



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Получение нанокмпозиционного материала с матрицей на основе алюминиевого сплава Al-7Si методом механического замешивания в стальную литейную форму с переменной толщиной стенок и исследование его характеристик

Халед Абдельазиз^{1, 2, a}, Далия Сабер^{1, 3, b, *}

¹ Кафедра материаловедения, Факультет машиностроения, Университет Загазига, Загазиг, 44519, Египет

² Кафедра машиностроения, Инженерный колледж, Университет Таиф, Таиф, 21944, Саудовская Аравия

³ Программа промышленного инжиниринга, Кафедра машиностроения, Инженерный колледж, Университет Таиф, Таиф, 21944, Саудовская Аравия

^a  <https://orcid.org/0000-0001-9139-548X>,  kalidelaziz@gmail.com; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-7349-1723>,  daliasaber13@yahoo.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 539.2(075)

История статьи:

Поступила: 26 октября 2024

Рецензирование: 15 ноября 2024

Принята к печати: 28 декабря 2024

Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:

Металломатричные композиты (ММК)
 Толщина стенки литейной формы
 Наночастицы TiO₂
 Механические свойства

АННОТАЦИЯ

Введение. Сплав Al-7Si является одним из ключевых алюминиевых сплавов, поскольку обладает удачным сочетанием литейных и механических свойств. Металломатричные композиты (ММК), армированные керамическими частицами, находят широкое применение в высокотехнологичных отраслях, таких как военная, автомобилестроительная, аэрокосмическая и электротехническая промышленность. **Целями** данного исследования являются: (1) изучение возможности получения композиционных материалов на основе сплава Al-7Si, армированных различным количеством наночастиц TiO₂, с применением метода механического замешивания; (2) исследование влияния толщины стенки литейной формы на микроструктуру и механические свойства сплава Al-7Si в процессе затвердевания; (3) анализ влияния содержания армирующего компонента на механические свойства и износостойкость полученных композиционных материалов. **Методология.** Методом механического замешивания были изготовлены металломатричные композиционные материалы на основе сплава Al-7Si, содержащие 0, 2, 4 и 6 масс. % наночастиц TiO₂. Для металлографических и механических испытаний были подготовлены цилиндрические образцы диаметром 15 мм и длиной 18 мм. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что скорость затвердевания возрастает с увеличением толщины стенки литейной формы. Это приводит к росту скорости охлаждения и, как следствие, к формированию более мелкозернистой структуры. Микроструктура отливки демонстрирует изменение размера зерна от мелкого к крупному при переходе от внешней поверхности (прилегающей к внутренней стенке формы) к внутренней части отливки. В связи с этим микротвердость вблизи внутренней стенки формы оказывается выше. Измерения плотности показывают, что композиты с более высокой массовой долей армирующих частиц имеют большую пористость. В то же время результаты испытаний на твердость и износостойкость свидетельствуют о том, что увеличение содержания частиц TiO₂ приводит к повышению твердости и значительному снижению скорости изнашивания композиционных материалов.

Для цитирования: Абдельазиз Х., Сабер Д. Получение нанокмпозиционного материала с матрицей на основе алюминиевого сплава Al-7Si методом механического замешивания в стальную литейную форму с переменной толщиной стенок и исследование его характеристик // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 155–171. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-155-171.

Введение

Композиционные материалы с металлической матрицей (ММК), в особенности на основе алюминиевых сплавов, в последние годы привлекают все большее внимание автомобильной и аэрокосмической промышленности [1–3]. Сре-

ди матричных материалов для ММК наиболее тщательно изучены сплавы систем Al-Si и Al-Cu [4–7]. Автомобильная и авиационная отрасли, проявляя особый интерес к трибологическим характеристикам, все чаще используют алюминиевые сплавы, упрочненные керамическими частицами [8, 9]. В качестве упрочняющих компонентов алюмоматричных композитов широко применяются различные материалы, включая карбиды, нитриды, бориды, оксиды и интерметаллиды [10, 11]. Существуют три основных

*Адрес для переписки

Сабер Далия, д.т.н., профессор
 Кафедра материаловедения, Факультет машиностроения,
 Университет Загазига,
 44519, Загазиг, Египет
 Тел.: 0096645355163, e-mail: daliasaber13@yahoo.com

подхода к изготовлению подобных композитов: твердофазные, жидкофазные и полужидкофазные методы [12–14].

Для ММК, упрочненных частицами, наиболее часто используемым является метод перемешивания расплавленного металла. Чтобы достичь однородного перемешивания, этот метод предполагает регулирование ряда производственных параметров, таких как температура расплавленного металла, время перемешивания, непрерывная и равномерная скорость частичной подачи в смесь упрочняющего компонента и скорость перемешивания [13]. Метод перемешивания расплавленного металла имеет ряд преимуществ, включая простоту, низкие затраты на обработку, легкий контроль над структурой матрицы и производство изделий, близких к окончательной форме. Однако существенной проблемой, возникающей при использовании этого метода, является низкая смачиваемость керамических частиц, требующая специальных мер для обеспечения надлежащего соединения между упрочняющими частицами и матрицей. Решение этой проблемы необходимо для достижения качественного соединения компонентов и улучшения эксплуатационных характеристик композиционных материалов [3, 9].

TiO₂ является ярким примером керамического материала, широко используемого в ММК и обладающего большим потенциалом в качестве упрочняющего компонента алюминиевых композитов. Алюминиевые сплавы, упрочненные TiO₂, характеризуются повышенной твердостью, что делает их перспективными для широкого спектра применений, включая электронные устройства, автомобильные детали и компоненты аэрокосмической техники. Улучшенные механические свойства материала обеспечивают повышенную стабильность и долговечность в сложных условиях эксплуатации, таких как высокие температуры и агрессивные среды. Подтверждено, что введение TiO₂ в алюминий эффективно улучшает механические свойства и твердость алюминиевых сплавов, расширяя возможности их применения [4, 15–17]. В исследовании Нассара и др. (Nassar et al.) оценены механические, трибологические и структурные характеристики нанокompозита Al/TiO₂, полученного методом порошковой металлургии. Результаты показали равномерное распределение наночастиц TiO₂

в алюминиевой матрице и незначительную пористость. Установлено, что с увеличением содержания наноразмерного TiO₂ повышается предел текучести, износостойкость, предел прочности и твердость нанокompозита [2].

Следует отметить, что TiO₂, как и большинство керамических материалов, характеризуется плохой смачиваемостью расплавленным алюминием [18–20]. Для решения этой проблемы разработаны различные методы улучшения смачивания армирующих частиц матрицей. К ним относятся добавление реакционно-активных элементов, таких как магний, термообработка керамических частиц и нанесение металлических покрытий [4, 19]. На скорость охлаждения отливки влияют такие факторы, как толщина стенок формы, температура заливки и теплоаккумулирующая способность литейной формы [21–23]. Повышение скорости охлаждения оказывает значительное влияние на структуру литого материала, приводя к измельчению зерна и изменению структуры матрицы [24, 25]. Это, в свою очередь, влияет на механические характеристики и повышает склонность к отбелу, что приводит к увеличению твердости, но может снизить прочность и ухудшить обрабатываемость отливок. Эвтектоидное превращение, происходящее после затвердевания, также оказывает влияние на структуру литого сплава.

Цель данного исследования – изучение влияния толщины стенок литейной формы в процессе затвердевания на микроструктуру и механические свойства матрицы сплава Al-7Si. Помимо этого, целью исследования является получение комплексного представления о свойствах и потенциале композиционных материалов на основе сплава Al-7Si, упрочненных частицами TiO₂, для применения в высоконагруженных конструкциях. Для достижения поставленных целей были решены следующие **задачи**:

- исследовано влияние массовой доли упрочняющего компонента TiO₂ на плотность, твердость и износостойкость композитов;
- проведен металлографический анализ микроструктуры, формирующейся в сплаве Al-7Si после литья в стальную форму с различной толщиной стенок;
- определены микротвердость и средний размер зерна в полученных образцах сплава, отлитых в стальные формы с различной толщиной стенок.

