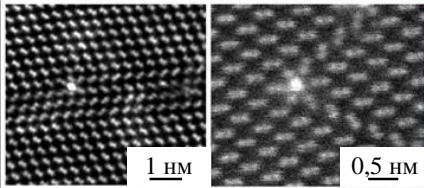
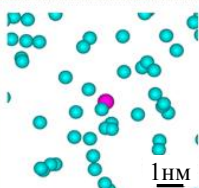
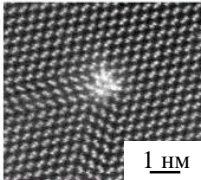
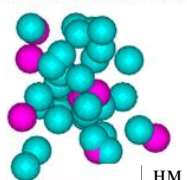
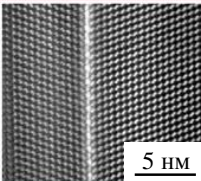
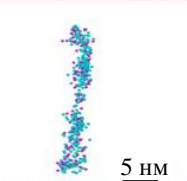
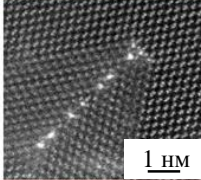
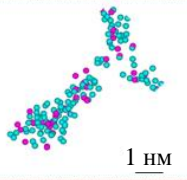
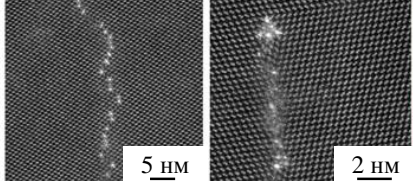

HAADF STEN	АЗТ	Морфология кластеров
		Шаровидная
		Шаровидная
		Прямая стержнеобразная
		T-образная
		Изогнутая стержнеобразная

Рис. 12. Изображения высокого разрешения, полученные с помощью высокоугловой кольцевой темнопольной сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (High Angle Annular Dark Field Scanning Transmission Electron Microscopy (HAADF STEM)), и трехмерное изображение кластеров атомов Al и Eu в сплаве А390, полученное с помощью атомно-зондовой томографии (АЗТ) [43]

Эти механизмы облегчают переход от изначально анизотропного к изотропному росту первичного кремния с добавлением Eu.

### Заключения

Согласно анализу научно-технической литературы, можно сделать вывод, что европий оказывает эффективное воздействие на измельчение структуры и повышает уровень механических свойств как у доэвтектических, так и у заэвтектических силуминов. Установлено, что для эффективного модифицирования эвтектического кремния в доэвтектических силуминах нужно увеличивать концентрацию европия с повышением содержания кремния. Определено, что для эффективного измельчения и сфероидизации первичного кремния в заэвтектических силуминах необходимо также увеличивать концентрацию европия с повышением содержания кремния. Исследования микроструктуры силуминов показали наличие фазы  $Al_2Si_2Eu$ , которая наблюдается как вблизи, так и внутри эвтектического кремния.

Выявлено, что при измельчении структуры и изменении морфологии эвтектического кремния действует несколько адсорбционных механизмов. Во-первых, действуют механизмы «отравления» TPPE и ПТ, которые приводят к образованию большой плотности двойников кремния. Во-вторых, наблюдается переохлаждение расплава, что способствует появлению большего количества зародышей эвтектического кремния.

В то же время при измельчении и сфероидизации первичного кремния действуют более сложные адсорбционные механизмы (как по отдельности, так и совместно). Во-первых, действуют механизмы «отравления» TPPE и ПТ. Во-вторых, происходит многоэтапное образование различных двойников за счет формирования кластеров разной морфологии. В-третьих, наблюдается переохлаждение, что способствует одновременному измельчению первичного кремния и модифицированию эвтектики. Вероятно, существуют и другие факторы (скорость охлаждения, наличие вредных примесей – фосфора), которые имеют значение для модифицирования эвтектического и первичного кремния.

