

Оригинальная статья

УДК 536.425:539.25

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-4(46)-98-106

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И НАНОЧАСТИЦ
НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА**

© 2023 г. Хамид Мохаммед Махан^{1, 2}

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34)

²Средний технический университет (Ирак, 10074, Багдад)

Аннотация. Изучены микроструктура и механические свойства матричного композита на основе алюминиевого сплава AA2024, армированного наночастицами TiO₂. Интерметаллид AlMgCu сформирован в алюминиевой матрице, укрепленной наночастицами TiO₂ с различными концентрациями (0, 2,5, 5,0 и 7,5 %), полученными с использованием технологии литья с перемешиванием. Процесс литья с перемешиванием сопровождался последующей термообработкой при 500 °С. Затем сплав быстро охлаждали в воде до температуры 25 °С и проводили старение при 185 °С в течение 3 ч. Такая обработка приводит к растворению наночастиц титана в матрице, формируются ультрадисперсные соединения вокруг зерен алюминиевого композита. Согласно полученным результатам соединения Al₇Cu₂Fe и Al(Cu, Mn, Fe, Si) формируют единую структуру в междендритных областях. При добавлении до 2,5 % оксида титана количество мелких игольчатых выделений Al – Cu – Mg вблизи междендритных областей увеличивалось, но дальнейшее добавление оксида титана уменьшало их количество в этой зоне. После термообработки с добавкой до 7,5 % оксида титана игольчатые выделения Al – Cu – Mg в междендритных областях исчезали и выпадали во внутренней зоне дендритов. При добавлении TiO₂ и проведении термообработки непрореагировавшие интерметаллиды и Al₃Ti полностью превращались в Al₃MgCu. С увеличением содержания TiO₂ от 5,0 до 7,5 % вместо выделений Al₂CuMg в алюминиевой матрице образовывались выделения Al₆Mg₄Cu. Добавление 5 % оксида титана повышает твердость композита примерно на 33 % по сравнению с образцами без наночастиц оксида титана.

Ключевые слова: алюминиевая матрица, интерметаллические соединения, наночастицы, твердость, микроструктура, процесс литья, титан

Для цитирования: Махан Х.М. Влияние термической обработки и наночастиц на микроструктуру и механические свойства алюминиевого сплава. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;(4(46)):98–106. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4\(46\)-98-106](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4(46)-98-106)

Original article

**INFLUENCE OF HEAT TREATMENT AND NANOPARTICLES ON
MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOY**

© 2023 Hamid M. Mahan

¹Samara National Research University (34, Moskovskoye Shosse, Str. Samara, 443086, Russian Federation)

²Technical Institute of Baquba, Middle Technical University (Baghdad 10074, Iraq)

Abstract. The microstructure and mechanical properties of a matrix composite based on aluminum alloy AA2024 reinforced with TiO₂ nanoparticles have been studied. AlMgCu intermetallic compound is formed in an aluminum matrix reinforced with TiO₂ nanoparticles with various concentrations (0, 2.5, 5.0 and 7.5 %) obtained using mixing casting technology. The mixing casting process was followed by subsequent heat treatment at 500 °C. The

alloy was then rapidly cooled in water to a temperature of 25 °C and aged at 185 °C for 3 hours. This treatment leads to the dissolution of titanium nanoparticles in the matrix, and ultrafine compounds are formed around the grains of the aluminum composite. According to the results obtained, the compounds Al_7Cu_2Fe and $Al(Cu, Mn, Fe, Si)$ form a single structure in the interdendritic regions. When adding up to 2.5 % titanium oxide, the number of fine needle-like Al – Cu – Mg secretions near the dendritic regions increased, but further addition of titanium oxide reduced their number in this zone. After heat treatment with the addition of up to 7.5 % titanium oxide, needle-like Al – Cu – Mg secretions in the dendritic regions disappeared and fell out in the inner zone of the dendrites. When TiO_2 was added and heat treatment was carried out, the unreacted intermetallics and Al_3Ti were completely converted into Al_3MgCu . With an increase in the TiO_2 content from 5.0 to 7.5 %, instead of Al_2CuMg secretions, Al_6Mg_4Cu secretions were formed in the aluminum matrix. The addition of 5 % titanium oxide increases the hardness of the composite by about 33 % compared to samples without titanium oxide nanoparticles.

Keywords: aluminum matrix, intermetallic compounds, nanoparticles, hardness, microstructure, casting process, titanium

For citation: Mahan H.M. Influence of heat treatment and nanoparticles on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloy. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;(4(46)):98–106. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4\(46\)-98-106](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4(46)-98-106)

Введение

В последние годы особое внимание уделяется прочному и легкому материалу – алюминию – как подходящей альтернативе стали или чугуна в различных отраслях промышленности [1]. Одним из способов обеспечения особых свойств (в том числе высокой прочности и хорошей износостойкости) алюминиевых сплавов является изготовление матричных композитов (АМК) с использованием керамического армирования. Существуют различные методы изготовления этих материалов: порошковая металлургия, литье [2]. Каждый из этих методов имеет свои недостатки. Например, процесс порошковой металлургии является дорогостоящим [3]. Процесс литья проще и дешевле, однако существует проблема слабой смачиваемости керамических частиц алюминиевой матрицей. Решение этой проблемы возможно путем покрытия керамических частиц металлом [4].

