

Влияние гафния на высокомагниевого сплавы, легированные переходными металлами, при термической обработке

© 2024

Зорин Игорь Александрович*^{1,2,4}, лаборант-исследователь, студент,
инженер-электроник II категории лаборатории механических испытаний и электронной микроскопии
Арышенский Евгений Владимирович^{2,5}, доктор технических наук, доцент,
старший научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений
Кудрявцев Егор Алексеевич^{3,6}, кандидат технических наук,
научный сотрудник Центра коллективного пользования «Технологии и Материалы НИУ "БелГУ"»
Дриц Александр Михайлович^{1,7}, кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник
Коновалов Сергей Валерьевич^{2,8}, доктор технических наук, профессор,
проректор по научной и инновационной деятельности

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара (Россия)

²Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк (Россия)

³Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород (Россия)

*E-mail: zorin.ia@ssau.ru

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9349-2494>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3875-7749>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1113-0807>

⁷ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9468-8736>

⁸ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

Поступила в редакцию 03.08.2023

Принята к публикации 20.11.2023

Аннотация: Целью работы является изучение влияния добавок гафния на механические свойства и термостабильность частиц при повышенной температуре термической обработки алюминиевых сплавов с высоким содержанием магния. Для изучения был выбран сплав 1570 в двух модификациях: без содержания гафния и с его добавкой 0,5 % по массе. Оба сплава были подвергнуты гомогенизационному отжигу при температуре 440 °С с различными режимами выдержки, которые составили от 2 до 100 ч. Для различных режимов термической обработки изучалась микротвердость, а также с помощью просвечивающей микроскопии исследовалась тонкая микроструктура. В результате удалось установить, что в процессе отжига при малом времени выдержки (2–8 ч) сплав с добавкой гафния имеет более высокие показатели микротвердости, превосходя показатели сплава 1570 в среднем на 20 НВ. Это связано с тем, что в сплаве 1570 с добавками гафния при термообработке увеличивается количество выделяющихся частиц при одновременном уменьшении их среднего размера по сравнению с базовым сплавом. В то же время в сплаве 1570 без содержания гафния при его отжиге при температуре 440 °С роста микротвердости не происходит. Это обусловлено тем, что в сплаве 1570 без содержания гафния при остывании после литья происходит прерывистый распад, в результате которого большая часть скандия выделяется из пересыщенного твердого раствора в виде дисперсоидов. В сплаве с добавками гафния такого явления не наблюдается, что свидетельствует о его способности останавливать прерывистый распад в процессе охлаждения слитка после литья.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы; переходные металлы; скандий; гафний; термообработка; упрочняющие наночастицы.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 22–29–01506, <https://rscf.ru/project/22-29-01506/>.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Технологии и Материалы НИУ "БелГУ"».

Для цитирования: Зорин И.А., Арышенский Е.В., Кудрявцев Е.А., Дриц А.М., Коновалов С.В. Влияние гафния на высокомагниевого сплавы, легированные переходными металлами, при термической обработке // Frontier Materials & Technologies. 2024. № 1. С. 29–36. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-1-67-3.

ВВЕДЕНИЕ

Алюминиевые сплавы в настоящее время входят в число самых востребованных материалов во многих отраслях промышленности. Одной из самых популярных добавок в алюминиевые сплавы является магний, легирование которым приводит к существенному повышению прочностных свойств за счет твердорастворного упрочнения. Еще одной распространенной добавкой, повышающей механические свойства алюминиевых

сплавов, является скандий [1]. Его использование приводит к существенному измельчению зеренной структуры при литье [2–4]. Кроме того, он способствует росту прочности за счет формирования когерентных упрочняющих наночастиц Al_3Sc , имеющих структуру $L1_2$ [5–7]. С учетом вышесказанного неудивительно, что совместное магниевое-скандиевое легирование весьма распространено в современной промышленности.

В то же время у использования скандия в качестве легирующего элемента есть определенные недостатки.

Во-первых, он очень дорог, а во-вторых, из-за высокой скорости его диффузии в алюминии наночастицы Al_3Sc имеют низкую термостабильность и быстро коагулируют при нагреве [8; 9]. Для повышения их термостабильности в сплавы добавляют цирконий, который создает вокруг Al_3Sc оболочку, препятствующую переходу $L1_2$ в $D0_{23}$ и распаду пересыщенного скандиевого раствора [10; 11]. Кроме того, цирконий уменьшает количество скандия, необходимого для эффективной модификации литой структуры [7; 12].

Именно на основе принципа совместного скандиево-циркониевого легирования был разработан ряд алюминиевых сплавов с высоким содержанием магния. Одним из них является весьма востребованный в современной промышленности сплав 1570. Еще более повысить эффективность упрочняющих частиц могли бы добавки гафния. Данный элемент также является эффективным измельчителем зерна [13]. Кроме того, он, как и цирконий, создает оболочку вокруг частиц Al_3Sc , препятствуя дальнейшей диффузии скандия, т. е. термостабилизирует их [10; 14].

Недавние исследования [15; 16] показали, что добавки гафния в сплав 1570 значительно замедляют распад пересыщенного твердого раствора. Так, в [16] выявлено, что при добавках 0,5 % гафния в сплав 1570 прерывистый распад пересыщенного твердого раствора в нем полностью прекращается. В исследовании [15] показано, что добавки гафния в сплав 1570 снижают количество выделяющихся из него наночастиц при отжиге с температурой 370 °С и времени выдержки 4 ч. Это также говорит о замедлении распада пересыщенного твердого раствора. Стоит отметить, что торможение распада пересыщенного твердого раствора при температуре 370 °С не будет давать преимуществ, так как из-за снижения количества наночастиц будут снижаться и прочностные характеристики сплава. Однако торможение скорости распада пересыщенного твердого раствора скандия в алюминии может быть полезным при более высоких температурах, когда частицы в сплаве 1570 начнут коагулировать и коалесцировать, утрачивая тем самым свой упрочняющий эффект. В то же время добавки гафния позволяют термостабилизировать наночастицы, тем самым повысив прочностные свойства. Отметим, что повышение термостабильности частиц очень важно, так как позволит повысить температуру горячей деформации. Это, в свою очередь, увеличит пластичность материала и улучшит энергоэффективность горячей прокатки [17].

