

УДК 669.017.16

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-1-56-65>

Научная статья

Research article



Влияние гафния на литую микроструктуру в сплаве 1570

И.А. Зорин¹, Е.В. Арышенский¹, А.М. Дриц¹, С.В. Коновалов¹, В.С. Комаров²

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

119049, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 4

✉ Евгений Владимирович Арышенский (ar-evgenii@yandex.ru)

Аннотация: Изучено влияние гафния на структуру и свойства сплава 1570. В стальной кокиль были отлиты слитки из сплава 1570, в том числе с добавками гафния (0,1, 0,2 и 0,5 %). Для определения размеров зеренной структуры в полученных слитках применялся оптический микроскоп «Ахиоверт-40 МАТ», химический анализ интерметаллидных частиц проводился с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL 6390A. Кроме того, для сплавов 1570 и 1570–0,5Hf на просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100 изучалось наличие наночастиц, имеющих структуру L_{12} . Исследования показали, что добавки гафния позволяют добиться существенной модификации литой структуры. Например, при введении в исходный сплав 0,5 % Hf (от общей массы) достигнуто уменьшение среднего размера зерна в 2 раза. Согласно данным сканирующей микроскопии, гафний частично растворяется в частицах, содержащих также скандий и цирконий. Добавка гафния увеличивает количество крупных частиц, образующихся при кристаллизации. Просвечивающая микроскопия показала наличие в сплаве 1570 наночастиц, когерентных алюминиевой матрице и имеющих сверхструктуру L_{12} , которые с большой долей вероятности образовались в ходе прерывистого распада при остывании слитков. При добавке 0,5 % Hf наночастиц, имеющих сверхструктуру L_{12} , не обнаружено. Для объяснения этого факта необходимы исследования поверхности ликвидуса системы Al–Hf–Sc, а также изучение влияния гафния на коэффициент диффузии скандия в алюминии.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, легирование малыми добавками переходных элементов, микроструктура, интерметаллиды

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01506, <https://rscf.ru/project/22-29-01506/>

Для цитирования: Зорин И.А., Арышенский Е.В., Дриц А.М., Коновалов С.В., Комаров В.С. Влияние гафния на литую микроструктуру в сплаве 1570. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023; 29 (1): 56–65. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-1-56-65>

Effect of hafnium on cast microstructure in alloy 1570

I.A. Zorin¹, E.V. Aryshensky¹, A.M. Drits¹, S.V. Konovalov¹, V.S. Komarov²

¹ Samara National Research University

34 Moskovskoe highway, Samara, 443086, Russia

² National University of Science and Technology “MISIS”

4 Leninkiy pr., Moscow, 119049, Russia

✉ Evgenii V. Aryshenskii (ar-evgenii@yandex.ru)

Abstract: The issue is devoted to the study of the influence of hafnium on the structure and properties of alloy 1570. Ingots from alloy 1570 were cast into the steel coquille, including those with additives of hafnium 0.1, 0.2 and 0.5 %. To determine the size of the grain structure in the obtained ingots, an Axiovert-40 MAT optical microscope was used, chemical analysis of intermetallic particles was carried out using

JEOL 6390A SEM. In addition, for the alloy 1570 and 1570–0.5Hf, the presence of nanoparticles with the L_{12} structure was studied using transmission electron microscope JEM-2100. Studies showed that hafnium additives make it possible to achieve a significant modification of the cast structure. For example, when introducing hafnium into the initial alloy in an amount of 0.5 % of the total weight, it was possible to achieve a reduction in the average grain size by 2 times. Scanning microscopy data showed that hafnium partially dissolves in particles containing scandium and zirconium as well. The addition of hafnium increases the number of large particles formed during crystallization. Transmission microscopy showed the presence of coherent aluminum matrix nanoparticles in alloy 1570 and having a superstructure of L_{12} , which were most likely formed during intermittent decay during ingot cooling. When 0.5 % Hf was added, no nanoparticles with the L_{12} superstructure were detected. To explain the latter fact, it is necessary to study the surface of the liquidus of the Al–Hf–Sc system, as well as to study the effect of hafnium on the diffusion coefficient of scandium in aluminum.

Keywords: aluminum alloys, alloying with small additives of transition elements, microstructure, intermetallics

Funding: This study was supported by Russian Science Foundation Grant No. 22-29-01506, <https://rscf.ru/project/22-29-01506/>

For citation: Zorin I.A., Aryshensky E.V., Drits A.M., Konovalov S.V., Komarov V.S. Effect of hafnium on cast microstructure in alloy 1570. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023; 29 (1): 56–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-1-56-65>

Введение

Алюминиевые сплавы распространены и во многом незаменимы в авиационной и ракетно-космической технике, поэтому проводится много исследований по разработке новых и совершенствованию существующих Al-сплавов [1–6].

Одним из путей повышения эксплуатационных свойств алюминиевых сплавов является введение малых добавок скандия, являющегося самым сильным модификатором литой структуры алюминия. Кроме того, добавки Sc при правильных режимах литья и термообработки приводят к образованию упрочняющих наночастиц Al_3Sc [7].

Как правило, скандий используют вместе с цирконием, позволяющим сократить количество Sc, необходимого для существенного измельчения литой структуры. Кроме того, цирконий частично заменяет скандий в частицах Al_3Sc , образуя вокруг них оболочку [8], которая замедляет коагуляцию данных частиц и увеличивает их термостабильность благодаря тому, что коэффициент диффузии циркония более низкий, чем у скандия [9].

Наиболее популярными для Sc–Zr-легирования являются алюминиевые сплавы с высоким содержанием магния, поскольку он вызывает значительное твердорастворное упрочнение [10]. Один из наиболее востребованных сплавов этой группы — сплав 1570 [6].