Образование хрупких реакционноспособных продуктов на границе армирования и матрицы снижает механические свойства композита. Различными исследователями изучается метод, заключающийся в добавлении металлических частиц во время перемешивания расплавленного алюминия. В зависимости от степени растворимости в алюминии металлические частицы обычно делят на две группы: частицы с низкой растворимостью (такие как никель, титан и вольфрам), частицы с высокой растворимостью (такие как цинк) [5]. Первая группа считается армирующим материалом в композитах с алюминиевой матрицей из-за его более высокой прочности и жесткости по сравнению с алюминием. При анализе доступной литературы обнаружено, что влияние добавления титана в сплавы Al – Cu – Mg при литье с перемешиванием

тщательно не исследовалось. Исследование, проведенное Кришна и соавторами [6], касается изготовления композита А356, армированного частицами меди. В этой работе для производства композита использовался метод литья с перемешиванием. Изготовленные АМС с использованием технологии литья с перемешиванием, усиленные наночастицами TiO_2 , обладают большими твердостью, пределом прочности при растяжении, пределом текучести, модулем упругости и пластичностью по сравнению со сплавом А356 без армирования.

В работе [7] исследовано влияние добавления кальция на сплав АА7178. Используются методы литья с перемешиванием и полутвердое литье для производства АМС. Изготовленный композит обладает более высокими прочностью и деформационным упрочнением, чем матричный сплав АА7178. В работе [8] исследовано влияние термообработки старением и скорости перемешивания на структуру композита А390/10 % Mg (по массе), полученного методом полутвердого литья. Термообработка старением приводит к образованию сферических зерен $\alpha-Al$ в матрице композита. Учитывая их особые характеристики (такие как высокая прочность и коррозионная стойкость, превосходная стойкость к окислению при высоких температурах, высокий модуль упругости) интерметаллиды на основе Al – Ni являются отличным вариантом для армирования в АМС [9]. Диви [10] указал, что повышение микротвердости и износостойкости армированного никелем матричного композита АА7075, полученного методом литья с перемешиванием, может быть связано с образованием в матрице интерметаллических соединений Al_3Ni . В работе [11] исследовано влияние термообработки Т6 на коррозионное поведение матричного композита

AA6061, армированного никелевым порошком, композит изготавливали методом литья с перемешиванием. Обнаружено, что увеличение содержания никеля привело к росту тока коррозии и снижению сопротивления поляризации как в литом, так и в термообработанном образце.

Обзор доступных ресурсов показывает, что эффект добавления титана в сплавы Al – Cu – Mg, полученные путем литья с перемешиванием, не изучался. Алюминиевые сплавы AA2024 представляют собой серию сплавов Al – Cu – Mg, в которых медь играет роль основного легирующего элемента, а выделения (Al_2Cu Mg) и θ (Al_2Cu) играют ключевую роль в процессе упрочнения. Добавление титана в сплавы этой группы может способствовать образованию алюминидов титана, которые обладают высокими твердостью и прочностью. Диоксид титана обладает высокой термической стабильностью, что позволяет алюмоматричным композитам сохранять свои свойства при высоких температурах [12 – 14] и может повысить термическую нестабильность этих алюминиевых сплавов. Равномерное распределение частиц и снижение пористости способствует улучшению механических свойств алюминиевого композитного материала по сравнению с литой структурой. В настоящей работе осуществляли добавление в алюминиевый расплав AA2024 наночастиц оксида титана в различном количестве и обработку композита литьем с перемешиванием. Исследовано влияние термообработки на микроструктуру, фазовый состав и механические свойства алюминиевых сплавов AA2024, армированных наночастицами TiO_2 .

Материалы и методы исследования

В настоящем исследовании в качестве матрицы использовался алюминиевый сплав AA2024 следующего химического состава: 1,04 % Mg; 0,098 % Si; 5,5 % Cu; 0,62 % Mn; 0,03 % Ti; 0,008 % Cr; 0,11 % Zn; 0,25 % Fe; остальное – Al (по массе). В качестве упрочняющих использовались частицы оксида титана с размером частиц 30 ± 5 нм. Физико-химические свойства наночастиц TiO_2 : плотность $4,23 \text{ г/см}^3$; состав 59,93 % Ti, 40,07 % O₂; размер 30 ± 5 нм; температура плавления $1843 \text{ }^\circ\text{C}$; точка кипения $3200 \text{ }^\circ\text{C}$; структура кристалла – тетрагональная.

Использовались наночастицы армирующего материала TiO_2 чистотой 99,8 % и размером 30 ± 5 нм производства Китая (Changsha Santech Co.). Процесс литья был сформирован с использованием литья с перемешиванием. Разливку с перемешиванием проводили при скорости 300 об/мин с использованием двигателя мощностью 3 л.с. Перемешивание проводили в течение 20 мин при температуре $750 \text{ }^\circ\text{C}$. Для плавки материала использовали электрическую печь, снабженную графитовым тиглем. Для исследования влияния массовой доли титана в расплав алюминия добавляли нанопорошок оксида титана в количестве 2,5, 5,0 и 7,5 % (по массе).