Цель работы – изучение влияния добавок гафния на механические свойства и термостабильность частиц Al_3Sc при повышенной температуре термической обработки высокомагниевого алюминиевого сплава.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования влияния гафния на формирование микроструктуры и механических свойств на протяжении высокотемпературного отжига катаных образцов из алюминиевых сплавов с высоким содержанием магния были отлиты сплавы 1570 и 1570 (+0,5 % вес. Hf). Для отливки слитков исследуемых сплавов использовали индукционную печь средней частоты, слитки размерами 20×40×400 мм и массой 5 кг отливали в стальной кокиль с последующим их охлаждением в воде.

В качестве шихты для сплава использовались следующие материалы: алюминий марки А85, магний марки МГ90, легатура марок Al–Sc₂, Al–Zr₅, Al–Hf₂ и легирующие таблетки марки Mn₉₀Al₁₀. В первую очередь производилась загрузка алюминия и его плавление. После расплавления алюминия и достижения температуры 730 °С производилось снятие шлака с поверхности расплава. Далее расплав нагревался до температуры 770–790 °С и производилась присадка легатур AlSc₂, AlZr₅, Al–Hf₂ порциями массой не более 300 г с последующим перемешиванием и выдержкой расплава в течение 5 мин. После введения упомянутых выше легатур расплав охлаждался до температуры 750 °С, после этого осуществлялась присадка новых легирующих компонентов (Mg, Mn). Далее производилось перемешивание расплава в течение 3 мин с последующим нагревом расплава до температуры 740 °С и отбор пробы на экспресс-анализ химического состава плавки. Химический состав сплавов (таблица 1) определялся спектральным методом на атомно-эмиссионном спектрометре ARL 3460 (ГОСТ 25086, ГОСТ 7727, ГОСТ 3221, ASTM E 716, ASTM E 1251). Содержание Hf устанавливалось расчетным путем ввиду отсутствия стандартных образцов. Перед заливкой расплавленного металла в литейную форму его рафинировали карналитовым флюсом, вводимым из расчета 5 г на 1 кг шихты. После этого с поверхности расплавленного металла снимался шлак, и металл заливался в стальной кокиль при равномерном времени заливки 20–30 с при температуре расплава 730–750 °С. После затвердевания слиток извлекался из кокиля и охлаждался в воде.

Отжиг слитков производился в муфельной электрической печи при температуре 440 °С и выдержке 2, 4, 8, 16, 24, 48, 72 и 100 ч с последующей закалкой в воде для фиксации пересыщенного твердого раствора.

Микротвердость исследуемого сплава измерялась на автоматическом микротвердометре Wolpert 402MVD в соответствии с ГОСТ 9450–76 при нагрузке 0,2 Н и времени выдержки 10 с. Прежде чем приступить к испытаниям, одну из поверхностей плоскопараллельного образца подвергли шлифовке и полировке.

Таблица 1. Химический состав исследуемых сплавов
Table 1. Chemical composition of the studied alloys

Сплав	Al	Si	Fe	Mn	Mg	Ti	Zr	Sc	Hf
1570	основа	0,13	0,21	0,44	6,25	0,02	0,06	0,25	–
1570–0,5Hf	основа	0,12	0,22	0,45	6,29	0,04	0,06	0,25	0,5

Методом просвечивающей микроскопии на микроскопе JEM-2100 (JEOL, Япония), оборудованном приставкой энергодисперсионного анализа INCA (Oxford Instruments, Великобритания), были исследованы образцы для обоих рассматриваемых в работе сплавов после 4 ч выдержки при температурах 370 и 440 °С. Пробоподготовка образцов для просвечивающей электронной микроскопии проводилась в несколько этапов. На первом этапе выполнялась резка двух заготовок под фольги толщиной 500 мкм при помощи электроэрозионного станка Sodick (Sodick Co., Ltd, Япония). Указанная толщина обусловлена возможной деформацией и выгибанием фольг в ходе резки из-за возможного наличия внутренних напряжений в образцах. Далее полученные заготовки механически утонялись до толщины ~120 мкм при помощи наждачных кругов Grid 2000 (Struers, Дания). Из полученных заготовок специальным пунсоном выдавливались диски диаметром 3 мм и помещались в установку электролитического утонения TenuPol-5 (Struers, Дания). Утонение осуществлялось при температуре –30 °С в электролите следующего состава: 75 % CH₃OH, 25 % HNO₃. В результате из каждого из 6 состояний было получено не менее 5 образцов фольг для ПЭМ. Исследование тонкой структуры образцов производилось на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEM-2100 (JEOL, Япония) с ускоряющим напряжением 200 кВ, оснащенный приставкой EDX-анализа INCA (Oxford Instruments, Великобритания). Полученные фольги сразу же помещались в двунаклонный держатель ПЭМ с возможностью наклона на ±30° по двум осям. Ввиду малого размера частиц (5–10 нм) съемка проводилась при увеличении ×200 000 и длительной выдержке (около 1 мин), что позволяло произвести достоверную фиксацию даже столь малых когерентных частиц. На полученных снимках учитывались число частиц и их химический состав при помощи EDX-детектора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ниже представлены изменения микротвердости исследуемых сплавов. Согласно рис. 1 механические характеристики сплава 1570 в целом остаются неизменными и находятся в диапазоне значений в 82–89 HV. Это говорит о том, что все упрочняющие частицы Al₃(Sc,Zr), обладающие когерентной структурой L1₂, выпадают в процессе прерывистого распада, и на последующих стадиях термической обработки их образования не происходит.