Методы

В качестве материала матрицы композитов в данном исследовании использовался доэвтектический сплав Al-7Si. Химический состав сплава приведен в табл. 1. Упрочняющим компонентом служили частицы TiO_2 со средним размером около 80 нм. На рис. 1 представлены результаты рентгенофазового анализа (РФА) нанопорошка TiO_2 , использованного в качестве упрочняющего материала. Массовая доля наночастиц TiO_2 варьировалась и составляла 0, 2, 4 и 6 %. Композиционные материалы получали с использованием специально разработанной электрической муфельной печи, что существенно облегчило процесс их получения. На рис. 2 представлена

схема процесса изготовления образцов из сплава Al-7Si и нанокompозитов. Для проведения эксперимента 400 г сплава Al-7Si загружали в тигель, который затем помещали в электрическую печь сопротивления. Для изготовления образцов, предназначенных для исследования влияния толщины стенок формы на структуру и свойства, расплав сплава Al-7Si заливали в формы из низкоуглеродистой стали с толщиной стенок 8, 12 и 29 мм.

Образцы нанокompозитов с матрицей из сплава Al-7Si и частицами TiO_2 в качестве упрочняющего материала изготавливали с использованием отдельной стальной формы с толщиной стенки 7,5 мм, как показано на рис. 2. Частицы

Таблица 1

Table 1

Химический состав сплава A356, использованного в качестве матрицы в ММК
Chemical composition of A356 alloy used as the matrix in the MMCs

| Химический состав элементов, % | | | | | | | |
|--------------------------------|-----|-----|------|-------|------|------|------|
| Al | Si | Mg | Mn | Cu | Zn | Ni | Fe |
| Осн. | 7,1 | 0,5 | 0,01 | 0,316 | 0,04 | 0,01 | 0,14 |

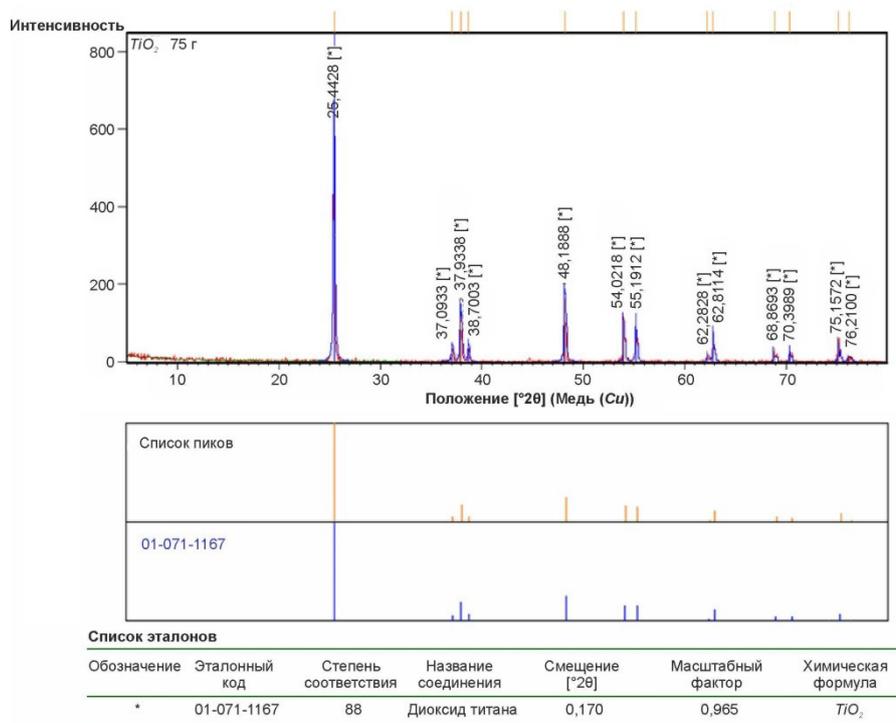


Рис. 1. Результат качественного рентгенофазового анализа нанодиоксида титана (TiO_2)

Fig. 1. Result of qualitative XRD analysis of nano-titanium oxide (TiO_2)

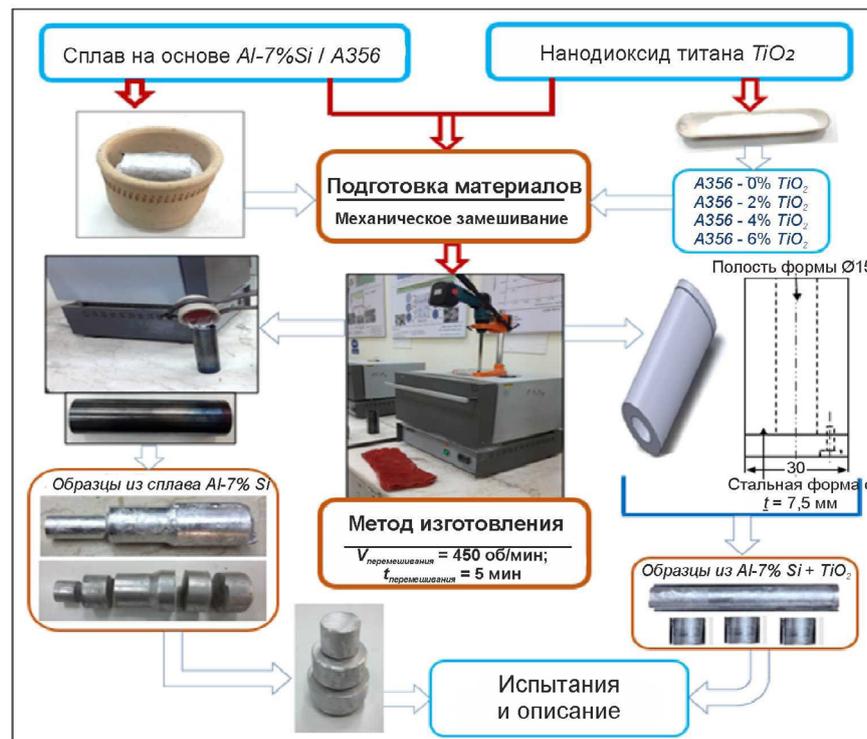


Рис. 2. Блок-схема и схематическое изображение, демонстрирующие последовательность этапов изготовления в рамках настоящего исследования

Fig. 2. Flowchart and schematic representation detailing the fabrication sequence of the present study

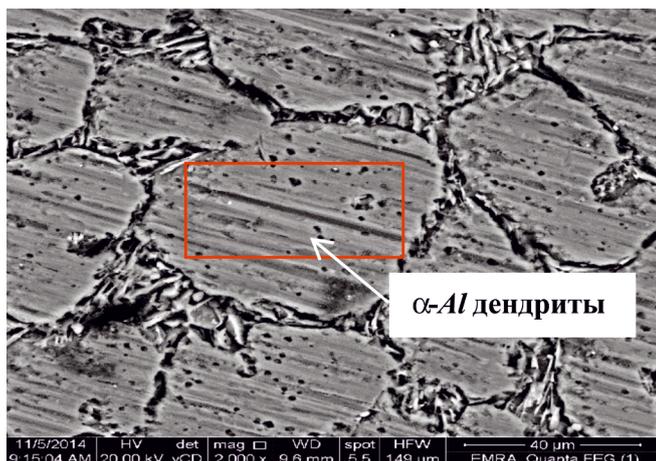
TiO_2 вводили в расплав с постоянной скоростью 5 г/мин. После завершения подачи частиц расплав перемешивали в течение 5 минут со скоростью 450 об/мин. Для повышения смачиваемости между упрочняющим компонентом и матрицей в расплав добавляли 1 % магния. Частицы TiO_2 перед введением в расплав подвергали предварительному нагреву при температуре 700 °C в течение 2 часов, что способствовало улучшению их смачиваемости. После изготовления литые образцы были подготовлены для дальнейшего изучения механических свойств и микроструктуры. Для подготовки металлографических шлифов образцы подвергали последовательной шлифовке и полировке, используя абразивную бумагу SiC с зернистостью от 150 до 1200. Для выявления микроструктурных составляющих образцы травили раствором, содержащим 75 мл HCl, 25 мл HNO_3 , 5 мл HF и 25 мл H_2O .

Для анализа микроструктуры поверхности образцов использовалась оптическая микроскопия и сканирующая электронная микроскопия (СЭМ). Определение размера зерна проводили в соответствии со стандартом ASTM E112.