Схема печи для плавки с мешалкой с возможностью подачи нанопорошка в расплавленный металл показана на рис. 1. Расплавленный материал заливали в цилиндрическую форму диаметром 14 мм и длиной 200 мм. Гомогенизационную термическую обработку проводили при температуре $500 - 510 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 3 ч. После закалки образцы подвергались старению. На

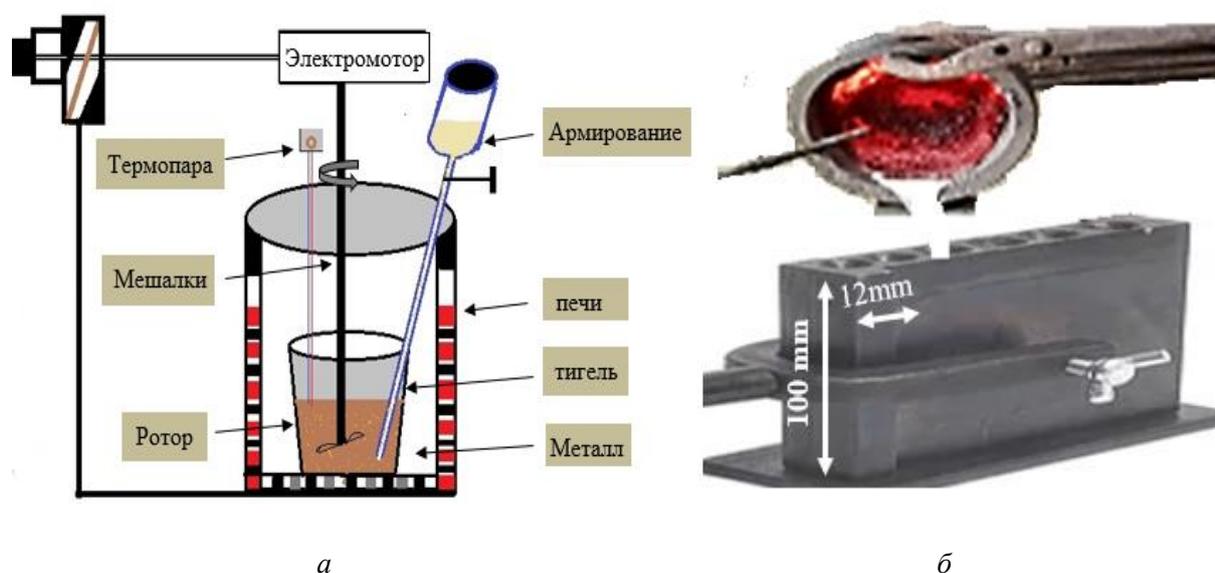


Рис. 1. Схема печи для плавки с мешалкой (а) и литейная форма (б)
Fig. 1. The stir casting furnace for melting (a) and the casting mould (б)

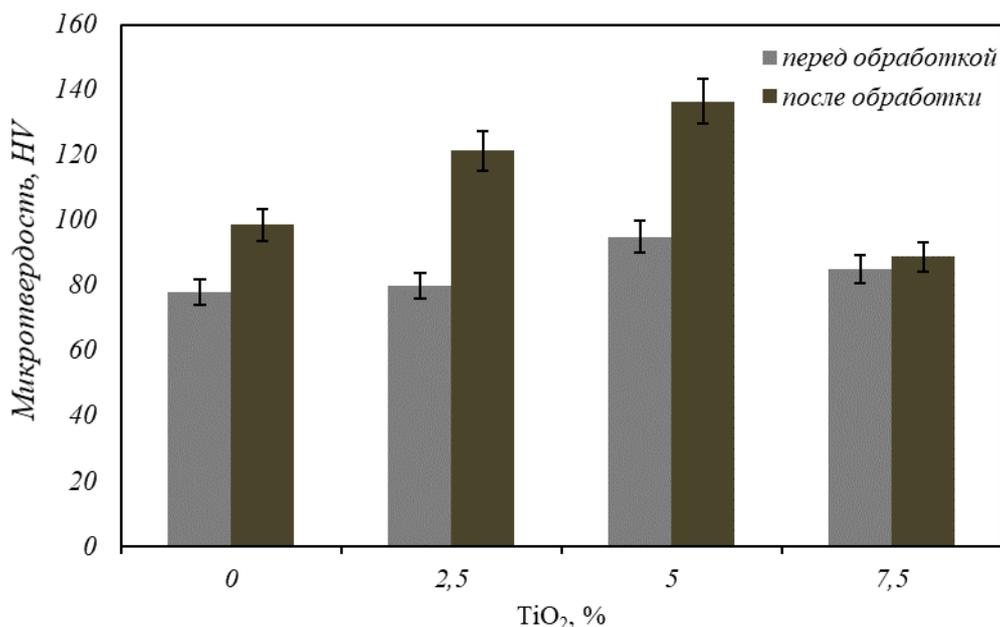


Рис. 2. Влияние наночастиц на твердость композита AA2024 до и после термической обработки
Fig.2. Effect of nanoparticles on the hardness of composite AA2024 before and after heat treatment

этом этапе их нагревали до 180 °С в печи с циркуляцией воздуха и выдерживали при этой температуре в течение 3 ч. Затем образцы охлаждали на воздухе.