В то же время сплав, легированный гафнием, показывает наибольший прирост микротвердости в интервале 2–8 ч. Это связано с тем, что в указанных временных промежутках начинается активный распад пересыщенного твердого раствора и выделение упрочняющих частиц типа Al₃Sc. После 16 ч выдержки у сплава с добавкой гафния наблюдается спад показателей микротвердости, что, вероятно, связано с началом потери когерентности и коалесценции частиц типа Al₃Sc.

Методами просвечивающей микроскопии после отжига при 440 °С длительностью 4 ч в обоих сплавах была исследована тонкая структура. Этот режим отжига выбран, так как, согласно данным микротвердости (рис. 1), наибольший ее прирост наблюдался в интерва-

ле от 2 до 8 ч. Поэтому именно при таких режимах термообработки ожидается выделение наибольшего количества упрочняющих наночастиц. Результаты просвечивающей электронной микроскопии для сплава 1570 после отжига при 440 °С длительностью 4 ч представлены на рис. 2.

Сверхструктурные рефлексы L1₂ в сплаве 1570 видны довольно отчетливо, что говорит о наличии когерентных алюминиевой матрице наночастиц Al₃Sc. Представленные на рис. 2 б данные свидетельствуют о наличии крупных (около 1 мкм) частиц, выделившихся в структуре сплава. Данные частицы близки по своему химическому составу к Al₆(Mn,Fe) (рис. 3) и, как и Al₃Sc, появляются при распаде пересыщенного твердого раствора, так как данный сплав содержит Mn и Fe. Стоит отметить, что железо в алюминиевых сплавах является неизбежной примесью.

Наночастицы Al₃Sc также наблюдаются в сплаве 1570 при его нагреве до температуры 440 °С. На рис. 2 в в сплаве 1570 отмечается преобладание частиц с размерами в интервале от 1,6 до 13,3 нм. Это указывает на преимущественно мелкодисперсную фазу в данном образце, однако наблюдаются и более крупные, более 25 нм, частицы. В целом средний размер частиц составляет 11,4 нм, а их средняя плотность – 2,2·10¹⁰ см⁻². При этом нужно отметить, что частицы в объеме зерен распределены очень неравномерно, что наблюдается на рис. 2 с, 2 d. Можно предположить, что это является следствием прерывистого распада при остывании литой заготовки в данном сплаве.

В представленном состоянии (рис. 4) сверхструктурные рефлексы видны не столь отчетливо, однако они присутствуют, что связано со снижением коэффициента диффузии скандия в алюминии при легировании сплавов гафнием. Можно наблюдать достаточно большое число относительно крупных частиц (рис. 4 б). Данные частицы также являются близкими по химическому составу к Al₆(Mn,Fe) (рис. 3 и таблица 2) и объясняются наличием в сплаве марганца и железа.

В сплаве 1570–0,5Hf преобладают частицы с размерами в диапазоне от 5,2 до 14,5 нм (рис. 4 в). При этом на снимках в темном поле также отмечается выделение частиц более 25 нм. Средний размер частиц в данном сплаве составляет 10,5 нм, а плотность распределения – 2,6·10¹⁰ см⁻². При этом неравномерность распределения частиц внутри объема зерна несколько снижается.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отметим, что сравнение среднего размера частиц, наблюдавшихся в сплаве 1570 после литья в [18] и полученных в данном исследовании после нагрева при температуре 440 °С со временем выдержки 4 ч, говорит о том, что термическая обработка практически не изменяет количество и размер частиц. И в том и в другом случае их размер находится в районе 10 нм. Это и приводит к тому, что микротвердость данного сплава не изменяется со временем. Последнее происходит ввиду того, что основная доля скандия выделяется при непрерывном распаде пересыщенного твердого раствора в ходе остывания слитка при литье, а также при образовании первичных интерметаллидов при кристаллизации данного сплава [16]. Поэтому для процесса непрерывного распада

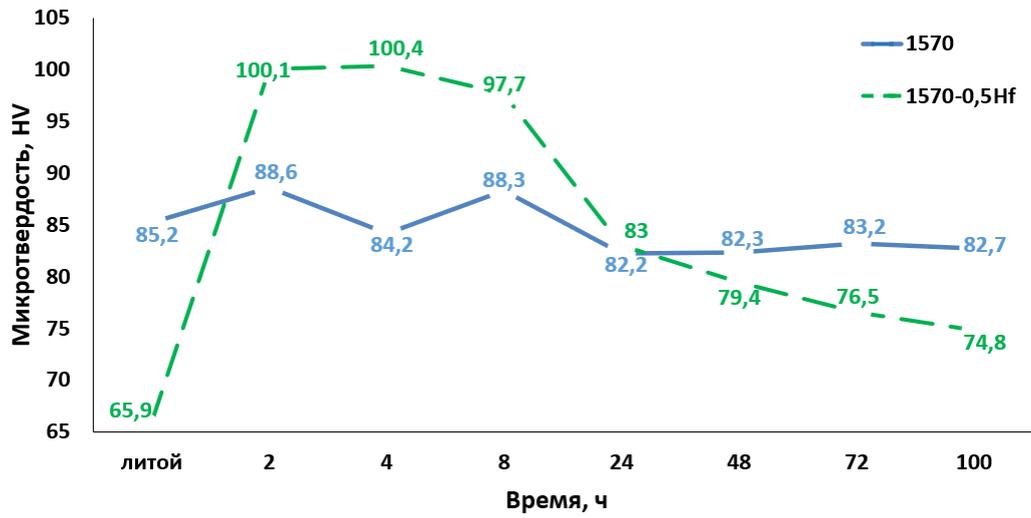


Рис. 1. Изменение микротвердости при отжиге 440 °С
 Fig. 1. Change in microhardness during 440 °C annealing