Дальнейшее повышение свойств сплава 1570 возможно за счет введения малых добавок гафния, который, во-первых, также является сильным модификатором литой структуры [11], а во-вторых, частично, как и цирконий, заменяет скандий в частицах Al_3Sc , образуя повышающую их термостабильность оболочку [9]. Однако для решения вопроса о целесообразности использования гафния в данном сплаве необходимо исследовать его влияние на микроструктуру сплава как в литом

состоянии, так и после термической обработки. Ранее данная проблематика нигде не рассматривалась.

Цель данного исследования — изучение влияния гафния на микроструктуру сплава 1570 в литом состоянии.

Методика

Образцы из модельных сплавов изготавливали в лабораторных условиях в индукционной печи УИ-25П с входной частотой 50–60 Гц и выходной частотой 1–20 кГц. Слитки размером 20×40×400 мм отливали в водоохлаждаемый стальной кокиль при температуре расплава 720–740 °С. В таблице представлен химический состав всех исследуемых сплавов.

В качестве шихты для сплава использовали следующие материалы: алюминий (чистота 99,8 %), магний (99,9 %), мастер-сплав Al–2%Sc, силумин Al–12%Si, мастер-сплав Al–5%Zr.

Зеренную структуру образцов изучали на оптическом микроскопе «Axiovert-40 MAT» (Carl Zeiss, Германия). Для каждого образца методом секущих (ГОСТ 21073.2) измеряли средний размер зерна.

Интерметаллидные частицы исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа SEM JEOL 6390A (Япония). Изучение химического состава структурных составляющих осуществляли методом энергодисперсионной спектроскопии с применением детектора X-Max 80T (Oxford Instruments, Великобритания) в диапазоне энергий 0–10 кэВ (энергетическое разрешение детектора составляет 122 эВ). Микроструктуру для сплавов 1570 и 1570–0,5Hf дополнительно исследовали на просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100 (JEOL, Япония) при напряжении 200 кВ.

Химический состав исследуемых сплавов, %

Investigated alloys chemical composition, %

| Сплав | Al | Si | Fe | Mn | Mg | Ti | Zr | Sc | Hf |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 1570 | Осн. | 0,17 | 0,27 | 0,44 | 6,16 | 0,03 | 0,05 | 0,22 | – |
| 1570–0,1Hf | Осн. | 0,17 | 0,27 | 0,44 | 6,16 | 0,03 | 0,05 | 0,22 | 0,1 |
| 1570–0,2Hf | Осн. | 0,17 | 0,27 | 0,44 | 6,16 | 0,03 | 0,05 | 0,22 | 0,2 |
| 1570–0,5Hf | Осн. | 0,17 | 0,27 | 0,44 | 6,16 | 0,03 | 0,05 | 0,22 | 0,5 |

Элементный анализ выполнен с помощью рентгеновского энергодисперсионного спектрометра INCA x-sight (Oxford Instruments, Великобритания).

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлена микроструктура сплава 1570 с совместным скандиево-циркониевым легированием. В данном сплаве наблюдается равноосное зерно со средним размером 44 мкм. Это в

6 раз меньше, чем, например, в высокомагниево-сплаве 5182 без добавок скандия и циркония [12]. В целом, полученные данные согласуются с приведенными в работе [13], где при совместной добавке в сплав 1970 скандия (0,25 %) и циркония (0,15 %) зерно измельчается в 8,5 раз.

При увеличении содержания гафния постепенно уменьшается размер зерна. При добавлении 0,1 % Hf средний размер зеренной структуры снижается до 34 мкм. Дальнейшее повышение содер-

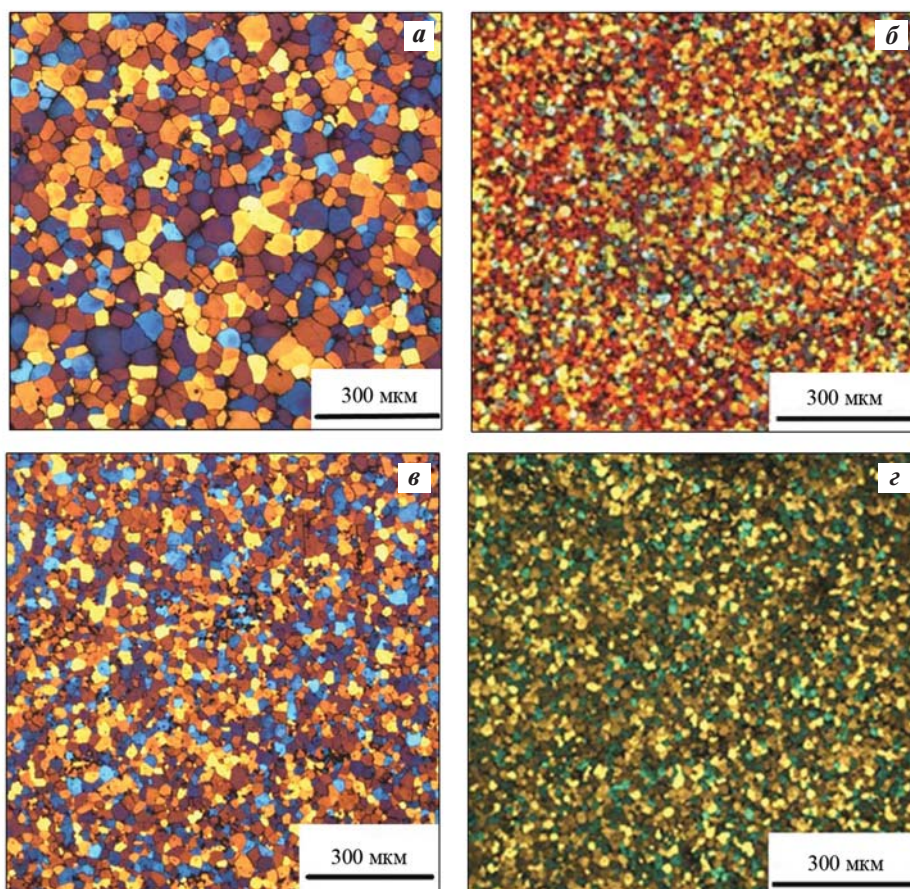


Рис. 1. Микроструктура литого сплава
a – 1570; *б* – 1570–0,1Hf; *в* – 1570–0,2Hf; *г* – 1570–0,5Hf