После охлаждения все образцы испытывали на твердость. Выполнена статистическая обработка результатов. Все эксперименты проводились в соответствии с американскими стандартами (ASTM). Для определения твердости образцов использовали цифровой анализатор твердости по Виккерсу (Laryee HBRVS–18705). Для исследования микроструктуры образцов использовали сканирующий электронный микроскоп TESCANVEGA. Реактив Кролла ($H_2O:HNO_3:HF = 92:6:2$) использовали для травления образцов в поперечном сечении в течение 15 с. Рентгенофазовый анализ был выполнен для изучения структуры фаз и выделений, выявленных с помощью СЭМ. Эти результаты были получены на приборе ДРОН-7.

Результаты и обсуждение

Твердость

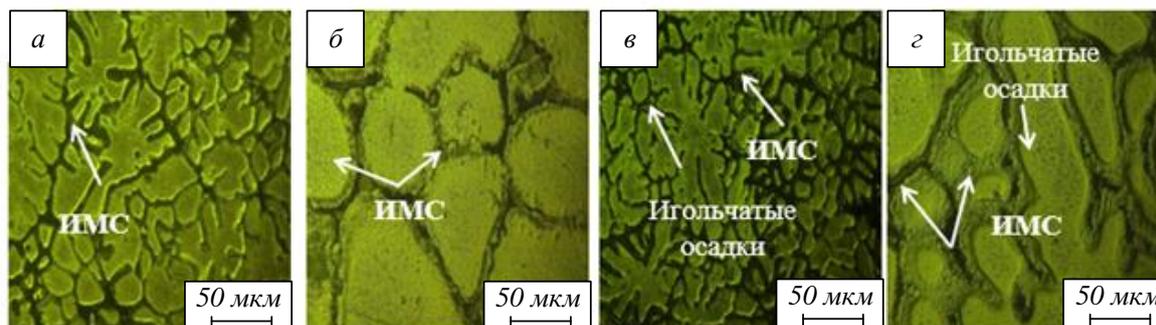
На рис. 2 показана твердость по Виккерсу различных образцов до и после термообработки. Твердость всех образцов после термообработки увеличилась по сравнению с литым состоянием. Однородность микроструктуры, а также более равномерное распределение выделений Al_2CuMg в сплавах AA2024 могут быть причинами повышения твердости. При добавлении

большого количества наночастиц оксида титана твердость композита в литом состоянии увеличивается.

Поскольку интерметаллиды на основе Al – Ti обладают высокой твердостью [15, 16], ожидается, что образование интерметаллидов будет основным фактором повышения твердости за счет добавления в композиты наночастиц.

Сравнение двух образцов (без добавления наночастиц оксида титана и с содержанием 2,5 % таких частиц) показывает, что твердость после термообработки в образце с содержанием 2,5 % TiO_2 немного выше (121 НВ), чем в образце без TiO_2 (97 НВ). В результате не происходит существенного увеличения твердости по сравнению с образцом без добавления TiO_2 после термообработки. При увеличении содержания оксида титана до 5 % твердость значительно увеличилась (до 137 НВ). Хотя присутствие оксида титана в этом образце может уменьшить выделение соединений Al_2CuMg , образование большого количества богатых титаном интерметаллических соединений привело к значительному увеличению твердости после термообработки. Дальнейшее увеличение содержания оксида титана до 7,5 % привело к снижению твердости до 90 НВ после термообработки, хотя образуется больше интерметаллических соединений, богатых титаном (согласно микроструктуре, показанной на рис. 3).

До термической обработки



После термической обработки

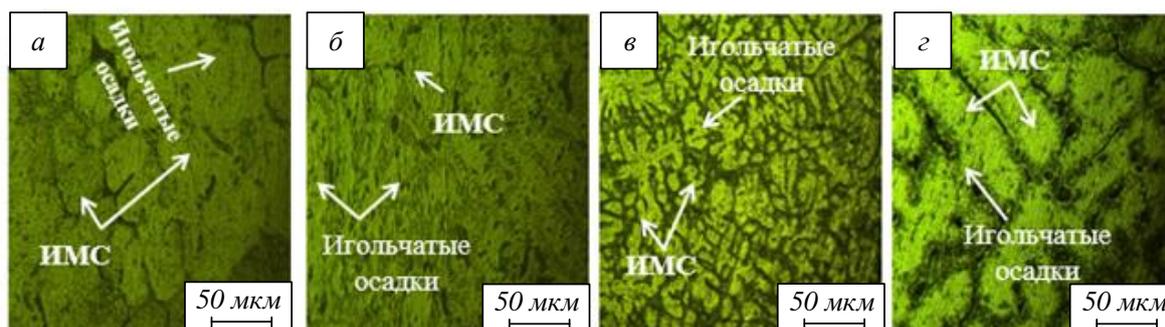


Рис. 3. Результаты оптической микроскопии (ИМС – интерметаллические соединения):

а – без TiO_2 ; б – 2,5 % TiO_2 ; в – 5,0 % TiO_2 ; г – 7,5 % TiO_2

Fig.3. Results of optical microscopy (ИМС – intermetallic compounds):

а – без TiO_2 ; б – 2,5 % TiO_2 ; в – 5,0 % TiO_2 ; г – 7,5 % TiO_2 **Микроструктурный анализ**

На рис. 3 приведены оптические микроскопические изображения микроструктур различных образцов до и после термообработки. В образце без добавки наночастиц оксида титана в литейном состоянии наблюдается эвтектическая структура, а также интерметаллические соединения (ИМС), образующиеся в междимерных областях. Мелкие игольчатые выделения также образовались вблизи междендритных областей. Более того, по всей микроструктуре была разбросана структура игольчатой формы. После термообработки эвтектическая структура исчезла, но в междендритных областях по-прежнему наблюдаются блочные интерметаллиды.