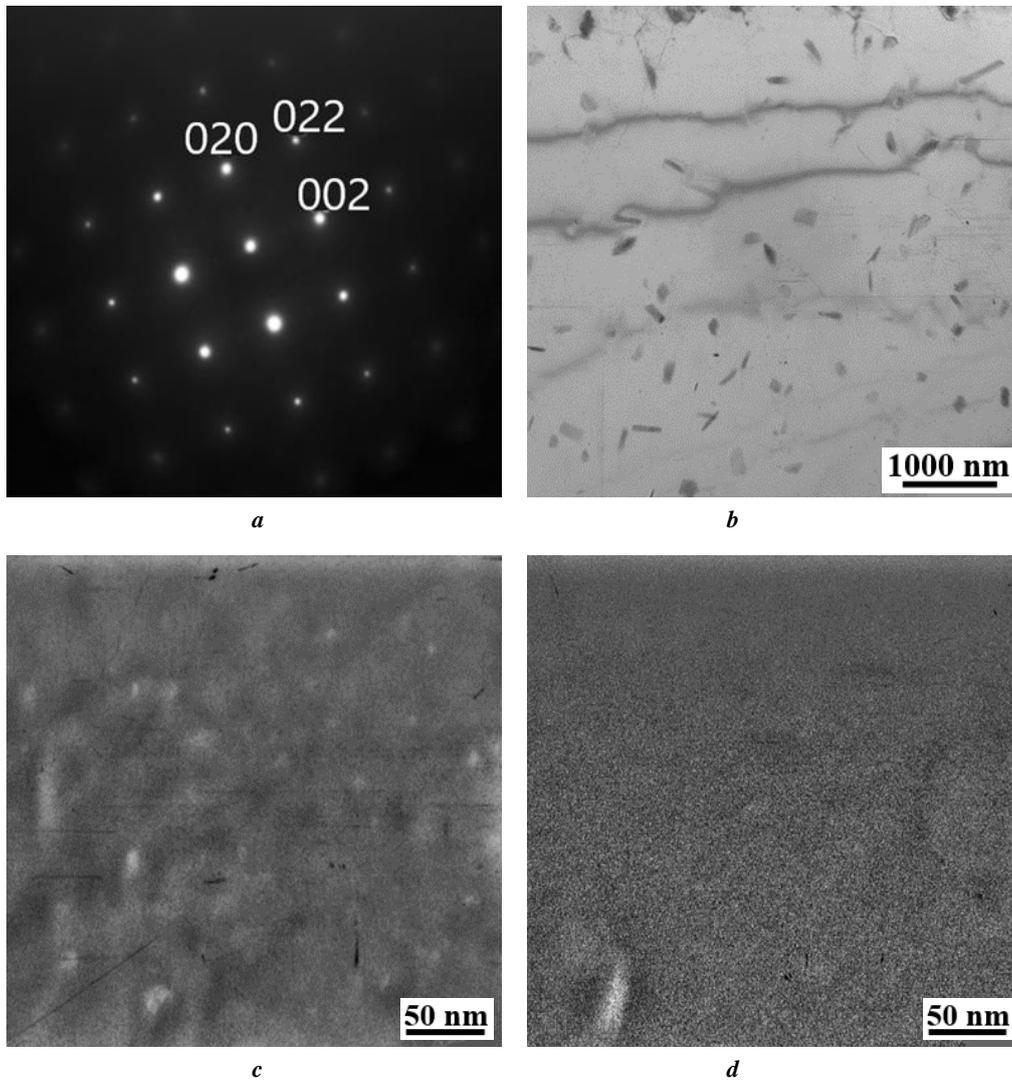


Рис. 2. Тонкая структура сплава 1570 при отжиге при 440 °С длительностью 4 ч:
 a – микродифракция в оси зоны [001]; b – светлое поле, ×20 000; c, d – темное поле ×200 000
 Fig. 2. Fine structure of 1570 alloy during 440 °C annealing with a duration of 4 h:
 a – microdiffraction in the zone axis [001]; b – bright field, ×20,000; c, d – dark field, ×200,000

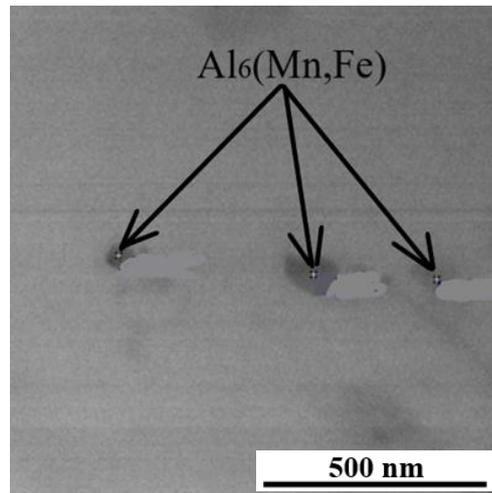


Рис. 3. Участки анализа локального химического состава в образце сплава 1570 при отжиге 440 °С длительностью 4 ч
Fig. 3. Areas of analysis of local chemical composition in a sample of 1570 alloy during 440 °C annealing with a duration of 4 h