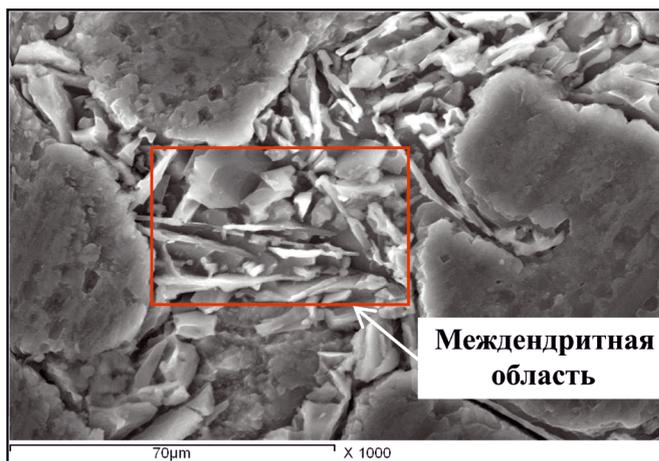
Микротвердость измеряли на микротвердомере VHS-1000 при нагрузке 100 г, используя шлифованные и полированные образцы. Испытания на износ проводили на машине трения по схеме «стержень – диск». Образцы подвергались нагрузкам 10 и 20 Н при скольжении по стальному диску диаметром 200 мм со скоростью 1 м/с при длине пути трения 350 м и 700 м. Объемная плотность композитов с матрицей из сплава Al-7Si, упрочненных частицами TiO_2 , определяли методом Архимеда. Теоретическая плотность рассчитывалась по правилу смесей, исходя из массовой доли частиц TiO_2 . Пористость композитов определяли путем сравнения экспериментальной и теоретической плотности для каждого образца. Твердость композитов оценивали методом Виккерса.

Результаты и их обсуждение

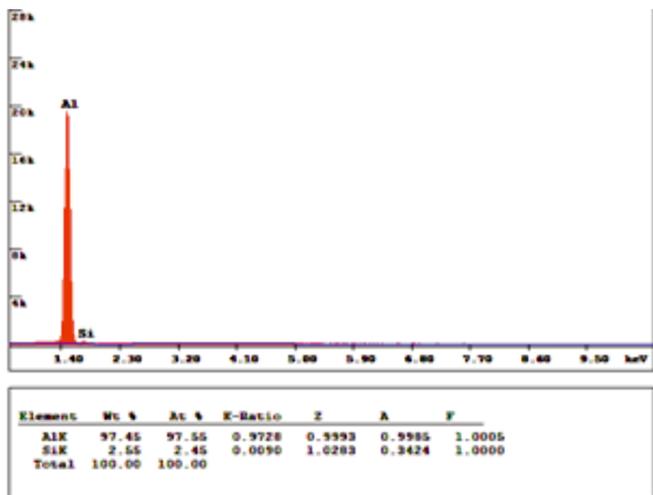
На рис. 3 представлены результаты анализа сплава Al-7Si в литом состоянии методами СЭМ и ЭДС. Из рис. 3, а, в видно, что микроструктура матричного сплава состоит из первичных ден-



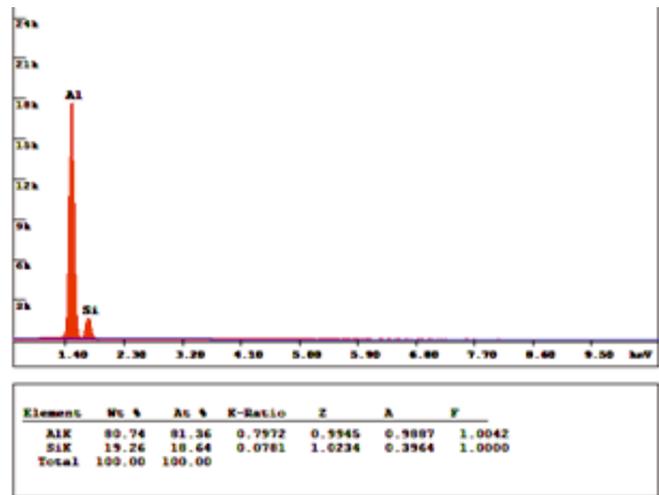
a



b



б



г

Рис. 3. Анализ сплава с Al-Si-матрицей методами СЭМ/ЭДС:

a, б – микроструктура; б, г – ЭДС-анализ дендритов α-Al и междендритных областей в (a) и (б) соответственно

Fig. 3. SEM/EDS analysis on the Al-Si alloy-matrix:

a, б – microstructure; б, г – EDS of α-Al dendrites and inter-dendritic regions in (a), (б) respectively

дритов α-Al и междендритных областей, которые представляют собой либо усадочные поры, либо эвтектическую фазу, обогащенную кремнием. Вышеупомянутые фазы в микроструктуре отражены в спектре и массовых долях элементов в различных областях, показанных на рис. 3. Микроструктура сплава Al-7Si с различной толщиной стенок формы и скоростью охлаждения представлена на рис. 4–6. Из этих рисунков видно, что с увеличением скорости охлаждения как α-Al, так и эвтектический кремний становятся более мелкими.

Для создания различных условий охлаждения при кристаллизации использовалась ступенчатая форма с тремя различными толщинами стенок: 29, 12 и 8 мм (рис. 4–6). Установлено, что толщина стенки формы оказывает суще-

ственное влияние на микроструктуру литого сплава Al-7Si. Как видно из представленных микрофотографий, увеличение толщины стенки формы приводит к измельчению микроструктуры сплава. Это, вероятно, обусловлено тем, что с увеличением толщины стенки металлической формы возрастает скорость отвода тепла и, соответственно, скорость охлаждения. Условия охлаждения, как известно, оказывают влияние на степень измельчения зерна. Быстрая кристаллизация способствует формированию мелкозернистой структуры с равномерным распределением зерен, в то время как медленная кристаллизация приводит к образованию крупных зерен [27].

На рис. 7 показано влияние толщины стенки формы на размер зерна в литом сплаве. При увеличении толщины стенки формы

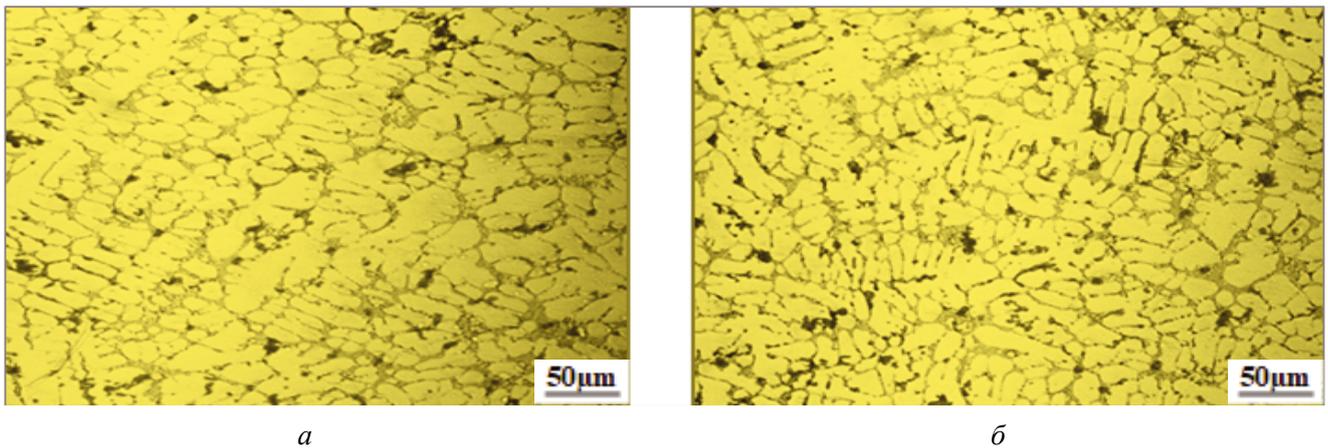

a
б

Рис. 4. Микроструктура отливки, затвердевшей в стальной форме с толщиной стенки 29 мм, на расстоянии 9 мм от поверхности стенки формы (*a*), 4 мм от поверхности стенки формы (*б*)

Fig. 4. The microstructure of the casting solidified in 29 mm wall thickness steel mold at; (*a*) distance of 9 mm from mold wall surface, (*б*) distance of 4 mm from mold wall surface