Кроме того, во внутренней части дендритов создается большое количество мелких выделений, так что вокруг междендритных областей образуется зона, свободная от выделений. Кроме того, интерметаллические соединения, образующиеся в междимерных областях, теряют свою интегрированную структуру и превращаются в отдельные островки.

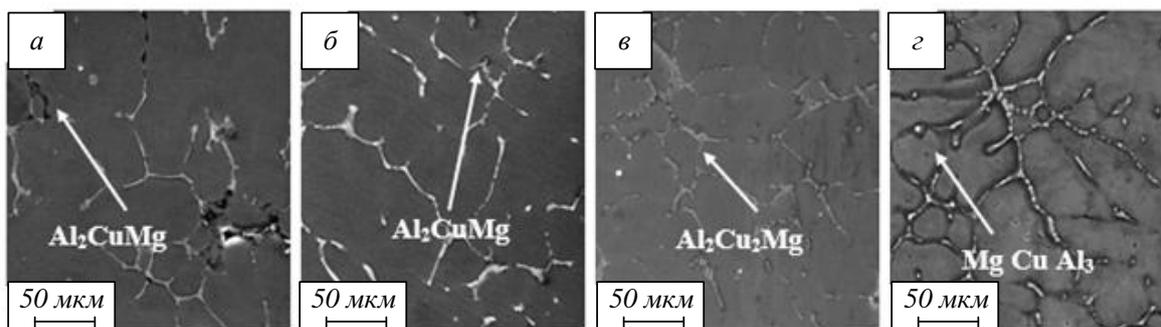
Можно отметить, что наиболее однородные выделения наблюдаются при добавлении 2,5 и 5 % TiO_2 . Равномерное распределение этих частиц и меньшая пористость привели к улучше-

нию механических свойств алюминиевого композитного материала по сравнению с литой матрицей [17].

С добавкой оксида титана до 5,0 % количество мелких игольчатых выделений вблизи междимерной области увеличилось, но увеличение количества добавки до 7,5 % уменьшило количество таких выделений в этой зоне. После термообработки соединения металлов, образовавшиеся в междендритных областях, теряют свою единую структуру и переходят в отдельные структуры. Однако замечено, что доля этих интерметаллических соединений увеличивается с ростом содержания титана. Важно отметить, что после термообработки с добавкой до 7,5 % оксида титана игольчатая структура в междимерных областях исчезает и выпадает во внутренней зоне дендритов. В отличие от образцов, содержащих 2,5 % добавок, темные полосовидные интерметаллиды в образце с 5 % оксида титана сохраняют свою полосовидную морфологию даже после термообработки [18].

Для более точной оценки микроструктуры и образующихся в ней интерметаллидов на рис. 4 приведены СЭМ структур различных образцов. Микроструктура образца без добавки наночастиц

До термической обработки



После термической обработки

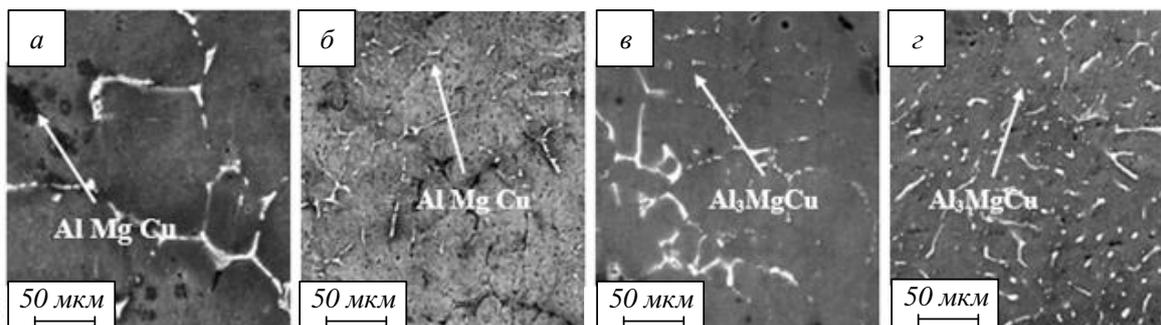


Рис. 4. Микроструктура сплава (СЭМ):
 а – без добавки TiO_2 ; б – 2,5 % TiO_2 ; в – 5 % TiO_2 ; г – 7,5 % TiO_2
 Fig. 4. Microstructure of the alloy (SEM results):
 а – 0 % TiO_2 ; б – 2.5 % TiO_2 ; в – 5 % TiO_2 ; г – 7.5 % TiO_2

в литом состоянии содержит выделения и интерметаллиды Al_2CuMg , $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ и $\text{Al}(\text{Cu}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Si})$. Игольчатые выделения в междендритных областях представляют собой фазу Al_2CuMg . После термообработки (рис. 4, б), эти выделения стали более мелкими, вблизи междендритных областей образовалась полоса без включений. Формирование этой полосы можно объяснить применением тепла во время термообработки, что обеспечивает возможность диффузии элементов меди в богатые железом интерметаллические соединения. Поэтому в междендритных областях формируется бедная по медному элементу область, что препятствует образованию в этой зоне преципитатов Al_2CuMg . Как видно, эвтектическая структура Al_2CuMg исчезла после термообработки, а междимерные области окружены отдельными интерметаллидами $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ и $\text{Al}(\text{Cu}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Si})$ [19].