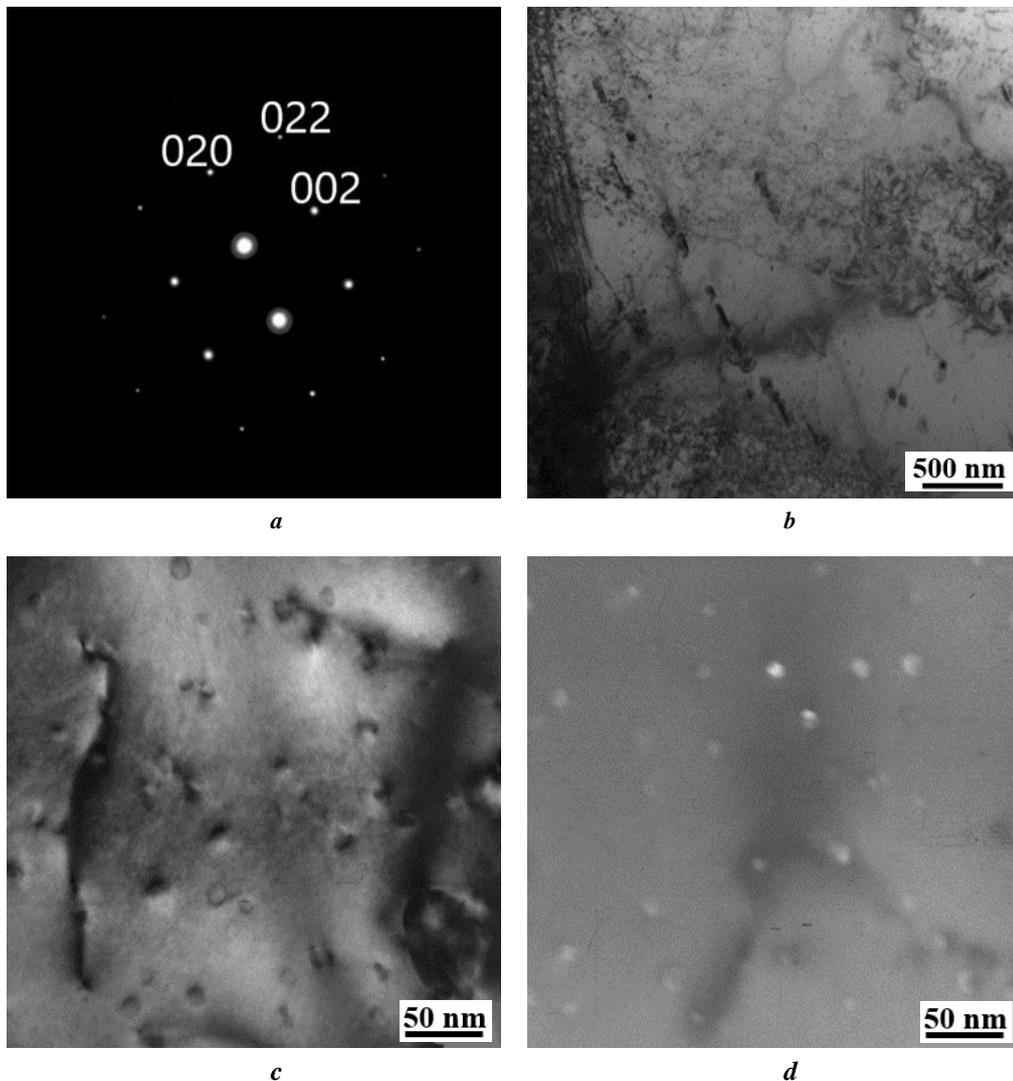


Рис. 4. Тонкая структура сплава 1570–0,5Hf при отжиге при 440 °С длительностью 4 ч:
a – микродифракция в оси зоны [001]_α; **b** – светлое поле, ×20 000; **c, d** – темное поле, ×200 000
Fig. 4. Fine structure of 1570–0.5Hf alloy during 440 °C annealing with a duration of 4 h:
a – microdiffraction in the zone axis [001]_α; **b** – bright field, ×20,000; **c, d** – dark field, ×200,000

Таблица 2. Локальный химический состав частиц в образце сплава 1570 при отжиге 440 °С длительностью 4 ч, ат. %
Table 2. Local chemical composition of the particles in the 1570 alloy sample during 440 °С annealing with a duration of 4 h, at. %

Химические элементы	Al	Mn	Fe
Исследуемые спектры	77,84	10,6	11,4

пересыщенного твердого раствора при нагреве данного сплава скандия уже не хватает, и количество частиц не изменяется. Можно предположить, что цирконий все еще достаточно активно блокирует рост частиц при отжиге 440 °С в течение 4 ч, что не противоречит данным [19].

Стоит отметить, что образовавшиеся в ходе распада частицы тоже могут быть когерентными и вносить достаточно большой вклад в упрочнение [8]. В данном случае их упрочняющее действие подтверждается тем, что микротвердость после литья значительно выше в сплаве 1570, содержащем образовавшиеся в результате прерывистого распада наночастицы, чем в сплаве 1570 с 0,5 % содержанием гафния, в котором они в данном состоянии отсутствуют [10].

Резкий рост микротвердости при термообработке сплава 1570 с 0,5 % содержанием гафния объясняется тем, что в нем начинаются активные процессы выделения частиц Al_3Sc из пересыщенного твердого раствора. Это происходит потому, что, в отличие от сплава 1570, в нем сохраняется достаточно скандия для непрерывного распада. Отметим, что существует несколько возможных причин подавления прерывистого распада пересыщенного твердого раствора с помощью гафния [16]. Не останавливаясь на гипотезах подробно, можно констатировать, что отсутствие прерывистого распада в сплавах при легировании гафнием позволяет активизировать образование наночастиц Al_3Sc , что в результате и ведет к росту микротвердости. Более высокие свойства сплава 1570–0,5Hf в целом объясняются большим количеством наночастиц и их более равномерным выделением. Более мелкодисперсное распределение наночастиц в принципе отличает твердый раствор при непрерывном распаде от прерывистого [8]. При дальнейшем нагреве в течение нескольких часов микротвердость остается на прежнем уровне, а значит, наночастицы сохраняют свои размеры и количество. Однако после выдержки больше 8 ч микротвердость начинает падать, что говорит о процессе коагуляции. Потом ее падение значительно замедляется, что указывает на торможение процессов коагуляции. Более низкие значения микротвердости в сплаве 1570–0,5Hf при долгой выдержке могут объясняться тем, что в нем для процесса коалесценции доступно большее количество частиц, чем в сплаве 1570. Таким образом, добавки гафния позволяют обеспечить существенное преимущество в прочностных свойствах в течение первых 8–10 ч нагрева, однако затем оно утрачивается. Следует также отметить, что дальнейшее изучение влияния добавок гафния на термостабильность частиц Al_3Sc следует производить в малолегированных алюминиевых сплавах (возможно, при меньшем содержании скандия