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

#### Список источников

1. Барановская В.Б., Карпов Ю.А., Петрова К.В., Короткова Н.А. Современные направления использования редкоземельных металлов и их соединений в металлургии и производстве оптических материалов // Цветные металлы. 2020. № 11. С. 54–62.
2. Волков А.И., Стулов П.Е., Леонтьев Л.И., Углов В.А. Анализ использования редкоземельных металлов в черной металлургии России и мира // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 6. С. 405–418.
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и высоких технологий будущего // Труды ВИАМ. 2013. № 2. С. 3–13. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2025).
5. Ночовная Н.А., Хорев А.Л., Яковлев А.И. Перспективы легирования титановых сплавов P3Э // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 8. С. 18–23.
6. Скупов А.А., Пантелеев М.Д., Иода Е.Н. Эффективность применения редкоземельных металлов для легирования присадочных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 3 (48). С. 14–19. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-14-19.
7. Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Акинина М.В., Алиханян А.А. Исследование влияния полного цикла термической обработки на структуру и механические свойства поковок из магниевого жаропрочного сплава системы Mg–Zn–Zr–P3Э // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 1 (78). С. 88–98. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-88-98.
8. Мостяев И.В. P3Э – фактор качественного повышения свойств магниевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2015. № 7. С. 8–12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-2-2.
9. Доронин О.Н., Артеменко Н.И., Стехов П.А., Воронов В.А. Нанесение керамических слоев теплозащитных покрытий на основе систем  $Gd_2O_3-ZrO_2-HfO_2$  и  $Sm_2O_3-Y_2O_3-HfO_2$  // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). С. 108–119. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.

10. Суджанская И.В., Лебедева Ю.Е., Ваганова М.Л., Щеголева Н.Е. Влияние легирующих добавок  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  на микроструктуру и механические свойства керамической шпинели  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 2 (79). С. 91–102. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-91-102.
11. Varfolomeev M.S., Shcherbakova G.I. Refractory compositions designed for highly heat-resistant ceramic molds in foundry practice // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. Vol. 59. No. 3. P. 290–295.
12. Соколов А.В., Дейнега Г.И., Кузьмина Н.А. Влияние добавки  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  на температуру спекания и свойства оксидной керамики системы  $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$  // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 64–69. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-64-69.
13. Шляпцева А.Д., Петров И.А., Ряховский А.П., Моисеев В.С. Разработка комплексного модифицирующего флюса для литейных алюминиевых сплавов // *Литейщик России*. 2020. № 4. С. 13–17.
14. Трапезников А.В., Власова К.А., Решетников Ю.В. Применение таблетированных модификаторов для литейных алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 3 (76). С. 14–24. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-14-24.
15. Дуюнова В.А., Трапезников А.В., Леонов А.А., Коренева Е.А. Модифицирование литейных алюминиевых сплавов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2023. № 4 (122). С. 14–26. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-14-26.
16. Demarçay E. Sur un nouvel élément, l'euporium // *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Science*. 1901. Vol. 132. P. 1484–1486.
17. Детков П.Г., Дробот Д.В. История открытия редкоземельных элементов. Самарий, европий и гадолиний // *Цветные металлы*. 2024. № 5. С. 84–90.
18. Энциклопедия технологий 2.0: Редкоземельные элементы / под ред. Д.О. Скобелев. М.; СПб.: Реноме, 2024. 340 с.
19. Edwards J.D., Archer R.S. The new aluminum-silicon alloys – an important process of «modification» and the remarkable improvement in properties it brings about // *Chemical and Metallurgical Engineering*. 1924. Vol. 31. P. 504–508.
20. Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием. М.: Металлургия, 1977. 272 с.
21. Day M.G., Hellowell A. The Microstructure and Crystallography of Aluminium-Silicon Eutectic Alloys // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1968. Vol. 305. No. 1483. P. 473–491.
22. Lu S.Z., Hellowell A. The mechanism of silicon modification in aluminum-silicon alloys: Impurity induced twinning // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1987. Vol. 18. P. 1721–1733.
23. Nogita K., Yasuda H., Yoshiya M. et al. The role of trace element segregation in the eutectic modification of hypoeutectic Al–Si alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2010. Vol. 489. Is. 2. P. 415–420.
24. Петров И.А., Шляпцева А.Д. Влияние РЗЭ на процесс кристаллизации силумина эвтектического типа // *Металлы*. 2022. № 2. С. 19–27.
25. Верятин У.Д., Маширев В.П., Рябцев Н.Г. и др. Термодинамические свойства неорганических веществ: справочник / под общ. ред. А.П. Зефирова. М.: Атомиздат, 1965. 460 с.
26. Gursoy O., Timelli G. Lanthanides: a focused review of eutectic modification in hypoeutectic Al–Si alloys // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. Is. 4. P. 8652–8666.
27. CRC Handbook of Chemistry and Physics / eds. W.M. Haynes, D.R. Lide. 95th ed. CRC Press: Boca Raton, 2014. 2704 p.
28. Smithells Metals Reference Book / eds. W.F. Gale, T.C. Totemeier. 8th ed. Oxford: Totemeier Imprint, 2003. 2080 p.