Поскольку температура растворения этих интерметаллических соединений намного выше температуры термообработки, эти соединения не могут растворяться в структуре. Как сообщают другие исследователи [20], частицы $\text{Al}(\text{Cu}, \text{Mg}, \text{Si})$ являются обычными вторичными частицами в алюминиевых сплавах AA2024. Эти частицы наблюдаются в микроструктуре образцов без добавки наночастиц оксида титана как в литом состоянии, так и после термообработки. Как

видно, обработка гомогенизацией не изменяет их морфологию.

На рис. 4, в показана микроструктура образца с добавкой 5 % наночастиц после обработки гомогенизацией. При добавлении оксида титана и проведении термообработки в микроструктуре образуется интерметаллид Al_3MgCu . Этот интерметаллид зародился на соединениях $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ и $\text{Al}(\text{Cu}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Si})$. В междимерных областях образуются соединения Al Cu , $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ и $\text{Al}(\text{Cu}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Si})$.

Для сравнения на рис. 4, в, г показаны СЭМ микроструктуры композита, содержащего 5 % добавки оксида титана до и после термообработки. Как видно, аналогично образцу без титана наблюдается структура эвтектики Al_2CuMg , $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ и $\text{Al}(\text{Cu}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Si})$ [21].

Присутствие этих наночастиц играет важную роль в уменьшении размера зерна, улучшении механических свойств, влиянии на характер осаждения и повышении термической стабильности. Наночастицы действуют как центры зародышеобразования для рекристаллизации, способствуя формированию более мелких и равномерно распределенных зерен. Это приводит к уменьшению размера зерна и созданию более однородной микроструктуры. Кроме того, присутствие наночастиц может изменить предпочтительную кристаллографическую ориентацию зерен во время процессов затвердевания и деформации, что может повлиять на текстуру сплава.

Выводы

После термообработки интерметаллические соединения, образовавшиеся в междимерных областях, потеряли свои интегрированные структуры и превратились в отдельные структуры. Однако было замечено, что доля этих интерметаллических соединений увеличивается с увеличением количества наночастиц.

Вследствие высокой способности интерметаллического соединения Al – Ti адсорбировать медь и тенденции к образованию интерметаллида Al_3MgCu , в междендритных областях образуется бедная медью область, что препятствует образованию в этой зоне преципитатов Al_2CuMg .

Хотя добавление наночастиц в количестве до 5 % может уменьшить количество включений Al_2CuMg , образование большого количества богатых титаном интерметаллических соединений приводит к значительному увеличению твердости и прочности после термообработки.

При увеличении количества наночастиц с 5 до 7,5 % осаждение выделений Al_2CuMg в алюминиевой матрице и увеличение пористости приводят к снижению твердости и прочности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gnanavelbabu A., Surendran K.T.S., Kumar S. Process optimization and studies on mechanical characteristics of AA2014/ Al_2O_3 nanocomposites fabricated through ultrasonication assisted stir-squeeze casting. *International Journal of Metal casting*. 2022;16(2):759–782. <https://doi.org/10.1007/s40962-021-00634-3>
- Liu F., Zhu X., Ji S. Effects of Ni on the microstructure, hot tear and mechanical properties of Al–Zn–Mg–Cu alloys under as-cast condition. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020; 821:153458. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153458>
- Aynalem G.F. Processing methods and mechanical properties of aluminum matrix composites. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020;2020:1–19. <https://doi.org/10.1155/2020/3765791>
- Ramesh R., Roseline V.A., Gowrishankar. Production and characterization of aluminum metal matrix composite reinforced with Al_3Ni by stir and squeeze casting. *Applied Mechanics and Materials*. 2015;766–767:315–319. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.766-767.315>
- Op A.R.N., Arul S. Effect of nickel reinforcement on micro hardness and wear resistance of aluminum alloy Al7075. *Materials Today: Proceedings*. 2020; 24:1042–1051. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.418>
- Krishna M.G., Kumar K.P., Swapna M.N., Rao J.B., Bhargava N.R.M.R. Fabrication, characterization and mechanical behavior of A356/copper particulate reinforced metallic composites. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(2):7685–7691. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.444>
- Mondal D.P., Jha N., Badkul A., Das S., Yadav M.S., Jain P. Effect of calcium addition on the microstructure and compressive deformation behavior of 7178 aluminum alloy. *Materials & Design*. 2011;32(5):2803–2812. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.12.056>
- Hekmat-Ardakan A., Ajersch F. Effect of isothermal ageing on the semi-solid microstructure of reprocessed and partially remelted of A390 alloy with 10 % Mg addition. *Materials characterization*. 2010;61(8):778–785. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.04.012>
- Махан Х.М., Коновалов С.В., Панченко И.А., Пашкова Д.Д. Исследование свойств и структуры алюмоматричных композитов, армированных частицами TiO_2 . *Ползуновский вестник*. 2022;4–2:7–13. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.001>
- Deevi S.C., Sikka V.K. Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications. *Intermetallic*. 1996;4(5):357–375. [https://doi.org/10.1016/0966-9795\(95\)00056-9](https://doi.org/10.1016/0966-9795(95)00056-9)
- Vishwanatha A.D., Panda B., Shivanna D.M. Effect of a T6 aging treatment on the corrosion behavior of in-situ $AlxNi_y$ reinforced AA6061 composite. *Materials Today: Proceedings*. 2021;44(6):4112–4117. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.455>
- Xiao L., Yu H., Qin Y., Liu G., Peng Z., Tu X., Zhao X. The evolution of microstructure and mechanical properties at elevated temperature of cast Al–Li–Cu–Mg alloys with Ni addition. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020; 9:11069–11079. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.098>
- Han J.Q., Wang J.S., Zang M.-S., Niu K.M. Relationship between amounts of low-melting-point eutectics and hot tearing susceptibility of ternary Al–Cu–Mg alloys during solidification. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2020;30(9):2311–2325. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65381-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65381-X)
- Mahan H.M., Kononov S.V., Osintsev K., Panchenko I. The influence of TiO_2 nanoparticles on the mechanical properties and microstructure of AA2024 aluminum alloy. *Materials and Technology*. 2023;57(4):379–384. <https://doi.org/10.17222/mit.2023.898>