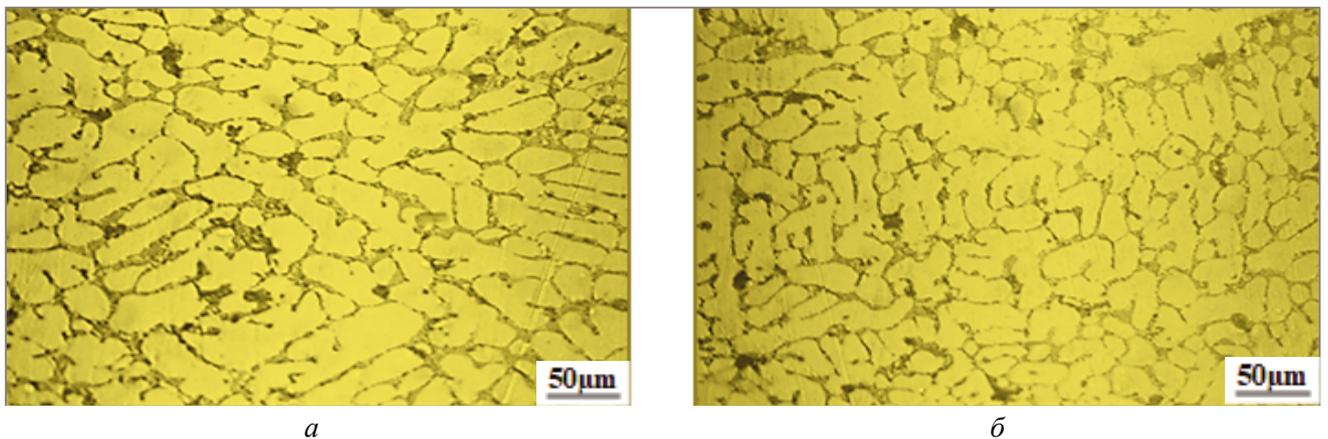

a
б

Рис. 5. Микроструктура отливки, затвердевшей в стальной форме с толщиной стенки 12 мм, на расстоянии 9 мм от поверхности стенки формы (*a*), 4 мм от поверхности стенки формы (*б*)

Fig. 5. The microstructure of the casting solidified in 12 mm wall thickness steel mold at; (*a*) distance 9 mm from mold wall surface, (*б*) distance 4 mm from mold wall surface

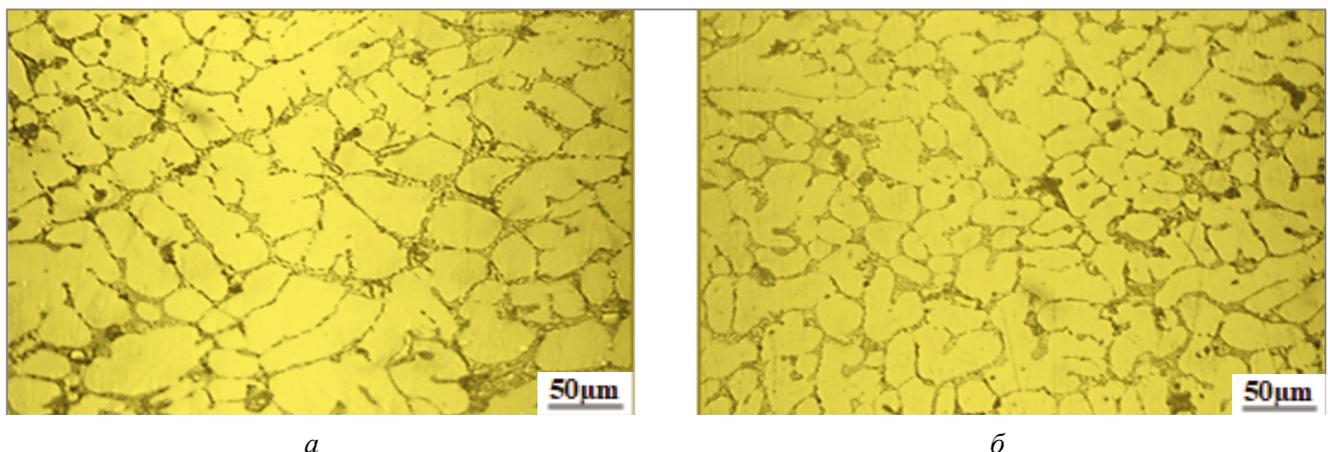

a
б

Рис. 6. Микроструктура отливки, затвердевшей в стальной форме с толщиной стенки 8 мм, на расстоянии 9 мм от поверхности стенки формы (*a*), 4 мм от поверхности стенки формы (*б*)

Fig. 6. The microstructure of the casting solidified in 8 mm wall thickness steel mold at; (*a*) distance 9 mm from mold wall surface, (*б*) distance 4 mm from mold wall surface

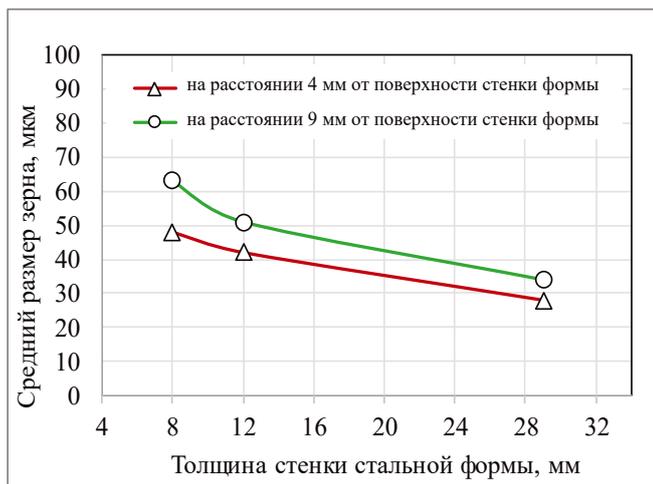


Рис. 7. Средний размер зерна отливок в зависимости от толщины стенки стальной формы

Fig. 7. Average grain size for the castings versus steel mold wall thickness

с 8 до 29 мм средний размер зерна на расстоянии 9 мм от внешней поверхности уменьшается с 63 до 34 мкм. На расстоянии 4 мм от внешней поверхности средний размер зерна уменьшается с 48 до 28 мкм. Таким образом, скорость кристаллизации оказывает определяющее влияние на степень измельчения зерна, что объясняет влияние толщины стенки формы на микроструктуру и размер зерна [28–30].

Канг и др. (Kang et al.) [31] исследовали влияние скорости охлаждения на механические свойства и микроструктуру сплавов Al-7Si. Согласно полученным данным, увеличение скорости охлаждения приводит к большему переохлаждению, что способствует уменьшению критического радиуса зародыша. В результате облегчается процесс зародышеобразования. Однако в условиях высокой скорости охлаждения мелким зернам не хватает времени, чтобы вырасти. Увеличение скорости охлаждения способствует формированию более мелкой микроструктуры. Зародышеобразование при небольшом переохлаждении протекает легче. При затвердевании поверхности формируется большое количество зародышей, которые растут впереди фронта кристаллизации. Увеличение количества центров кристаллизации приводит к формированию более мелкой структуры с большим количеством зерен. При кристаллизации отливки среднего размера фронт кристаллизации перемещается от поверхности к центру. В результате формируется

однородная мелкозернистая структура по всему сечению.

Значения микротвердости возрастают с увеличением толщины стенки литейной формы из-за высокой скорости охлаждения поверхности отливки вблизи стенки. На рис. 8 показана зависимость значений микротвердости отливок от толщины стенки стальной формы. Из этого рисунка видно, что микротвердость сплава Al-7Si при толщине стенки формы 29 мм (вблизи стенки формы) составила 95 HV. На расстоянии 9 мм от внутренней стенки формы микротвердость снизилась до 89 HV. Каждое значение усреднено по четырем измерениям. Отливка с толщиной стенки 8 мм имела микротвердость 78 HV вблизи стенки формы и 74 HV вблизи центра образца. Как видно из рис. 4 и 6, увеличение среднего размера зерна может быть причиной снижения микротвердости с уменьшением толщины стенки. Из-за низкой скорости охлаждения микроструктура сплава, полученного в форме с минимальной толщиной стенки, характеризуется более крупным зерном, тогда как в отливках, полученных в формах с большей толщиной стенки, зерно мельче вследствие более интенсивного отвода тепла. Уменьшение скорости охлаждения приводит к ухудшению свойств и структуры сплава, а также к увеличению междендритного расстояния и снижению эффективности процессов измельчения и модифицирования зерна [32, 33].