29. Петров И.А., Телицына О.В. Исследование влияния некоторых редкоземельных элементов на свойства силумина эвтектического типа // *Технология легких сплавов*. 2021. № 1. С. 54–59.
30. Li J.H., Wang X.D., Ludwig T.H. et al. Modification of eutectic Si in Al–Si alloys with Eu addition // *Acta Materialia*. 2015. Vol. 84. P. 153–163.
31. Mao F., Qiao Y., Zhang P. et al. Modification Mechanism of Rare Earth Eu on Eutectic Si in Hypoeutectic Al–Si Alloy // *International Journal of Metalcasting*. 2022. Vol. 16. P. 634–645.
32. Nogita K., McDonald S.D., Dahle A.K. Eutectic Modification of Al–Si Alloys with Rare Earth Metals // *Materials Transactions*. 2004. Vol. 45. Is. 2. P. 323–326.
33. Li J.H., Ludwig T.H., Oberdorfer B., Schumacher P. Solidification behaviour of Al–Si based alloys with controlled additions of Eu and P // *International Journal of Cast Metals Research*. 2018. Vol. 31 (6). P. 319–331. DOI: 10.1080/13640461.2018.1480891.
34. Barrirero J., Pauly C., Engstler M. et al. Eutectic modification by ternary compound cluster formation in Al–Si alloys // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. P. 5506. DOI: 10.1038/s41598-019-41919-2.
35. Mao F., Yan G., Xuan Z. et al. Effect of Eu addition on the microstructures and mechanical properties of A356 aluminum alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Vol. 650. P. 896–906. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.06.266.
36. Li J., Fredrik H., Manfred W. et al. The roles of Eu during the growth of eutectic Si in Al–Si alloys // *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5 (1). P. 13802. DOI: 10.1038/srep13802.
37. Spacil I., Gehringer D., Holec D. et al. Elucidating effects of Eu and P on solidification and precipitation of Al–7Si–0,3Mg based alloys refined by Ta and TiB<sub>2</sub> // *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. Vol. 978. P. 173343. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.173343.
38. Sahin H., Dispinar D. Effect of Rare Earth Elements Erbium and Europium Addition on Microstructure and Mechanical Properties of A356 (Al–7Si–0,3Mg) Alloy // *International Journal of Metalcasting*. 2023. Vol. 17. P. 2612–2621. DOI: 10.1007/s40962-023-01060-3.
39. Ou C., Xiao C., Tang S. et al. Effect of the co-addition of Eu and Er on the microstructure and mechanical properties of Al–9,5Si–2Cu–0,6Mg alloy // *Materials Letters*. 2025. Vol. 382. P. 137848. DOI: 10.1016/j.matlet.2024.137848.
40. Mao F., Wei S., Ou L. et al. Different Influences of Rare Earth Eu Addition on Primary Si Refinement in Hypereutectic Al–Si Alloys with Varied Purity // *Materials*. 2019. Vol. 12 (21). P. 3505. DOI: 10.3390/ma12213505.
41. Guo J., Mao F., Zhang G. et al. Dual Modification of Hypereutectic Al–Si Alloy and Spheroidization Mechanism of Primary Silicon with Eu Addition // *International Journal of Metalcasting*. 2024. Vol. 18. P. 2562–2578. DOI: 10.1007/s40962-023-01198-0.
42. Mao F., Zhang L., Guo J. et al. The Effect of Eu and T6 heat treatment on Microstructure of A390 Alloys // *International Journal of Metalcasting*. 2025. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40962-025-01649-w> (дата обращения: 15.08.2025). DOI: 10.1007/s40962-025-01649-w.
43. Mao F., Guo J.L., Liu S.H. et al. Spheroidization mechanism of primary silicon in hypereutectic Al–Si alloys with Eu addition // *Rare Metals*. 2025. Vol. 44. P. 7940–7955. DOI: 10.1007/s12598-025-03504-7.

### References

1. Baranovskaya V.B., Karpov Yu.A., Petrova K.V., Korotkova N.A. Modern trends in the use of rare earth metals and their compounds in metallurgy and the production of optical materials. *Tsvetnye metally*, 2020, no. 11, pp. 54–62.
2. Volkov A.I., Stulov P.E., Leontyev L.I., Uglov V.A. Analysis of the use of rare earth metals in the ferrous metallurgy of Russia and the world. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 2020, vol. 63, no. 6, pp. 405–418.
3. 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.