Fig. 1. Cast alloy microstructure

a – 1570; *б* – 1570–0.1Hf; *в* – 1570–0.2Hf; *г* – 1570–0.5Hf

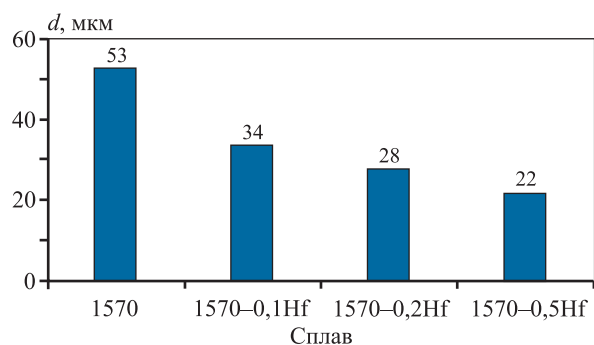


Рис. 2. Средний размер зерна литых образцов

Fig. 2. The cast samples average grain size

жания гафния до 0,2 и 0,5 % модифицирует зеренную структуры до 28 и 22 мкм соответственно (см. рис. 2).

Для того чтобы объяснить влияние гафния на измельчение литой зеренной структуры, необходимо отметить, что, согласно диаграмме состояния Al–Hf, первичные интерметаллиды Al_3Hf в жидкой фазе формируются при содержании 0,43 % Hf [14]. Однако из-за неравновесных условий кристаллизации первичные интерметаллиды могут появляться уже при концентрации 0,2 % Hf [11]. Кроме того, гафний способствует измельчению зеренной структуры благодаря снижению поверхностного натяжения между твердой и жидкой фазами, облегчая тем самым формирование зародышей в последней [11]. Таким образом, измельчение зерна при добавлении 0,1 и 0,2 % гафния можно объяснить уменьшением поверхностного натяжения. Дальнейшее сокращение размера зерна при добавлении 0,5 % Hf обуславливается появлением первичных частиц Al_3Hf .

Может существовать и другое объяснение модифицирующей способности гафния при его введении в сплав 1570. Гафний, возможно, оказывает схожее с цирконием влияние на скандий. Некоторые исследователи считают, что цирконий снижает количество скандия, необходимое для достижения последним эвтектической концентрации и начала формирования первичных частиц Al_3Sc . Этим, с их точки зрения, и объясняется эффективность совместного скандиево-циркониевого легирования на модификацию литой структуры [15]. Авторами [16] показано, что совместное легирование цирконием и скандием, даже при незначительном содержании этих элементов, способствует появлению первичных интерметаллидов в алюминиевых сплавах. Согласно рассчитанной в работе [16] поверхности ликвидуса системы Al–

Sc–Zr, даже при небольших концентрациях скандия и циркония жидкая фаза начинает кристаллизоваться в $Al_{17}Sc_{16}Zr_9$. При содержании скандия и циркония, характерном для сплава 1570, поверхность ликвидуса предсказывает кристаллизацию жидкости в первичную интерметаллидную фазу Al_2Sc , которая хорошо растворяет в себе Zr. По всей видимости, появление первичной фазы Al_2Sc способствует модификации зеренной структуры. Схожим эффектом может обладать и гафний. Однако в настоящее время отсутствуют данные о поверхности ликвидуса Al–Hf–Sc, что не позволяет подтвердить эту гипотезу.

Необходимо отметить, что EDS-анализ позволяет лишь с некоторой точностью определить химический состав интерметаллидных частиц, однако, в отличие от рентгенофазового анализа, он не может однозначно их идентифицировать. Можно лишь соотнести их химический состав с составом описанных в литературе частиц, что и было сделано в настоящем исследовании.

В сплаве 1570, как и в сплаве 1570–0,5Hf, были обнаружены частицы, содержащие алюминий, кремний и железо. По своему химическому составу данные интерметаллиды (2 и 7 на рис. 3, а, б) близки к $Al_3(Fe, Si)$ (рис. 3, в, г) [17]. Эти и близкие к ним интерметаллидные частицы часто встречаются в алюминиевых сплавах, поскольку Fe и Si всегда присутствуют в них в качестве неизбежных примесей.

Вторым типом частиц, обнаруженных в ходе исследования, являются интерметаллиды, содержащие алюминий и магний (4 на рис. 3, б, г). В некоторых интерметаллидах кроме вышеперечисленных элементов присутствует еще и кремний (3 и б на рис. 3). Второй тип частиц близок по своему химическому составу к фазе β (Al_3Mg_2), являющейся весьма распространенной в высокомагние-вых алюминиевых сплавах [10, 18, 19], а третий — к фазе Mg_2Si , также часто встречающейся в сплавах данного типа [18, 19]. Присутствие алюминия в частицах, близких к Mg_2Si , объясняется тем, что при исследовании с помощью EDS-анализа неизбежно захватывается и часть твердого раствора.