На скорость кристаллизации и структуру сплава, включая размер частиц вторичных фаз,

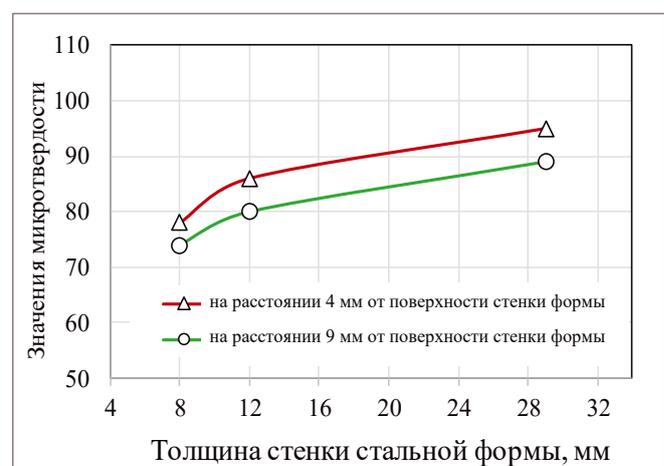


Рис. 8. Значения микротвердости отливок в зависимости от толщины стенки стальной формы

Fig. 8. Microhardness values of the castings versus steel mold wall thickness

также оказывает существенное влияние скорость охлаждения [34, 35]. Согласно данным Чен Хе и др. (Chen He et al.) [36], увеличение скорости охлаждения приводит к повышению механических свойств сплава, значительному уменьшению среднего размера зерна, междендритного расстояния второго порядка, ширины и объемной доли эвтектической фазы. При высокой скорости охлаждения происходит уменьшение размера зерен и увеличение протяженности границ зерен. Увеличение скорости охлаждения приводит к уменьшению размера частиц вторичных фаз, что оказывает влияние на механические свойства отливок [37, 38]. Конг и др. (Kong et al.) [39] исследовали влияние скорости охлаждения на механические свойства (твердость и предел прочности) алюминиевого сплава. Они отметили, что затвердевание сплава завершается в междендритном пространстве. При высокой скорости охлаждения происходит сжатие зерен α -Al, еще не сформированы дендриты и увеличивается количество границ зерен. В отличие от использования песчаных литейных форм это приводит к формированию большего количества границ зерен, уменьшению размера зерен и более равномерному распределению эвтектических фаз по границам зерен. Уменьшение количества эвтектических фаз указывает на увеличение концентрации растворенных элементов в твердой матрице, что способствует улучшению механических свойств сплава.

На рис. 9 и 10 представлены результаты измерений пористости и теоретической плотности композитов в зависимости от концентрации наночастиц TiO_2 (в масс. %). Рис. 9 демонстрирует влияние концентрации наночастиц TiO_2 на плотность композитов на основе сплава Al-7Si. Как и предсказывает правило смесей, теоретическая плотность композитов линейно возрастает с увеличением концентрации добавленных наночастиц TiO_2 . Экспериментально измеренные значения плотности оказались ниже теоретических. Анализ данных о плотности позволил оценить пористость композитов. Рис. 10 показывает влияние концентрации наночастиц TiO_2 на пористость композитов на основе сплава Al-7Si. Очевидно, что с ростом концентрации наночастиц TiO_2 пористость композитов также увеличивается. При содержании 2 % наночастиц TiO_2 пористость составляла 0,56 %, а при 6 % наночастиц

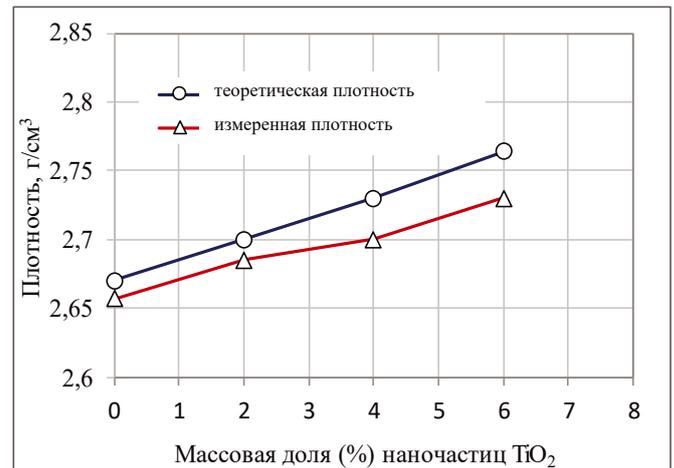


Рис. 9. Теоретическая и измеренная плотность в зависимости от массовой доли упрочняющего компонента

Fig. 9. Theoretical and measured density versus weight percent of reinforcing component

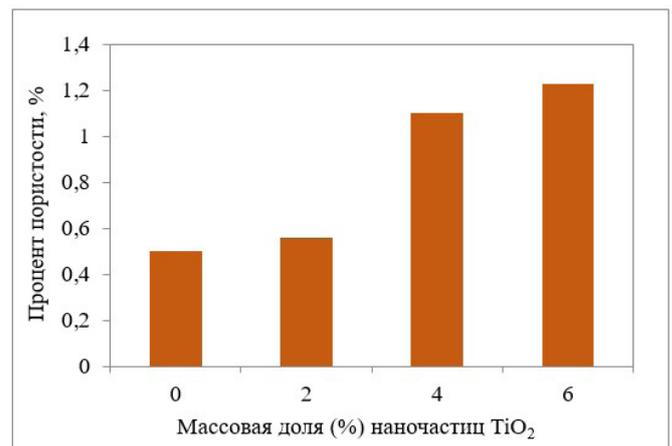


Рис. 10. Процент пористости в образцах в зависимости от массовой доли армирующего компонента

Fig. 10. Percentage of porosity in specimens versus weight percent of reinforcing component

TiO_2 она возрастала до 1,23 %. Увеличение пористости связано с образованием зародышей пор на поверхности упрочняющих частиц и их агрегацией при высокой концентрации [40–42]. М. Кок (M. Kok) [43] отмечает, что пористость является распространенным явлением при производстве ММК из-за длительной подачи частиц и увеличения площади поверхности, контактирующей с воздухом, что обусловлено малым размером частиц. Однако в данном исследовании оптимизация технологических параметров и тщательный контроль смачиваемости позволили улучшить смачиваемость частиц, усилить

связь между наночастицами TiO_2 и сплавом Al-7Si и снизить пористость композитов. Согласно данным Мэттли и др. (Mattli et al.) [44], плотность гибридных нанокомпозитов возрастает с увеличением содержания TiO_2 . Поскольку плотность алюминиевой матрицы ($2,7 \text{ г/см}^3$) ниже, чем плотность частиц упрочняющих компонентов SiC ($3,21 \text{ г/см}^3$) и TiO_2 ($4,23 \text{ г/см}^3$), то гибридные нанокомпозиты имеют более высокую плотность, чем базовая алюминиевая матрица.

На рис. 11 представлены результаты дюрометрических испытаний. Как видно из рисунка, твердость увеличивается с ростом концентрации наночастиц TiO_2 . Добавление 6 % TiO_2 в сплав Al-7Si повысило его твердость с 69 HV до 92,5 HV. Более высокая твердость наночастиц TiO_2 по сравнению с матрицей приводит к повышению твердости композита из сплава Al-7Si. Сабер и др. (Saber et al.) [14] также отмечают, что добавление наночастиц в металлическую матрицу увеличивает твердость нанокомпозитов. Это связано с тем, что равномерно распределенные наночастицы выступают в роли упрочняющей фазы. Механизм Орована играет важную роль в упрочнении, особенно при размере частиц упрочняющей фазы менее 100 нм [45]. Согласно этому механизму прохождение дислокационной линии через частицы TiO_2 оставляет дислокационную петлю вокруг несдвигаемых частиц внутри матрицы. Это предотвращает или замедляет движение дислокаций в металлической матрице. По данным Махан и др. (Mahan et al.) [11], добавление 5 % TiO_2 увеличивает твердость по Виккерсу на 40 % по сравнению с исходным

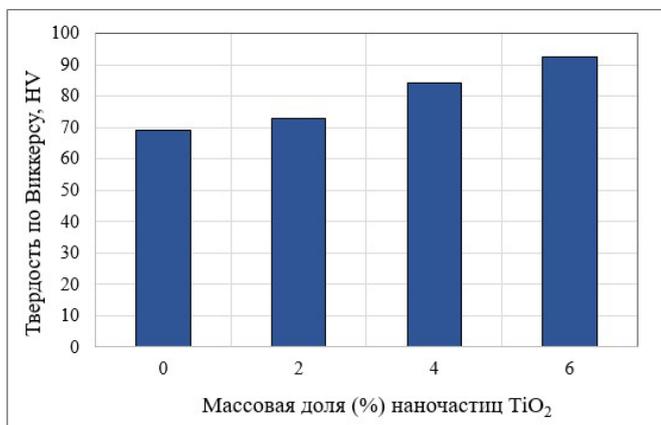


Рис. 11. Влияние содержания TiO_2 (масс. %) на твердость композитов с Al-7Si-матрицей

Fig. 11. Effect of TiO_2 wt. % on the hardness of Al-7Si matrix composites

сплавом A2024. Этот эффект объясняется механизмом твердорастворного упрочнения, при котором частицы TiO_2 служат препятствиями для движения дислокаций. Аль-Джафари (Al-Jaafari) [16] также показал, что добавление 1,5 % наночастиц TiO_2 в сплавы AA6061 и AA6082 увеличивает твердость по Бринеллю (BHN) на 32 % для AA6061 и на 12,1 % для AA6082.