4. 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, pp. 3–13. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 15, 2025).
5. Nochovnaya N.A., Khorev A.L., Yakovlev A.I. Prospects for alloying titanium alloys with rare earth elements. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2013, no. 8, pp. 18–23.
6. Skupov A.A., Pantelev M.D., Ioda E.N., Movenko D.A. The efficiency of rare earth metals for filler materials alloying. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 3 (48), pp. 14–19. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-14-19.
7. Volkova E.F., Mostyaev I.V., Akinina M.V., Alikhanyan A.A. Impact study of the full cycle of the heat treatment on the structure and mechanical properties of forgings made of heat-resistant magnesium alloy of the Mg–Zn–Zr–REE system. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 1 (78), pp. 88–98. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-88-98.
8. Mostyaev I.V. REE – quality factor increase properties of magnesium alloy (review). *Trudy VIAM*, 2015, no. 7, pp. 8–12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-2-2.
9. Doronin O.N., Artemenko N.I., Stekhov P.A., Voronov V.A. Deposition of ceramic layers of heat protection coatings based on the system  $Gd_2O_3-ZrO_2-HfO_2$  and  $Sm_2O_3-Y_2O_3-HfO_2$ . *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), pp. 108–119. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.
10. Sudzhanskaya I.V., Lebedeva Yu.E., Vaganova M.L., Shchegoleva N.E. Effect of co-doped of  $CeO_2, Y_2O_3$  on microstructure and mechanical properties of ceramic spinel  $MgAl_2O_4$ . *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 2 (79), pp. 91–102. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-91-102.
11. Varfolomeev M.S., Shcherbakova G.I. Refractory compositions designed for highly heat-resistant ceramic molds in foundry practice. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2018, vol. 59, no. 3, pp. 290–295.
12. Sokolov A.V., Deynaga G.I., Kuzmina N.A. Influence of  $Sc_2O_3$  additive on sintering temperature and properties of  $ZrO_2-Y_2O_3$  system oxide ceramics. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 64–69. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-64-69.
13. Shlyaptseva A.D., Petrov I.A., Ryakhovsky A.P., Moiseev V.S. Development of a complex modifying flux for cast aluminum alloys. *Liteyshchik Rossii*, 2020, no. 4, pp. 13–17.
14. Trapeznikov A.V., Vlasova K.A., Reshetnikov Yu.V. Tableted modifiers for cast aluminum alloys. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 3 (76), pp. 14–24. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-14-24.
15. Duyunova V.A., Trapeznikov A.V., Leonov A.A., Koreneva E.A. Modifying of cast aluminum alloys (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 4 (122), pp. 14–26. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-14-26.
16. Demarçay E. Sur un nouvel élément, l'euporium. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Science*, 1901, vol. 132, pp. 1484–1486.
17. Detkov P.G., Drobot D.V. History of the discovery of rare earth elements. Samarium, europium and gadolinium. *Tsvetnye metally*, 2024, no. 5, pp. 84–90.
18. *Encyclopedia of Technologies 2.0: Rare Earth Elements*. Ed. D.O. Skobelev. Moscow; St. Petersburg: Renome, 2024, 340 p.
19. Edwards J.D., Archer R.S. The new aluminum-silicon alloys – an important process of «modification» and the remarkable improvement in properties it brings about. *Chemical and Metallurgical Engineering*, 1924, vol. 31, pp. 504–508.
20. Stroganov G.B., Rotenberg V.A., Gershman G.B. *Aluminum-silicon alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1977, 272 p.