Еще одним типом частиц, выявленных в ходе исследований, являются частицы, близкие по химическому составу и морфологии (ромбовидная) к первичным частицам Al_3Sc (1 и 5 на рис. 3) [20, 21]. Однако кроме скандия в них наблюдаются: в сплаве 1570 — цирконий, в сплаве 1570–0,5Hf — цирконий и гафний. Необходимо отметить, что цирконий и гафний растворяются в фазе Al_3Sc на

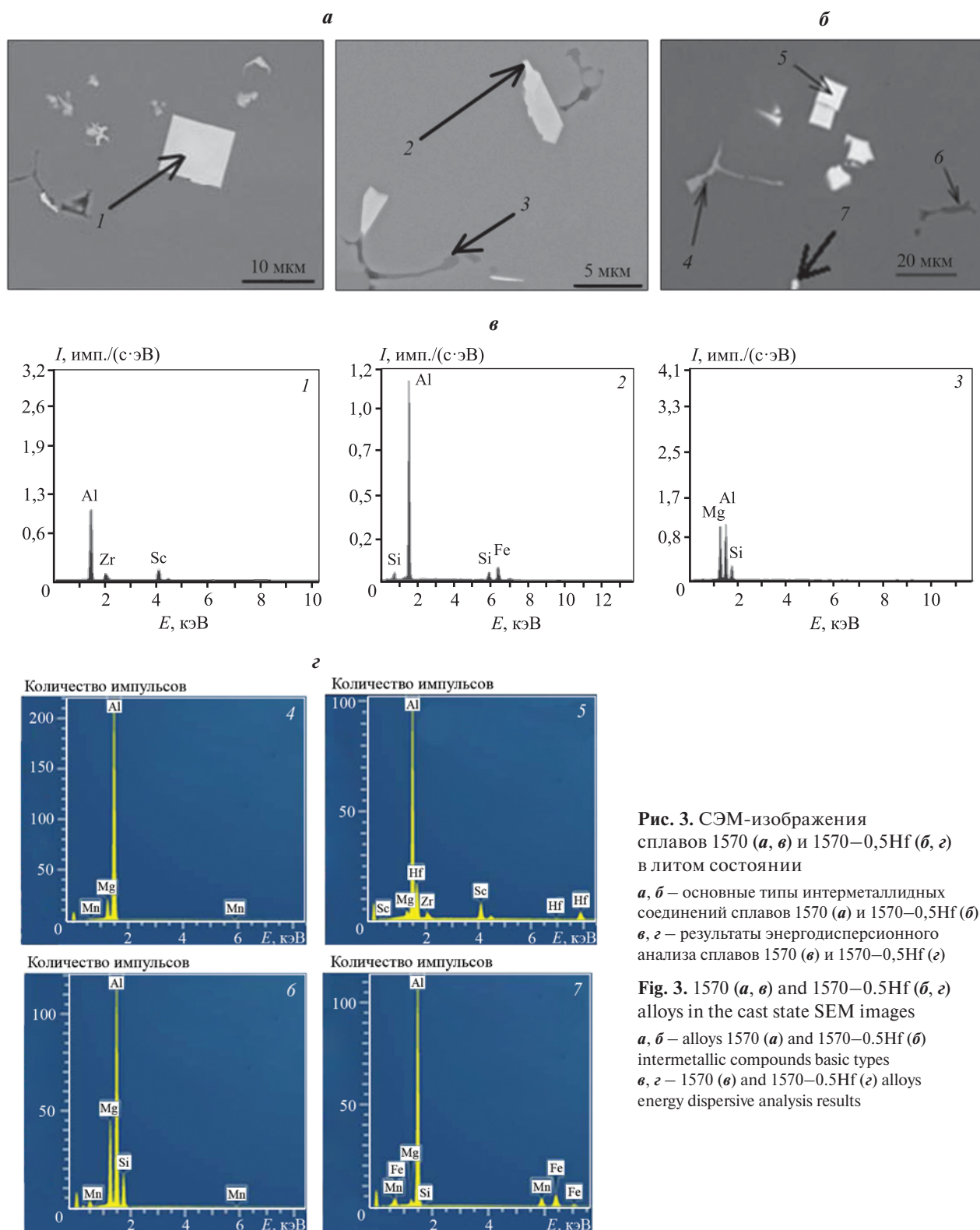


Рис. 3. СЭМ-изображения сплавов 1570 (а, в) и 1570–0,5Hf (б, г) в литом состоянии

а, б – основные типы интерметаллидных соединений сплавов 1570 (а) и 1570–0,5Hf (б)
 в, г – результаты энергодисперсионного анализа сплавов 1570 (в) и 1570–0,5Hf (г)

Fig. 3. 1570 (a, v) and 1570–0.5Hf (b, g) alloys in the cast state SEM images
 a, b – alloys 1570 (a) and 1570–0.5Hf (b) intermetallic compounds basic types
 v, g – 1570 (v) and 1570–0.5Hf (g) alloys energy dispersive analysis results

35 и 36 % соответственно [13, 22]. Это и объясняет наличие частиц с совместным присутствием в них скандия, циркония и гафния.

При интерпретации результатов просвечивающей микроскопии необходимо учитывать, что у

Al элементарная ячейка — кубическая гранцентрированная, а у Al_3Sc — кубическая примитивная. У примитивной решетки будут разрешены все отражения. По результатам энергодисперсионной микроскопии видна сонаправленность векторов