Результаты испытаний на износ показали, что скорость изнашивания композитов увеличивается с ростом приложенной нагрузки и снижается с увеличением содержания наночастиц TiO_2 . В частности, при нагрузке 10 Н и пути скольжения 350 м (рис. 12) композит на основе сплава Al-7Si с 6 масс. % TiO_2 продемонстрировал наименьшую скорость износа ($0,017 \text{ мм}^3/\text{м}$), тогда как сплав Al-7Si показал наибольшую скорость износа ($0,028 \text{ мм}^3/\text{м}$). Это объясняется присутствием твердых частиц, повышающих общую твердость материала. Аналогичная тенденция наблюдалась и при нагрузке 20 Н. Рис. 13 демонстрирует, что скорость изнашивания испытанных образцов возрастала с увеличением пути скольжения. Так, сплав Al-7Si (рис. 12) имел скорость изнашивания $0,028 \text{ мм}^3/\text{м}$ при пути скольжения 350 м, в то время как при увеличении пути до 700 м (рис. 13) скорость износа составила $0,039 \text{ мм}^3/\text{м}$. Такая же зависимость наблюдалась и для изготовленных композиционных материалов.

Многочисленные исследователи [4, 5, 7, 8, 15, 46] отмечают, что влияние приложенной нагрузки усиливается с увеличением процентного

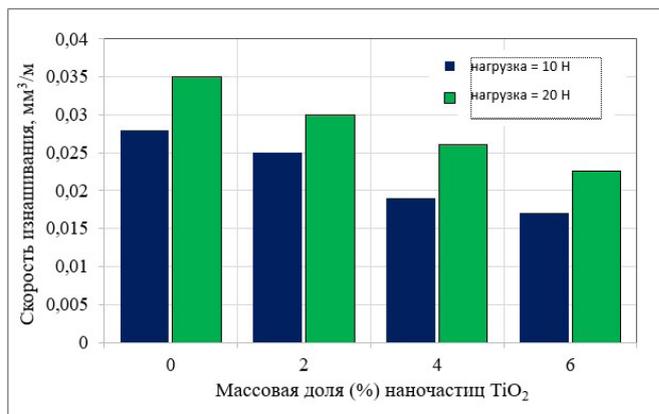


Рис. 12. Влияние содержания TiO_2 (масс. %) на скорость изнашивания композитов с Al-7Si-матрицей при расстоянии скольжения 350 м
Fig. 12. Effect of TiO_2 content (%) on the wear rate of Al-7Si matrix composites at a sliding distance of 350 m

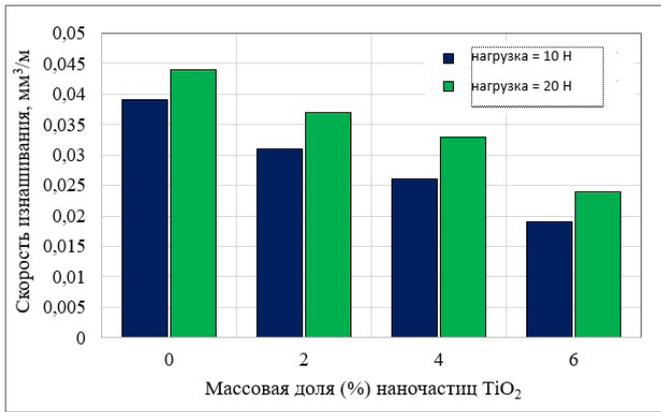


Рис. 13. Влияние содержания TiO₂ (масс. %) на скорость изнашивания композитов с Al-7Si-матрицей при расстоянии скольжения 700 м

Fig. 13. Effect of TiO₂ content (%) on the wear rate of Al-7Si matrix composites at a sliding distance of 700 m

содержания или размера упрочняющих частиц. Уокер и др. (Walker et al.) [46] объяснили это явление интенсивным абразивным изнашиванием обеих контактирующих поверхностей, обусловленным использованием твердых керамических частиц в качестве упрочнителя. Шаши и др. (Shashi et al.) [15] изучали влияние добавления TiO₂ на износостойкость алюминиевых сплавов AA2014 и AA2024 и обнаружили эффективный способ ее повышения. TiO₂ – это природный оксид титана, широко используемый в качестве пигмента в красках, пластмассах и косметике. При добавлении в алюминий он повышает его прочность и твердость, взаимодействуя с кристаллической решеткой металла. Внедрение частиц TiO₂ в алюминиевую матрицу приводит к формированию композиционного материала с улучшенной износостойкостью. Высокая твердость частиц TiO₂ вносит значительный вклад в повышение износостойкости алюминия.

Исследования Винайкумар и др. (Vinaykumar et al.) [8] показали, что по сравнению со сплавом Al6063 композиты на основе Al6063, содержащие 2, 4, 6 и 8 масс. % TiO₂, демонстрируют повышение износостойкости примерно на 6,25, 18,75, 37,5 и 43,75 % соответственно. Ганеш Хандури (Ganesh Khandoori) [47] с коллегами исследовали поведение алюминия, упрочненного частицами TiO₂ (5, 10 и 15 %), полученного методом механического замешивания. Результаты испытаний однозначно показали, что потеря массы образцов увеличивается с ростом нагруз-

ки, хотя скорость изнашивания различается. При этом потеря массы композита снижается с увеличением содержания TiO₂, что свидетельствует о повышении его износостойкости.

Твердость TiO₂ по шкале Мооса составляет 5,5...6 (из 10) [48], в то время как алюминиевые сплавы имеют твердость 2,75...3. Таким образом, наночастицы TiO₂ значительно тверже матрицы Al-7Si. Добавление такого твердого материала в более мягкую алюминиевую матрицу обеспечивает большую устойчивость к износу, вызванному трением и абразией. Дживеди и др. (Dwivedi et al.) [15] обобщили, что добавление TiO₂ в алюминиевые сплавы AA2014 и AA2024 улучшает их износостойкость. Кумар и др. (Kumar et al.) [49] также подтвердили, что износостойкость и микротвердость алюминиевой матрицы повышаются с увеличением содержания TiO₂. Ахмад и др. (Ahmad et al.) [50] объяснили, что износостойкость гибридного композита (Al-Al₂O₃-TiO₂) возрастает с увеличением доли частиц TiO₂, что связано с их смазывающими свойствами.

Заключение

1. Толщина стенки литейной формы является одним из ключевых параметров, определяющих скорость кристаллизации отливки. Увеличение толщины стенки формы приводит к повышению скорости охлаждения, что способствует уменьшению размера зерна.

2. Микроструктура затвердевшего материала напрямую зависит от скорости охлаждения. Замедленная кристаллизация, характерная для форм с малой толщиной стенки, приводит к формированию крупнозернистой структуры. В то же время высокая скорость кристаллизации обеспечивает получение мелкозернистой структуры с улучшенными механическими свойствами.

3. Увеличение толщины стенки формы влечет за собой повышение микротвердости на поверхности отливки, что связано с интенсификацией охлаждения в пристеночной области.

4. Композиционные материалы на основе матрицы Al-7Si, армированные наночастицами TiO₂ с различной массовой долей, были успешно получены методом механического замешивания. Оптимальными технологическими параметрами процесса являются:

– температура заливки 750 °С;



- скорость перемешивания 550 об/мин;
- продолжительность перемешивания 5 минут.

5. Наличие наночастиц TiO_2 оказывает влияние на плотность и пористость композитов. Теоретическая плотность композиционного материала возрастает с увеличением массовой доли наночастиц TiO_2 . Экспериментально полученные значения плотности оказались ниже теоретических, что обусловлено наличием некоторой пористости в структуре композита.

6. Введение наночастиц TiO_2 приводит к значительному повышению твердости и износостойкости композиционных материалов.

Список литературы

1. Effect of TiB_2 nanoparticle content on the microstructure and mechanical properties of $\text{TiB}_2/\text{Mg-4Al-1.5Si}$ composites / J. Liu, X. Chen, W. Wang, Y. Zhao, N. He // *Materials*. – 2023. – Vol. 16. – P. 2852. – DOI: 10.3390/ma16072852.