и циркония), позволяющих растворить продукты прерывистого распада. Это позволит отделить влияние роста прочностных свойств в результате торможения прерывистого распада в ходе процесса рекристаллизации от эффекта, получаемого за счет увеличения термостабильности наночастиц Al_3Sc .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Добавки гафния положительно влияют на свойства сплава 1570 при термической обработке. Гафний препятствует процессу прерывистого распада пересыщенного твердого раствора как в процессе охлаждения слитка после кристаллизации, так и в процессе последующей термической обработки.

2. Установлено, что в сплаве 1570 с добавками гафния при термообработке увеличивается общая доля частиц при одновременном уменьшении их среднего размера в сравнении с исходным сплавом 1570.

3. Наиболее удачным режимом отжига для сплавов с добавками гафния при температуре 440 °С являются временные отрезки 2–8 ч, что обусловлено выделением из пересыщенного твердого раствора упрочняющих частиц Al_3Sc , в то время как для сплава 1570 показатели микротвердости остаются неизменными вследствие того, что все наноразмерные дисперсоиды выделяются в ходе прерывистого распада твердого раствора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ри Э.Х., Ри Х., Деев В.Б., Колисова М.В. Влияние скандия на структурообразование, ликвационные процессы и свойства литейного алюминиевого сплава АМ4,5Кд // Цветные металлы. 2019. № 7. С. 78–85. DOI: [10.17580/tsm.2019.07.10](https://doi.org/10.17580/tsm.2019.07.10).
2. Захаров В.В., Фисенко И.А., Куныавская Т.М. Перспективы легирования алюминиевых сплавов скандием // Технология легких сплавов. 2020. № 1. С. 28–34. EDN: [PDWRPX](https://doi.org/10.17580/tsm.2020.01.10).
3. Lei Zhiguo, Wen Shengping, Huang Hui, Wei Wu, Nie Zuoren. Grain Refinement of Aluminum and Aluminum Alloys by Sc and Zr // Metals. 2023. Vol. 13. № 4. Article number 751. DOI: [10.3390/met13040751](https://doi.org/10.3390/met13040751).
4. Li Qinglin, Zhang Yushi, Lan Yefeng, Pei Ruijie, Feng Xiangyu, Xia Tiandong, Liu Dexue. Effect of scandium addition on microstructure and mechanical properties of as-cast Al–5%Cu alloys // Vacuum. 2020. Vol. 177. Article number 109385. DOI: [10.1016/j.vacuum.2020.109385](https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109385).
5. Yu Kun, Li Wenxian, Li Songrui, Zhao Jun. Mechanical properties, and microstructure of aluminum alloy 2618

- with Al₃(Sc, Zr) phases // *Materials Science and Engineering: A*. 2004. Vol. 368. № 1-2. P. 88–93. DOI: [10.1016/j.msea.2003.09.092](https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.09.092).
6. Рохлин Л.Л., Бочвар Н.Р., Тарытина И.Е. Влияние скандия совместно с цирконием на рекристаллизацию алюминиевых сплавов системы Al–Mg₂Si // *Металлы*. 2015. № 3. С. 51–59. EDN: [TNZOKN](https://www.elibrary.ru/tnzokn).
 7. Davydov V.G., Elagin V.I., Zakharov V.V., Rostova T.D. About scandium and zirconium additions in aluminium alloys // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1996. № 8. С. 25–30. EDN: [MOVQJR](https://www.elibrary.ru/movqjr).
 8. Захаров В.В. Влияние скандия на структуру и свойства алюминиевых сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2003. № 7. С. 7–15. EDN: [QIWYYNV](https://www.elibrary.ru/qiwyynv).
 9. Захаров В.В. Кинетика распада твердого раствора скандия в алюминии в двойных сплавах Al–Sc // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2015. № 7. С. 44–48. EDN: [UAVTYF](https://www.elibrary.ru/uavtyf).
 10. Forbord B., Lefebvre W., Danoix F., Hallem H., Marthinsen K. Three-dimensional atom probe investigation on the formation of Al₃(Sc, Zr)-dispersoids in aluminium alloys // *Scripta materialia*. 2004. Vol. 51. № 4. P. 333–337. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2004.03.033](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.03.033).
 11. Zakharov V.V. Stability of the solid solution of scandium in aluminum // *Metal Science and Heat Treatment*. 1997. Vol. 39. № 1-2. P. 61–66. DOI: [10.1007/bf02467664](https://doi.org/10.1007/bf02467664).
 12. Røyset J., Ryum N. Scandium in aluminium alloys // *International Materials Reviews*. 2005. Vol. 50. № 1. P. 19–44. DOI: [10.1179/174328005X14311](https://doi.org/10.1179/174328005X14311).
 13. Li Hong-ying, Li De-wang, Zhu Zhi-xiang, Chen Bao-an, Chen Xin, Yang Chang-long, Zhang Hong-yu, Kang Wei. Grain refinement mechanism of as-cast aluminum by hafnium // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016. Vol. 26. № 12. P. 3059–3069. DOI: [10.1016/S1003-6326\(16\)64438-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64438-2).
 14. Jia Zhi-Hong, Huang Hui-Lan, Wang Xue-Li, Xing Yuan, Liu Qing. Hafnium in aluminum alloys: a review // *Acta Metallurgica Sinica*. 2016. Vol. 29. P. 105–119. DOI: [10.1007/s40195-016-0379-0](https://doi.org/10.1007/s40195-016-0379-0).
 15. Дриц А.М., Арышенский Е.В., Кудрявцев Е.А., Зорин И.А., Коновалов С.В. Исследование распада пересыщенного твердого раствора в высокомагневых алюминиевых сплавах со скандием, легированных гафнием // *Frontier Materials & Technologies*. 2022. № 4. С. 38–48. DOI: [10.18323/2782-4039-2022-4-38-48](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-4-38-48).
 16. Зорин И.А., Арышенский Е.В., Дриц А.М., Коновалов С.В., Комаров В.С. Влияние гафния на литую микроструктуру в сплаве 1570 // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2023. Т. 29. № 1. С. 56–65. DOI: [10.17073/0021-3438-2023-1-56-65](https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-1-56-65).
 17. Яшин В.В., Рушиц С.В., Арышенский Е.В., Латушкин И.А. Реологические свойства деформируемых алюминиевых сплавов 01570 и AA5182 в условиях горячей деформации // *Цветные металлы*. 2019. № 3. С. 64–69. DOI: [10.17580/tsm.2019.03.09](https://doi.org/10.17580/tsm.2019.03.09).
 18. Зорин И.А., Дриц А.М., Арышенский Е.В., Коновалов С.В., Гречников Ф.В., Комаров В.С. Влияние переходных металлов на микроструктурную композицию алюминиевых сплавов в литом состоянии // *Фундаментальные проблемы современного матери- аловедения*. 2022. Т. 19. № 4. С. 520–531. DOI: [10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.011](https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.011).
 19. Захаров В.В. О совместном легировании алюминий- ных сплавов скандием и цирконием // *Металловеде- ние и термическая обработка металлов*. 2014. № 6. С. 3–8. EDN: [SJXNSD](https://www.elibrary.ru/sjxnsd).