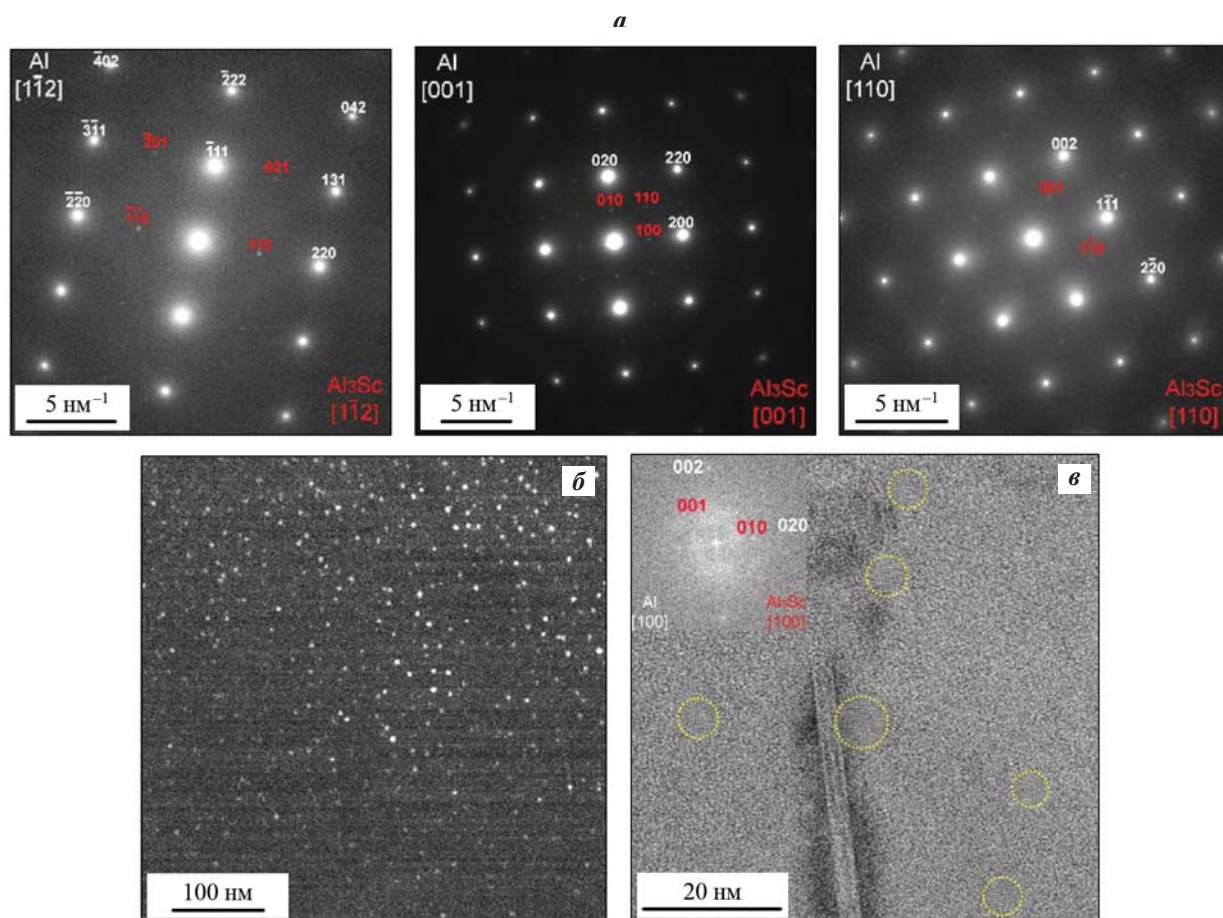


Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения микроструктуры сплава 1570
a – микроэлектронogramмы осей [112], [001] и [110]; *б, в* – когерентные наночастицы

Fig. 4. Selected area diffraction pattern of 1570 alloy
a – axes [112], [001] and [110] microelectronograms; *б, в* – coherent nanoparticles

обратной решетки ($\langle 001 \rangle$, $\langle 110 \rangle$) для Al_3Sc и Al. Также у Al_3Sc и Al близкие параметры решетки, и поэтому совпадают разрешенные рефлексы для обеих фаз, например рефлексы от плоскостей {111}. На рис. 4, *a* представлены три изображения микродифракции в темном поле, где направления на оси зоны для Al_3Sc и Al совпадают. Из вышесказанного можно сделать вывод, что решетка Al_3Sc когерентна матрице алюминия. Кроме того, присутствие рефлексов типа {110} подтверждает, что частицы Al_3Sc имеют структуру L_{12} [23, 24]. Средний размер обнаруженных наночастиц составил 7–10 нм (рис. 4, *a*), результаты энергодисперсионного анализа показали в них наличие скандия (рис. 5). Что касается сплава 1570–0,5Hf, то в нем не выявлено никаких частиц с рефлексами от сверхструктур L_{12} .

Прежде чем перейти к объяснению природы и происхождения частиц Al_3Sc , необходимо от-

метить, что при литье алюминиевых сплавов с малыми добавками скандия за счет быстрой скорости охлаждения литой заготовки в интервале температур кристаллизации стараются добиться фиксации скандия в твердом растворе [25]. Однако из-за высокой скорости диффузии скандия в алюминии при последующем остывании слитка в большинстве случаев скандий в результате прерывистого распада пересыщенного твердого раствора выделяется в виде как полукogerентных, так и когерентных частиц [20, 21]. Хотя подобные частицы и повышают механические свойства, но их эффективность гораздо ниже, чем у тех, что возникают при непрерывном распаде [15]. Кроме того, прерывистый распад пересыщенного твердого раствора при остывании литой заготовки ведет к выделению большого количества скандия, что уменьшает количество наночастиц типа Al_3Sc , формирующихся при дальнейшей термической обработке