2. Nassar A.E., Nassar E.E. Properties of aluminum matrix nano composites prepared by powder metallurgy processing // *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. – 2017. – Vol. 29 (3). – P. 295–299. – DOI: 10.1016/j.jksues.2015.11.001.

3. Fabrication of $\text{Al/A206-Al}_2\text{O}_3$ nano/micro composite by combining ball milling and stir casting technology / S. Tahamtan, A. Halvae, M. Emamy, M.S. Zabihi // *Materials and Design*. – 2013. – Vol. 49. – P. 347–359.

4. Soltani M.A., Jamaati R., Toroghinejad M.R. The influence of TiO_2 nano particles on bond strength of cold roll bonded aluminum strips // *Materials Science and Engineering: A*. – 2012. – Vol. 550. – P. 367–374.

5. Saber D., Taha I.B.M., Abd El-Aziz Kh. Wear behavior prediction for Cu/TiO_2 nanocomposite based on optimal regression methods // *Materials Research*. – 2023. – Vol. 26. – P. e20220263.

6. Effect of cooling rate on microstructure and properties of SiCP/A359 composites / Z. Jin, L. Jia, W. Wang, Y. Liu, Y. Qi, H. Zhang // *Materials & Design*. – 2023. – Vol. 234. – P. 112297.

7. Megahed M., Saber D., Agwa M.A. Modeling of wear behavior of $\text{Al-Si/Al}_2\text{O}_3$ metal matrix composites // *Physics of Metals and Metallography*. – 2019. – Vol. 120 (10). – P. 981–988.

8. Shet V.S., Mahadev U.M. Investigation on tribological behavior of metal matrix composites (Al6063-TiO_2) // *International Journal of Recent Engineering Research and Development (IJRERD)*. – 2017. – Vol. 2 (8). – P. 117–148.

9. Corrosive wear of alumina particles reinforced Al-Si alloy composites / D. Saber, Kh. Abd El-Aziz,

R. Abdel-Karim, A.A. Kandel // *Physics of Metals and Metallography*. – 2020. – Vol. 121 (2). – P. 197–203.

10. Development of Al-Mg-Si alloy performance by addition of grain refiner Al-5Ti-1B alloy / Kh. Abd El-Aziz, E.M. Ahmed, A.H. Alghtani, B.F. Felemban, H.T. Ali, M. Megahed, D. Saber // *Science Progress*. – 2021. – Vol. 104 (2). – DOI: 10.1177/00368504211029469.

11. The influence of TiO_2 nanoparticles on the mechanical properties and microstructure of AA2024 aluminium alloy / H.M. Mahan, S.V. Konovalov, K. Osintsev, I. Panchenko // *Materials and Technology*. – 2023. – Vol. 57 (4). – P. 379–384.

12. Mg-based metal matrix composite in biomedical applications: a review / S. Mohanasundaram, M. Bhong, G. Vatsa, R.P. Verma, M. Srivastava, G. Kumar, K.A. Mohammed, D. Singh, L.R. Gupta // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.043.

13. Hossein-Zadeh M., Mirzaee O., Saidi P. Structural and mechanical characterization of Al-based composite reinforced with heat treated Al_2O_3 particles // *Materials and Design*. – 2014. – Vol. 54. – P. 245–250.

14. Characterization and performance evaluation of Cu-based/TiO_2 nano composites / D. Saber, Kh. Abd El-Aziz, B.F. Felemban, A.H. Alghtani, H.T. Ali, E.M. Ahmed, M. Megahed // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12 (1). – P. 6669.

15. Effect of nano- TiO_2 particles addition on dissimilar AA2024 and AA2014 based composite developed by friction stir process technique / S.P. Dwivedi, S. Sharma, Ch. Li, Y. Zhang, A. Kumar, R. Singh, S.M. Eldin, M. Abbas // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 26. – P. 1872–1881.

16. Al-Jaafari M.A.A. Study the effects of titanium dioxide nanoparticles reinforcement on the mechanical properties of aluminum alloys composite // *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 1105. – P. 012062.

17. A critical review of fabrication routes and their effects on mechanical properties of AMMCs / J. Lade, K.A. Mohammed, D. Singh, R.P. Verma, P. Math, M. Saraswat, L.R. Gupta // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.041.

18. Dewangan S., Ganguly S.K., Banchhor R. Analysis of $\text{Al 6061-TiO}_2\text{-CNT}$ metal matrix composites produced by stir casting process // *International Journal of Engineering and Management Research*. – 2018. – Vol. 8. – P. 147–152.

19. Atta M., Megahed M., Saber D. Using ANN and OA techniques to determine the specific wear rate effectors of $\text{A356 Al-Si/Al}_2\text{O}_3$ MMC // *Neural Computing & Applications*. – 2022. – Vol. 34. – P. 14373–14386. – DOI: 10.1007/s00521-022-07215-3.

20. Effect of La on the wettability of Al_2O_3 by molten aluminum / N. Shao, J.W. Dai, G.Y. Li, T. Hane // *Materials Letters*. – 2004. – Vol. 58 (14). – P. 2041–2044.
21. *Abd El-Aziz Kh.* Mechanical properties improvements of the materials used in manufacturing of food processing equipment's and containers using different techniques // *Asian Journal of Applied Science and Technology*. – 2023. – Vol. 7 (4). – P. 156–175.
22. *Saber D., Taha I.B.M., Abd El-Aziz Kh.* Prediction of the corrosion rate of Al–Si alloys using optimal regression methods // *Intelligent Automation & Soft Computing*. – 2021. – Vol. 29 (3). – P. 757–769. – DOI: 10.32604/iasc.2021.018516.
23. *Gorny A., Tyrala E.* Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of thin-walled ductile iron castings // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2013. – Vol. 22. – P. 300–305.
24. Influence of casting mould wall thickness on the properties and microstructure of A356 alloy reinforced with micro/nanoalumina particles / Kh. Abd El-Aziz, A.A. Abo El-Nasr, A. Elfakhany, D. Saber, M. Helal // *Arctic Journal*. – 2018. – Vol. 71 (7). – P. 26–39.
25. *Ashwath P., Xavior M.A.* Compression and diametral tensile strength analysis of graphene– Al_2O_3 reinforced AA 2024 and AA 2219 hybrid nanocomposites // *Advances in Micro and Nano Manufacturing and Surface Engineering*. – Singapore: Springer, 2019. – P. 19–32.
26. Role of CNT in influencing the mechanical properties of the Mg-based composites: an overview / B. Chandrasekhar, A. Dharme, S. Kumar Sharma, R. Taluja, O.A. Jarali, R. Kalra, G. Kumar // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – DOI: 10.1016/j.matpr.2023.02.385.
27. Effect of mould wall thickness on rate of solidification of centrifugal casting / Madhusudhan, S. Narendranaath, G.C. Mohankumar, P.G. Mukunda // *International Journal of Engineering Science and Technology*. – 2010. – Vol. 2 (11). – P. 6092–6096.
28. On influence of Ti and Sr on microstructure, mechanical properties and quality index of cast eutectic Al–Si–Mg alloy / S. Haro-Rodríguez, R.E. Goytia-Reyes, R. Goytia, K.D. Dheerendra // *Materials & Design*. – 2011. – Vol. 32. – P. 1865–1871.
29. Microstructural characterization of recycled Al–Mg–Si-based alloys upon the synergistic effect of ultrasonic technology (UT) and novel refiners / Q. He, G. Zhang, S. Zhang, D. Teng, H. Jia, J. Li, R. Guan // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2024. – Vol. 31. – P. 481–495.
30. *Hamasaiid A., Dargusch M.S., Dour G.* The impact of the casting thickness on the interfacial heat transfer and solidification of the casting during permanent mold casting of an A356 alloy // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2019. – Vol. 47. – P. 229–237.
31. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties in Al–Si alloys / S.B. Kang, J. Zhang, S. Wang, J. Cho, V.U. Stetsenko // *Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys, Yokohama, Japan*. – The Japan Institute of Light Metals, 2010. – P. 675–680.
32. Effect of mould sand type and casting wall thickness on properties and microstructure of multivariate Al–7.5Si–4Cu alloy / G.L. Liu, N.C. Si, S.C. Sun, Q.F. Wu // *Materials Research Innovations*. – 2013. – Vol. 17, suppl. 1. – P. 246–250. – DOI: 10.1179/1432891713Z.000000000224.
33. Study of the effect of hafnium and erbium content on the formation of microstructure in aluminium alloy 1590 cast into a copper chill mold / A.A. Ragazin, V.Yu. Aryshensky, S.V. Kononov, E.V. Aryshenskii, I. Bakhtegareev // *Metal Working and Material Science*. – 2024. – Vol. 26 (1). – P. 99–112.
34. *Liu X., Zhao Q., Jiang Q.* Effects of cooling rate and TiC nanoparticles on the microstructure and tensile properties of an AlCu cast alloy // *Materials Science & Engineering: A*. – 2020. – Vol. 790. – P. 139737.
35. The control of NbB_2 particles in Al– NbB_2 master alloy and its effect on grain refinement of AZ91 magnesium alloy / W. Fan, Y. Bai, G. Zuo, H. Hao // *Materials Science & Engineering: A*. – 2022. – Vol. 854. – P. 143808.
36. Relationship between cooling rate, microstructure evolution, and performance improvement of an AlCu alloy prepared using different methods / C. He, W. Yu, Y. Li, Z. Wang, D. Wu, G. Xu // *Materials Research Express*. – 2020. – Vol. 7 (11). – P. 116501.
37. The role of cooling rate on microstructure in a sand-cast Al–Cu–Ag alloy containing high amounts of TiB₂ / L. Ravkov, B. Diak, M. Gallerneault, P. Clark, G. Marzano // *Canadian Metallurgical Quarterly*. – 2021. – Vol. 60 (2). – P. 57–65.
38. Grain refining performance of Al–B master alloys with different microstructures on Al–7Si alloy / T.M. Wang, Z.N. Chen, H.W. Fu, T.J. Li // *Metals and Materials International*. – 2013. – Vol. 19 (2). – P. 367–370.
39. Effect of high cooling rate on the solidification microstructure of Al–Cu/TiB₂ alloy fabricated by freeze-ablation casting / X. Kong, Y. Wang, H. Fan, J. Wu, H. Xu, H. Mao // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 25. – P. 593–607.
40. *Dewangan R., Sharma B.P., Sharma S.S.* Investigation of hardness behavior in aluminum matrix composites reinforced with coconut shell ash and red mud using Taguchi analysis // *Metal Working and Material Science*. – 2024. – Vol. 26 (3). – P. 179–191.
41. Effect of reinforcement concentration on the properties of hot extruded Al– Al_2O_3 composites