REFERENCES

1. Ri E.Kh., Ri Kh., Deev V.B., Kolisova M.V. Effect of scandium on the structure, segregation and properties of the aluminium cast alloy AM4.5CD. *Tsvetnye metally*, 2019, no. 7, pp. 78–85. DOI: [10.17580/tsm.2019.07.10](https://doi.org/10.17580/tsm.2019.07.10).
2. Zakharov V.V., Fisenko I.A., Kunyavskaya T.M. Prospects of alloying of aluminium alloys with scandium. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2020, no. 1, pp. 28–34. EDN: [PDWRPX](https://www.elibrary.ru/pdwrpx).
3. Lei Zhiguo, Wen Shengping, Huang Hui, Wei Wu, Nie Zuoren. Grain Refinement of Aluminum and Aluminum Alloys by Sc and Zr. *Metals*, 2023, vol. 13, no. 4, article number 751. DOI: [10.3390/met13040751](https://doi.org/10.3390/met13040751).
4. Li Qinglin, Zhang Yushi, Lan Yefeng, Pei Ruijie, Feng Xiangyu, Xia Tiandong, Liu Dexue. Effect of scandium addition on microstructure and mechanical properties of as-cast Al–5%Cu alloys. *Vacuum*, 2020, vol. 177, article number 109385. DOI: [10.1016/j.vacuum.2020.109385](https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109385).
5. Yu Kun, Li Wenxian, Li Songrui, Zhao Jun. Mechanical properties, and microstructure of aluminum alloy 2618 with Al₃(Sc, Zr) phases. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 368, no. 1-2, pp. 88–93. DOI: [10.1016/j.msea.2003.09.092](https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.09.092).
6. Rokhlin L.L., Bochvar N.R., Tarytina I.E. Joint effect of scandium and zirconium on the recrystallization of aluminum Al–Mg₂Si alloys. *Russian metallurgy (Metally)*, 2015, vol. 2015, no. 5, pp. 381–388. DOI: [10.1134/S0036029515050134](https://doi.org/10.1134/S0036029515050134).
7. Davydov V.G., Elagin V.I., Zakharov V.V., Rostova T.D. About scandium and zirconium additions in aluminium alloys. *Metal Science and Heat Treatment*, 1996, vol. 38, no. 7-8, pp. 347–352. DOI: [10.1007/bf01395323](https://doi.org/10.1007/bf01395323).
8. Zakharov V.V. The effect of scandium on the structure and properties of aluminum alloys. *Metal Science and Heat Treatment*, 2003, vol. 45, no. 7-8, pp. 246–253. DOI: [10.1023/A:1027368032062](https://doi.org/10.1023/A:1027368032062).
9. Zakharov V.V. Kinetics of decomposition of the solid solution of scandium in aluminum in binary Al–Sc alloys. *Metal Science and Heat Treatment*, 2015, vol. 57, no. 7-8, pp. 410–414. DOI: [10.1007/s11041-015-9897-z](https://doi.org/10.1007/s11041-015-9897-z).
10. Forbord B., Lefebvre W., Danoix F., Hallem H., Marthinsen K. Three-dimensional atom probe investigation on the formation of Al₃(Sc, Zr)-dispersoids in aluminium alloys. *Scripta materialia*, 2004, vol. 51, no. 4, pp. 333–337. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2004.03.033](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.03.033).
11. Zakharov V.V. Stability of the solid solution of scandium in aluminum. *Metal Science and Heat Treatment*, 1997, vol. 39, no. 1-2, pp. 61–66. DOI: [10.1007/bf02467664](https://doi.org/10.1007/bf02467664).
12. Røyset J., Ryum N. Scandium in aluminium alloys. *International Materials Reviews*, 2005, vol. 50, no. 1, pp. 19–44. DOI: [10.1179/174328005X14311](https://doi.org/10.1179/174328005X14311).
13. Li Hong-ying, Li De-wang, Zhu Zhi-xiang, Chen Bao-an, Chen Xin, Yang Chang-long, Zhang Hong-yu, Kang Wei. Grain refinement mechanism of as-cast aluminum by hafnium. *Transactions of Nonferrous Metals*