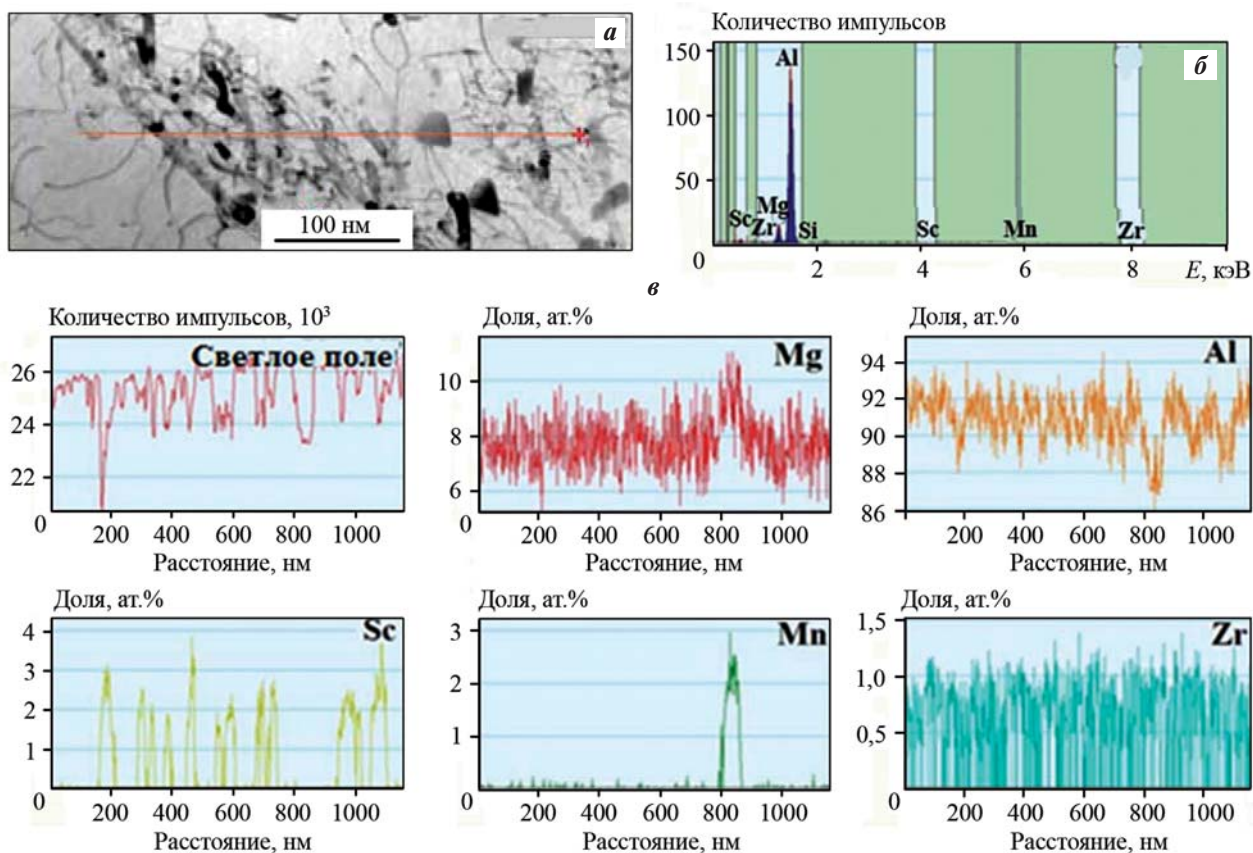


Рис. 5. Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия сплава 1570

a – светлопольное изображение исследуемой микроструктуры; *б* – энергодисперсионный спектральный профиль (EDS); *в* – распределение элементов по линии сканирования (EDS)

Fig. 5. Alloy 1570 energy dispersive X-ray spectroscopy

a – investigated microstructure bright-field image; *б* – energy dispersive spectral profile (EDS); *в* – scanning line (EDS) elements distribution

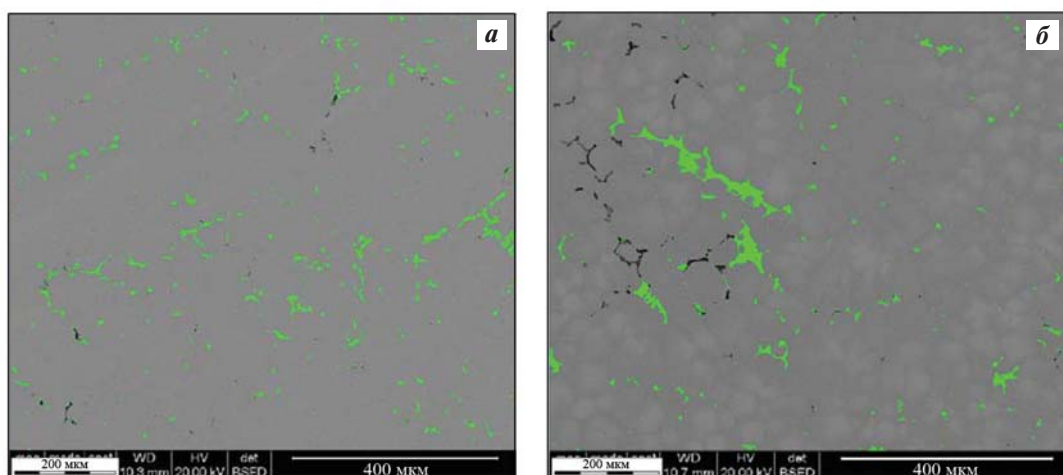


Рис. 6. Внешний вид интерметаллидных частиц в сплавах 1570 (*a*) и 1570–0,5Hf (*б*)

Fig. 6. 1570 (*a*) and 1570–0.5Hf (*б*) alloys intermetallic particles appearance

[26]. Поэтому, опираясь на литературные данные и учитывая когерентность данных частиц, наличие в них скандия и сверхструктуры L_{12} , можно с высокой долей вероятности утверждать, что они близки к интерметаллидам Al_3Sc .

Отсутствие рефлексов от сверхструктуры L_{12} в сплаве с добавкой 0,5 % Hf скорее всего означает, что в пересыщенном твердом растворе достаточно мало скандия, поэтому прерывистый распад и не происходит. Одно из объяснений может заключаться в возможном влиянии гафния на снижение заэвтектической концентрации скандия, о котором упоминалось выше. Если такой эффект имеет место, значит, образуется больше первичных частиц Al_3Sc , а следовательно, концентрация скандия в пересыщенном твердом растворе уменьшается. Косвенным подтверждением этому служит увеличение общего числа крупных интерметаллидных частиц (см. рис. 5). Еще одним возможным объяснением является то, что гафний замедляет диффузию скандия в алюминиевой матрице, однако исследования, посвященные этому вопросу, отсутствуют в литературных источниках.