15. Gxowa-Penxa Z., Daswa P., Modiba R., Mathabathe M.N., Bolokang A.S. Development and characterization of Al–Al₃Ni–Sn metal matrix composite. *Materials Chemistry and Physics*. 2021; 259:124027. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124027>
16. Mahan H.M., Konovalov S.V., Panchenko I. Effect of heat treatment on the mechanical properties of the aluminium alloys AA2024 with nanoparticles. *International Journal of Applied Science and Engineering*. 2023;20(2):2022324. [https://doi.org/10.6703/IJASE.202306_20\(2\).011](https://doi.org/10.6703/IJASE.202306_20(2).011)
17. Mohamed A.M.A., Samuel F.H., Al kahtani S. Microstructure, tensile properties and fracture behavior of high temperature Al–Si–Mg–Cu cast alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2013;577: 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.03.084>
18. Mahan H.M., Konovalov S.V., Panchenko I., Al-Obaidi M.A. The effects of titanium dioxide (TiO₂) content on the dry sliding behaviour of AA2024 aluminium composite. *Journal of Mechanical Engineering*. 2023;20(3):1823–5514. <https://doi.org/10.24191/jmeche.v20i3.23910>
19. Wang, Y., Lu, Y., Zhang, S., Zhang, H., Wang, H., Chen, Z. Characterization and strengthening effects of different precipitates in Al-7Si-Mg alloy *Journal of Alloys and Compounds*. 2021; 885: 161028. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161028>
20. Taylor R.P., McClain S.T., Berry J.T. Uncertainty analysis of metal-casting porosity measurements using Archimedes' principle. *International Journal of Cast Metals Research*. 1999;11(4):247–257. <https://doi.org/10.1080/13640461.1999.11819281>
21. Farajollahi R., Aval H.J., Jamaati R. Effects of Ni on the microstructure, mechanical and tribological properties of AA2024-Al₃NiCu composite fabricated by stir casting process. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021; 887:161433. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161433>
22. Mahan H.M., Konovalov S.V., Najm S.M., Mihaela O., Trzpieciński T. Experimental and numerical investigations of the fatigue life of AA2024 aluminum alloy-based nanocomposite reinforced by TiO₂ nanoparticles under the effect of heat treatment. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2023;1-13.<https://doi.org/10.1007/s12541-023-00906-4>
23. Liu F., Zhu X., Ji S. Effects of Ni on the microstructure, hot tear and mechanical properties of Al–Zn–Mg–Cu alloys under as-cast condition. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020; 821:153458. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153458>
24. Aynalem G.F. Processing methods and mechanical properties of aluminum matrix composites. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020;2020:1–19. <https://doi.org/10.1155/2020/3765791>
25. Ramesh R., Roseline V.A., Gowrishankar. Production and characterization of aluminum metal matrix composite reinforced with Al₃Ni by stir and squeeze casting. *Applied Mechanics and Materials*. 2015;766–767:315–319. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.766-767.315>
26. Op A.R.N., Arul S. Effect of nickel reinforcement on micro hardness and wear resistance of aluminum alloy Al7075. *Materials Today: Proceedings*. 2020; 24:1042–1051. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.418>
27. Krishna M.G., Kumar K.P., Swapna M.N., Rao J.B., Bhargava N.R.M.R. Fabrication, characterization and mechanical behavior of A356/copper particulate reinforced metallic composites. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(2):7685–7691. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.444>
28. Mondal D.P., Jha N., Badkul A., Das S., Yadav M.S., Jain P. Effect of calcium addition on the microstructure and compressive deformation behavior of 7178 aluminum alloy. *Materials & Design*. 2011;32(5):2803–2812. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.12.056>
29. Hekmat-Ardakan A., Ajersch F. Effect of isothermal ageing on the semi-solid microstructure of reprocessed and partially remelted of A390 alloy with 10% Mg addition. *Materials characterization*. 2010;61(8):778–785. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.04.012>
30. Mahan H.M., Konovalov S.V., Panchenko I.A., Pashkova D.D. Investigation of the properties and structure of aluminum matrix composites reinforced with TiO₂ particles. *Polzunovsky bulletin*. 2022;4–2:7–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.001>
31. Deevi S.C., Sikka V.K. Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications. *Intermetallics*. 2002;10(12):1203–1215. [https://doi.org/10.1016/S1062-7202\(02\)00081-9](https://doi.org/10.1016/S1062-7202(02)00081-9)