21. Day M.G., Hellawell A. The Microstructure and Crystallography of Aluminium-Silicon Eutectic Alloys. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1968, vol. 305, no. 1483, pp. 473–491.
22. Lu S.Z., Hellawell A. The mechanism of silicon modification in aluminum-silicon alloys: Impurity induced twinning. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1987, vol. 18, pp. 1721–1733.
23. Nogita K., Yasuda H., Yoshiya M. et al. The role of trace element segregation in the eutectic modification of hypoeutectic Al–Si alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, vol. 489, is. 2, pp. 415–420.
24. Petrov I.A., Shlyaptseva A.D. Effect of REE on the crystallization process of eutectic silumin. *Metally*, 2022, no. 2, pp. 19–27.
25. Veryatin U.D., Mashirev V.P., Ryabtsev N.G. et al. *Thermodynamic properties of inorganic substances: a handbook*. Ed. A.P. Zefirov. Moscow: Atomizdat, 1965, 460 p.
26. Gursoy O., Timelli G. Lanthanides: a focused review of eutectic modification in hypoeutectic Al–Si alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, is. 4, pp. 8652–8666.
27. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Eds. W.M. Haynes, D.R. Lide. 95th ed. CRC Press: Boca Raton, 2014, 2704 p.
28. *Smithells Metals Reference Book*. Eds. W.F. Gale, T.C. Totemeier. 8th ed. Oxford: Totemeier Imprint, 2003, 2080 p.
29. Petrov I.A., Telitsyna O.V. Study of the influence of some rare earth elements on the properties of eutectic silumin. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2021, no. 1, pp. 54–59.
30. Li J.H., Wang X.D., Ludwig T.H. et al. Modification of eutectic Si in Al–Si alloys with Eu addition. *Acta Materialia*, 2015, vol. 84, pp. 153–163.
31. Mao F., Qiao Y., Zhang P. et al. Modification Mechanism of Rare Earth Eu on Eutectic Si in Hypoeutectic Al–Si Alloy. *International Journal of Metalcasting*, 2022, vol. 16, pp. 634–645.
32. Nogita K., McDonald S.D., Dahle A.K. Eutectic Modification of Al–Si Alloys with Rare Earth Metals. *Materials Transactions*, 2004, vol. 45, is. 2, pp. 323–326.
33. Li J.H., Ludwig T.H., Oberdorfer B., Schumacher P. Solidification behaviour of Al–Si based alloys with controlled additions of Eu and P. *International Journal of Cast Metals Research*, 2018, vol. 31 (6), pp. 319–331. DOI: 10.1080/13640461.2018.1480891.
34. Barrirero J., Pauly C., Engstler M. et al. Eutectic modification by ternary compound cluster formation in Al–Si alloys. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, p. 5506. DOI: 10.1038/s41598-019-41919-2.
35. Mao F., Yan G., Xuan Z. et al. Effect of Eu addition on the microstructures and mechanical properties of A356 aluminum alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 650, pp. 896–906. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.06.266.
36. Li J., Fredrik H., Manfred W. et al. The roles of Eu during the growth of eutectic Si in Al–Si alloys. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5 (1), p. 13802. DOI: 10.1038/srep13802.
37. Spacil I., Gehringer D., Holec D. et al. Elucidating effects of Eu and P on solidification and precipitation of Al–7Si–0,3Mg based alloys refined by Ta and TiB<sub>2</sub>. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, vol. 978, p. 173343. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.173343.
38. Sahin H., Dispinar D. Effect of Rare Earth Elements Erbium and Europium Addition on Microstructure and Mechanical Properties of A356 (Al–7Si–0,3Mg) Alloy. *International Journal of Metalcasting*, 2023, vol. 17, pp. 2612–2621. DOI: 10.1007/s40962-023-01060-3.
39. Ou C., Xiao C., Tang S. et al. Effect of the co-addition of Eu and Er on the microstructure and mechanical properties of Al–9,5Si–2Cu–0,6Mg alloy. *Materials Letters*, 2025, vol. 382, p. 137848. DOI: 10.1016/j.matlet.2024.137848.
40. Mao F., Wei S., Ou L. et al. Different Influences of Rare Earth Eu Addition on Primary Si Refinement in Hypereutectic Al–Si Alloys with Varied Purity. *Materials*, 2019, vol. 12 (21), p. 3505. DOI: 10.3390/ma12213505.
41. Guo J., Mao F., Zhang G. et al. Dual Modification of Hypereutectic Al–Si Alloy and Spheroidization Mechanism of Primary Silicon with Eu Addition. *International Journal of Metalcasting*, 2024, vol. 18, pp. 2562–2578. DOI: 10.1007/s40962-023-01198-0.

42. Mao F., Zhang L., Guo J. et al. The Effect of Eu and T6 heat treatment on Microstructure of A390 Alloys. *International Journal of Metalcasting*, 2025. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40962-025-01649-w> (accessed: August 15, 2025). DOI: 10.1007/s40962-025-01649-w.
43. Mao F., Guo J.L., Liu S.H. et al. Spheroidization mechanism of primary silicon in hypereutectic Al–Si alloys with Eu addition. *Rare Metals*, 2025, vol. 44, pp. 7940–7955. DOI: 10.1007/s12598-025-03504-7.

*Информация об авторах*

**Петров Игорь Алексеевич**, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

**Решетников Юрий Владиславович**, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Воробьева Елизавета Ильинична**, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

*Information about the authors*

**Igor A. Petrov**, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

**Yuri V. Reshetnikov**, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Elizaveta I. Vorobyova**, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 15.09.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 26.09.2025.

The article was submitted 15.09.2025; approved and accepted for publication after reviewing 26.09.2025.