По данным, полученным сканирующей электронной микроскопией (рис. 6), можно сделать вывод, что при легировании сплава 1570 гафнием растет число выделившихся из пересыщенного твердого раствора интерметаллидов.

Заключение

Добавки гафния позволяют в 2 раза повысить эффективность измельчения зерна, основное объяснение этому — модифицирующее действие первичных частиц Al_3Hf . По результатам исследования химического состава крупных интерметаллидных частиц установлено, что гафний частично растворяется в интерметаллидных частицах, содержащих также цирконий и скандий. Просвечивающая микроскопия позволила выявить в сплаве 1570 большое количество когерентных, содержащих скандий частиц, имеющих сверхструктуру L_{12} , которые с большой долей вероятности формируются в результате прерывистого распада пересыщенного твердого раствора. При добавлении 0,5 % гафния мелкодисперсные частицы, имеющие сверхструктуру L_{12} , отсутствуют — для объяснения этого факта требуются дополнительные исследования поверхности ликвидуса системы $Al-Hf-Sc$ и изучение влияния гафния на коэффициент диффузии скандия.

Список литературы/References

1. Savchenkov S., Kosov Y., Bazhin V., Krylov K., Kawalla R. Microstructural master alloys features of aluminium-erbium system. *Crystals*. 2021; 11 (11): 1353. <https://doi.org/10.3390/cryst11111353>
2. Белов Н.А., Шуркин П.К., Короткова Н.О., Черкасов С.О. Влияние термообработки на структуру и механические свойства холоднокатанных листов сплавов системы $Al-Cu-Mn$ с разным соотношением меди и марганца. *Цветные металлы*. 2021; (9): 80–86.
Belov N.A., Shurkin P.K., Korotkova N.O., Cherkasov S.O. The effect of heat treatment on the structure and mechanical properties of cold-rolled sheets made of $Al-Cu-Mn$ alloys with varying copper to manganese ratios. *Tsetnye Metally*. 2021; (9): 80–86. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2021.09.09>
3. Akopyan T.K., Belov N.A., Letyagin N.V., Milovich F.O., Lukuanchuk A.A., Fortuna A.S. Influence of indium trace addition on the microstructure and precipitation hardening response in $Al-Si-Cu$ casting aluminium alloy. *Materials Science and Engineering A*. 2022; 831: 142329. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142329>
4. Bazhin V.Y., Alattar A.L., Danilov I.V. Development of technologies for the production of multicomponent ligatures $Al-Cu-B-C$ with high thermal characteristics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 537 (2): 149243.
5. Du H., Zhang S., Zhang B., Belov N., Liu Z. Ca-modified $Al-Mg-Sc$ alloy with high strength at elevated temperatures due to a hierarchical microstructure. *Journal of Materials Science*. 2021; 56 (28): 16145–16157.
6. Бронз А.В., Ефремов В.И., Плотников А.Д., Чернявский А.Г. Сплав 1570С — материал для герметичных конструкций перспективных многоразовых изделий РКК «Энергия». *Космическая техника и технологии*. 2014; (4): 62–67.
Bronz A.V., Efremov V.I., Plotnikov A.D., Chernyavskii A.G. Alloy 1570C is a material for hermetic structures of promising reusable products of RSC «Energya». *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2014; (4): 62–67. (In Russ.).
7. Захаров В.В. Влияние скандия на структуру и свойства алюминиевых сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2003; (7): 7–15.
Zakharov V.V. The effect of scandium on the structure and properties of aluminum alloys. *Metallvedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2003; (7): 7–15. (In Russ.).
8. Clouet E., Ludovic L., Thierry E., Williams L., Deschamps A. Complex precipitation pathways in multicom-