REFERENCES

1. Gnanavelbabu A., Surendran K.T.S., Kumar S. Process optimization and studies on mechanical characteristics of AA2014/Al₂O₃ nanocom-

- 1996;4(5):357–375. [https://doi.org/10.1016/0966-9795\(95\)00056-9](https://doi.org/10.1016/0966-9795(95)00056-9)
11. Vishwanatha A.D., Panda B., Shivanna D.M. Effect of a T6 aging treatment on the corrosion behavior of in-situ AlxNiy reinforced AA6061 composite. *Materials Today: Proceedings*. 2021;44(6):4112–4117. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.455>
 12. Xiao L., Yu H., Qin Y., Liu G., Peng Z., Tu X., Zhao X. The evolution of microstructure and mechanical properties at elevated temperature of cast Al–Li–Cu–Mg alloys with Ni addition. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020; 9:11069–11079. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.098>
 13. Han J.Q., Wang J.S., Zang M.-S., Niu K.M. Relationship between amounts of low-melting-point eutectics and hot tearing susceptibility of ternary Al–Cu–Mg alloys during solidification. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2020;30(9):2311–2325. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65381-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65381-X)
 14. Mahan H.M., Konovalov S.V., Osintsev K., Panchenko I. The influence of TiO₂ nanoparticles on the mechanical properties and microstructure of AA2024 aluminum alloy. *Materials and Technology*. 2023;57(4):379–384. <https://doi.org/10.17222/mit.2023.898>
 15. Gxowa-Penxa Z., Daswa P., Modiba R., Mathabathe M.N., Bolokang A.S. Development and characterization of Al–Al₃Ni–Sn metal matrix composite. *Materials Chemistry and Physics*. 2021; 259:124027. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124027>
 16. Mahan H.M., Konovalov S.V., Panchenko I. Effect of heat treatment on the mechanical properties of the aluminium alloys AA2024 with nanoparticles. *International Journal of Applied Science and Engineering*. 2023;20(2):2022324. [https://doi.org/10.6703/IJASE.202306_20\(2\).011](https://doi.org/10.6703/IJASE.202306_20(2).011)
 17. Mohamed A.M.A., Samuel F.H., Al kahtani S. Microstructure, tensile properties and fracture behavior of high temperature Al–Si–Mg–Cu cast alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2013;577: 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.03.084>
 18. Mahan H.M., Konovalov S.V., Panchenko I., Al-Obaidi M.A. The effects of titanium dioxide (TiO₂) content on the dry sliding behaviour of AA2024 aluminium composite. *Journal of Mechanical Engineering*. 2023;20(3):1823–5514. <https://doi.org/10.24191/jmeche.v20i3.23910>
 19. Wang, Y., Lu, Y., Zhang, S., Zhang, H., Wang, H., Chen, Z. Characterization and strengthening effects of different precipitates in Al-7Si-Mg alloy *Journal of Alloys and Compounds*. 2021; 885: 161028. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161028>
 20. Taylor R.P., McClain S.T., Berry J.T. Uncertainty analysis of metal-casting porosity measurements using Archimedes' principle. *International Journal of Cast Metals Research*. 1999;11(4):247–257. <https://doi.org/10.1080/13640461.1999.11819281>
 21. Farajollahi R., Aval H.J., Jamaati R. Effects of Ni on the microstructure, mechanical and tribological properties of AA2024-Al₃NiCu composite fabricated by stir casting process. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021; 887:161433. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161433>
 22. Mahan H.M., Konovalov S.V., Najm S.M., Mihaela O., Trzepieciński T. Experimental and numerical investigations of the fatigue life of AA2024 aluminum alloy-based nanocomposite reinforced by TiO₂ nanoparticles under the effect of heat treatment. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2023:1–13. <https://doi.org/10.1007/s12541-023-00906-4>

Сведения об авторах

Хамид Мохаммед Махан, аспирант, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева; инженер кафедры машиностроения, средний технический университет, Технический институт Бакуба
E-mail: hamid19812020@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8421-2996

Information about the authors

Hamid Mohammed Mahan, Postgraduate student, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev; engineer of the Department of Mechanical Engineering, Secondary Technical University, Bakuba Technical Institute
E-mail: hamid19812020@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8421-2996

Поступила в редакцию 29.11.2023

После доработки 05.12.2023

Принята к публикации 08.12.2023

Received 29.11.2023

Revised 05.12.2023

Accepted 08.12.2023