- Society of China*, 2016, vol. 26, no. 12, pp. 3059–3069. DOI: [10.1016/S1003-6326\(16\)64438-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64438-2).
14. Jia Zhi-Hong, Huang Hui-Lan, Wang Xue-Li, Xing Yuan, Liu Qing. Hafnium in aluminum alloys: a review. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, vol. 29, pp. 105–119. DOI: [10.1007/s40195-016-0379-0](https://doi.org/10.1007/s40195-016-0379-0).
15. Drits A.M., Aryshenskiy E.V., Kudryavtsev E.A., Zorin I.A., Konovalov S.V. The study of supersaturated solid solution decomposition in magnesium-rich aluminum alloys with scandium and hafnium additions. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 4, pp. 38–48. DOI: [10.18323/2782-4039-2022-4-38-48](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-4-38-48).
16. Zorin I.A., Aryshenskiy E.V., Drits A.M., Konovalov S.V., Komarov V.S. Effect of hafnium on cast microstructure in alloy 1570. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya*, 2023, vol. 29, no. 1, pp. 56–65. DOI: [10.17073/0021-3438-2023-1-56-65](https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-1-56-65).
17. Yashin V.V., Rushchits S.V., Aryshenskiy E.V., Latushkin I.A. Rheological behavior of 01570 and AA5182 wrought aluminum alloys under hot deformation conditions. *Tsvetnye metally*, 2019, no. 3, pp. 64–69. DOI: [10.17580/tsm.2019.03.09](https://doi.org/10.17580/tsm.2019.03.09).
18. Zorin I.A., Drits A.M., Aryshenskiy E.V., Konovalov S.V., Grechnikov F.V., Komarov V.S. Effect of transition metals on as-cast aluminum alloys microstructure composition. *Fundamentalnye problemy sovremenogo materialovedeniya*, 2022, vol. 19, no. 4, pp. 520–531. DOI: [10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.011](https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.011).
19. Zakharov V.V. About joint alloying of aluminum alloys with scandium and zirconium. *Metal Science and Heat Treatment*, 2014, vol. 56, no. 5-6, pp. 281–286. DOI: [10.1007/s11041-014-9746-5](https://doi.org/10.1007/s11041-014-9746-5).

The influence of hafnium on high-magnesium alloys doped with transition metals during heat treatment

© 2024

Igor A. Zorin^{1,2,4}, laboratory assistant-researcher, student, II category electronic engineer of the Laboratory of Mechanical Testing and Electron Microscopy

Evgeny V. Aryshenskiy^{2,5}, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, senior researcher of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing

Egor A. Kudryavtsev^{3,6}, PhD (Engineering), researcher of the Common Use Center “Technologies and Materials of the National Research University BelSU”

Aleksandr M. Drits^{1,7}, PhD (Engineering), leading researcher

Sergey V. Konovalov^{2,8}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Pro-rector for Research and Innovative Activities

¹Samara National Research University, Samara (Russia)

²Siberian State Industrial University, Novokuznetsk (Russia)

³Belgorod State National Research University, Belgorod (Russia)

*E-mail: zorin.ia@ssau.ru

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9349-2494>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3875-7749>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1113-0807>

⁷ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9468-8736>

⁸ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

Received 03.08.2023

Accepted 20.11.2023

Abstract: The purpose of the work is to study the influence of hafnium additives on the mechanical properties and thermal stability of particles at elevated temperature during heat treatment of aluminum alloys with a high magnesium content. Two modifications of 1570 alloy were chosen for the study: without hafnium content and with its addition of 0.5 % by weight. Both alloys were subjected to homogenizing annealing at a temperature of 440 °C with different exposure modes, which ranged from 2 to 100 h. Microhardness was studied for various heat treatment modes, and the fine microstructure was studied as well using transmission microscopy. As a result, it was possible to identify that during annealing at a short exposure time (2–8 h), the alloy with the hafnium addition has higher microhardness values exceeding those of 1570 alloy by an average of 20 HV units. This is associated with the fact that in 1570 alloy with hafnium additives, during heat treatment, the number of precipitated particles increases while their average size decreases compared to the base alloy. At the same time, in 1570 alloy without hafnium content, when annealed at a temperature of 440 °C, there is no increase in microhardness. This is caused by the fact that in 1570 alloy without hafnium content, when cooled after casting, discontinuous decomposition occurs, which resulted in the fact that most of the scandium precipitates from the supersaturated solid solution in the form of dispersoids. This phenomenon is not observed in the alloy with hafnium additives, which indicates its ability to stop discontinuous decomposition during cooling the ingot after casting.

Keywords: aluminum alloys; transition metals; scandium; hafnium; heat treatment; strengthening nanoparticles.

Acknowledgments: The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 22–29–01506, <https://rscf.ru/project/22-29-01506/>.

The work was carried out using the equipment of the Common Use Center “Technologies and Materials of the National Research University BelSU”.

For citation: Zorin I.A., Aryshenskiy E.V., Kudryavtsev E.A., Drits A.M., Konovalov S.V. The influence of hafnium on high-magnesium alloys doped with transition metals during heat treatment. *Frontier Materials & Technologies*, 2024, no. 1, pp. 29–36. DOI: [10.18323/2782-4039-2024-1-67-3](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2024-1-67-3).