- ponent alloys. *Nature Materials*. 2006; 5 (6): 482–488. <https://doi.org/10.1038/nmat1652>
9. Hallem H., Marthinsen K., Lefebvre W., Danoix F., Forbord B. The formation of Al₃(Sc_xZr_yHf_{1-x-y})-dispersoids in aluminium alloys. *Materials Science and Engineering*. 2006; 421 (1–2): 154–160.
 10. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: МИСиС, 2005.
 10. Li H-y, Li D-w, Zhu Z-x, Chen B-a, Xin C, Yang C-l, Zhang H-y, Kang W. Grain refinement mechanism of as-cast aluminum by hafnium. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016; 26 (12): 3059–3069. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64438-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64438-2)
 12. Yashin V., Aryshenskii E., Hirsch J., Kononov S., Latushkin I. Study of recrystallization kinetics in AA5182 aluminium alloy after deformation of the as-cast structure. *Materials Research Express*. 2019; 6: 066552. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab085f>
 13. Давыдов В.Г., Елагин В.И., Захаров В.В., Ростова Т.Д. О легировании алюминиевых сплавов добавками скандия и циркония. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1996; (8): 25–30. Davydov V.G., Elagin V.I., Zakharov V.V., Rostova T.D. Alloying aluminum alloys with scandium and zirconium additives. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 1996; (8): 25–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/bf01395323>
 14. Рохлин Л.Л., Бочвар Н.Р., Добаткина Т.В., Леонтьев В.Г. Исследование богатой алюминием части диаграммы состояния Al–Hf. *Металлы*. 2009; (3): 93–98. Rokhlin L.L., Bochvar N.R., Dobatkina T.V., Leont'ev V.G. Al-rich portion of the Al–Hf phase diagram. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2009; 3: 258–262. <https://doi.org/10.1134/S003602950903012>
 15. Røyset J., Ryum N. Scandium in aluminium alloys. *International Materials Reviews*. 2005; 50 (1): 19–44.
 16. Bo H., Liu L.B., Hu J.L., Jin Z.P. Experimental study and thermodynamic modeling of the Al–Sc–Zr system. *Computational Materials Science*. 2017; 133: 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2017.02.029>
 17. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1979.
 18. Engler O., Kuhnke K., Hasenclever J. Development of intermetallic particles during solidification and homogenization of two AA 5xxx series Al–Mg alloys with different Mg contents. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017; 728: 669–681. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.09.060>
 19. Engler O., Simon M. Control of second-phase particles in the Al–Mg–Mn alloy AA 5083. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016; 689: 998–1010. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.070>
 20. Blake N., Hopkins M.A. Constitution and age hardening of Al–Sc alloys. *Journal of Materials Science*. 1985; 20: 2861–2867. <https://doi.org/10.1007/BF00553049>
 21. Norman A., Prangnell P., McEwen R. The solidification behavior of dilute aluminum–scandium alloys. *Acta Materialia*. 1998; 46: 5715–5732.
 22. Rokhlin L.L., Bochvar N.R., Boselli J., Dobatkina T.V. Investigation of the phase relations in the Al-rich alloys of the Al–Sc–Hf system in solid state. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2010; 31: 327–332. <https://doi.org/10.1007/s11669-010-9710-z>
 23. Harada Y., Dunand D.C. Creep properties of Al₃Sc and Al₃(Sc, X) intermetallics. *Acta Materialia*. 2000; 48 (13): 3477–3487. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00142-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00142-7)
 24. Keith E., Knipling, David C., Dunand, David N. Precipitation evolution in Al–Zr and Al–Zr–Ti alloys during isothermal aging at 375–425 C. *Acta Materialia*. 2008; 56 (1): 114–127. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.09.004>
 25. Захаров В.В., Елагин В.И., Ростова Т.Д., Филатов Ю.А. Металловедческие принципы легирования алюминиевых сплавов скандием. *Технология легких сплавов*. 2010; (1): 67–73. Zakharov V.V., Elagin V.I., Rostova T.D., Filatov Yu.A. Metallurgical principles of alloying aluminum alloys with scandium. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2010; (1): 67–73. (In Russ.).
 26. Parker B.A., Zhou Z.F., Nolle P. The effect of small additions of scandium on the properties of aluminium alloys. *Journal of Materials Science*. 1995; 30 (2): 452–458. <https://doi.org/10.1007/BF00354411>

Информация об авторах

Игорь Александрович Зорин – студент, лаборант ОНИЛ-4 Самарского университета.
<https://orcid.org/0000-0001-9349-2494>
E-mail: zorin_20@mail.ru

Евгений Владимирович Арышенский – к.т.н., доцент кафедры «Технология металлов и авиаматериаловедение» (ТМиАМ), старший научный сотрудник ОНИЛ-4 Самарского университета.
<https://orcid.org/0000-0003-3875-7749>
E-mail: ar-evgenii@yandex.ru

Александр Михайлович Дриц – к.т.н., ведущий научный сотрудник ОНИЛ-4 Самарского университета.
<https://orcid.org/0000-0002-9468-8736>
E-mail: alexander.drits@arconic.com

Сергей Валерьевич Коновалов – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ТМиАМ, главный научный сотрудник ОНИЛ-4 Самарского университета.
<https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>
E-mail: konovserg@gmail.com

Виктор Сергеевич Комаров – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории ультрамелкозернистых металлических материалов Национального исследовательского технологического университета «МИСИС».
<https://orcid.org/0000-0003-4710-3739>
E-mail: kom1107@yandex.ru

Information about the authors

Igor' A. Zorin – Student, Laboratory Worker of the ONIL-4 of Samara National Research University.
<https://orcid.org/0000-0001-9349-2494>
E-mail: zorin_20@mail.ru

Evgenii V. Aryshenskii – Cand. Sci. (Eng.), Associate Prof. of the Department “Materials Technology and Aviation Materials Science”, Senior Researcher of the ONIL-4 of Samara National Research University.
<https://orcid.org/0000-0003-3875-7749>
E-mail: ar-evgenii@yandex.ru

Aleksandr M. Drits – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the ONIL-4 of Samara National Research University.
<https://orcid.org/0000-0002-9468-8736>
E-mail: alexander.drits@arconic.com

Sergei V. Konovalev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the ONIL-4, Head of the Department “Materials Technology and Aviation Materials Science” of Samara National Research University.
<https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>
E-mail: konovserg@gmail.com

Viktor S. Komarov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Ultrafine-Grained Metal Materials of National University of Science and Technology “MISIS”.
<https://orcid.org/0000-0003-4710-3739>
E-mail: kom1107@yandex.ru

Вклад авторов

И.А. Зорин – проведение экспериментов, подготовка текста статьи

Е.В. Арышенский – формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, подготовка текста, формулировка выводов.

А.М. Дриц – научное руководство, корректировка текста, корректировка выводов.

С.В. Коновалов – проведение исследований с помощью сканирующего электронного микроскопа и обработка этих результатов.

В.С. Комаров – проведение исследований с помощью просвечивающего электронного микроскопа и обработка этих результатов.

Contribution of the authors

I.A. Zorin – conducting experiments, writing the manuscript.

E.V. Aryshenskii – formation of the main concept, goal and objectives of the study, preparation of the text, formulation of the conclusions.

A.M. Drits – scientific guidance, correction of the text, correction of conclusions.

S.V. Konovalev – conducting research using a scanning electron microscope and processing these results.

V.S. Komarov – conducting research using a transmission electron microscope and processing these results.

Статья поступила в редакцию 10.04.2022, доработана 02.11.2022, подписана в печать 08.11.2022

The article was submitted 10.04.2022, revised 02.11.2022, accepted for publication 08.11.2022