synthesized through microwave sintering process / M.P. Reddy, F. Ubaid, R.A. Shakoor, G. Parande, V. Manakari, A.M.A. Mohamed, M. Gupta // *Materials Science & Engineering: A*. – 2017. – Vol. 696. – P. 60–69.

42. Advanced metal matrix nanocomposites / M. Malaki, W. Xu, A.K. Kasar, P.L. Menezes, H. Dieringa, R.S. Varma, M. Gupta // *Metals*. – 2019. – Vol. 9 (3). – P. 330.

43. *Kok M.* Production and mechanical properties of Al₂O₃ particle-reinforced 2024 aluminium alloy composites // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 161 (3). – P. 381–387.

44. Study of microstructural and mechanical properties of Al/SiC/TiO₂ hybrid nanocomposites developed by microwave sintering / M.R. Mattli, P.R. Matli, A. Khan, R.H. Abdelatty, M. Yusuf, A.A. Ashraf, R.G. Kotalo, R.A. Shakoor // *Crystals*. – 2021. – Vol. 11. – P. 1078. – DOI: 10.3390/cryst11091078.

45. *Golnaz N.A., Arvin T.T., Aghajani H.* Investigation on corrosion behavior of Cu–TiO₂ nanocomposite synthesized by the use of SHS method // *Journal of Material Research and Technology*. – 2019. – Vol. 8 (2). – P. 2216–2222.

46. *Walker J.C., Rainforth W.M., Jones H.* Lubricated sliding wear behaviour of aluminium alloy composites // *Wear*. – 2005. – Vol. 259. – P. 577–589.

47. *Khandoori G., Mer K.K.S., Chandraveer Singh.* Sliding behaviour of aluminium metal matrix composite reinforced with TiO₂ // *International Journal of Resent Scientific Research*. – 2015. – Vol. 6 (5). – P. 4197–4203.

48. Photocatalytic TiO₂-based nanostructures as a promising material for diverse environmental applications: a review / M.-A. Gatou, A. Syrrakou, N. Lagopati, E.A. Pavlatou // *Reactions*. – 2024. – Vol. 5. – P. 135–194. – DOI: 10.3390/reactions5010007.

49. *Antony Vasantha Kumar C., Selwin Rajadurai J.* Influence of rutile (TiO₂) content on wear and microhardness characteristics of aluminium-based hybrid composites synthesized by powder metallurgy // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2016. – Vol. 26 (1). – P. 63–73. – DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64089-X.

50. Wear, optimization and surface analysis of Al–Al₂O₃–TiO₂ hybrid metal matrix composites / N. Ahamad, A. Mohammad, K.K. Sadasivuni, P. Gupta // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. – 2021. – Vol. 235 (1). – P. 93–102. – DOI: 10.1177/1350650120970432.

Конфликт интересов

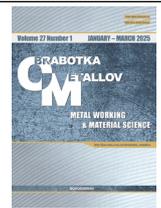
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Fabrication and characterization of Al-7Si alloy matrix nanocomposite by stir casting technique using multi-wall thickness steel mold

Khaled Abdelaziz^{1, 2, a}, Dalia Saber^{1, 3, b, *}

¹ Materials Engineering Department, Faculty of Engineering, Zagazig University, Zagazig, 44519, Egypt

² Mechanical Engineering Department, College of Engineering, Taif University, PO Box 11099, Taif, 21944, Saudi Arabia

³ Industrial Engineering Program, Mechanical Engineering Department, College of Engineering, Taif University, PO Box 11099, Taif, 21944, Saudi Arabia

^a <https://orcid.org/0000-0001-9139-548X>, kalidelaziz@gmail.com; ^b <https://orcid.org/0000-0002-7349-1723>, daliasaber13@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 26 October 2024

Revised: 15 November 2024

Accepted: 28 December 2024

Available online: 15 March 2025

Keywords:

Metal matrix composites (MMCs)

Mold wall thickness

TiO₂ nanoparticles

Mechanical properties

ABSTRACT

Introduction. The Al-7Si is considered one of the key aluminum alloys due to its favorable combinations of casting and mechanical properties. Metal matrix composites (MMCs) reinforced with ceramic particles are widely used in high-tech industries such as military, automotive, aerospace, and electrical engineering. **The purposes of this study** are threefold: (1) to investigate the feasibility of producing composite materials based on the Al-7Si alloy reinforced with varying amounts of TiO₂ nanoparticles using a stir casting technique; (2) to investigate the effect of mold wall thickness on the microstructure and mechanical properties of the Al-7Si alloy during solidification; and (3) to analyze the influence of the reinforcing component content on the mechanical properties and wear resistance of the resulting composite materials. **Methodology.** Metal matrix composite materials based on the Al-7Si alloy, containing 0, 2, 4, and 6 wt. % TiO₂ nanoparticles, were fabricated using a stir casting technique. Cylindrical specimens with a diameter of 15 mm and a length of 18 mm were prepared for metallographic and mechanical testing. **Results and discussion.** It is found that the solidification rate increases with increasing mold wall thickness. This leads to an increase in the cooling rate and, consequently, to the formation of a finer-grained structure. The microstructure of the casting demonstrates a change in grain size from fine to coarse when transitioning from the outer surface (adjacent to the inner mold wall) to the inner part of the casting. As a result, the microhardness near the inner mold wall is higher. Density measurements indicate that composites with a higher amount of reinforcing particles exhibit greater porosity. Furthermore, the results of hardness and wear tests reveal that an increase in the TiO₂ particle content leads to increased hardness and a significant reduction in the wear rate of the composite materials.

For citation: Abdelaziz K., Saber D. Fabrication and characterization of Al-7Si alloy matrix nanocomposite by stir casting technique using multi-wall thickness steel mold. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 155–171. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-155-171. (In Russian).

References

1. Liu J., Chen X., Wang W., Zhao Y., He N. Effect of TiB₂ nanoparticle content on the microstructure and mechanical properties of TiB₂/Mg-4Al-1.5Si composites. *Materials*, 2023, vol. 16, p. 2852. DOI: 10.3390/ma16072852.
2. Nassar A.E., Nassar E.E. Properties of aluminum matrix nano composites prepared by powder metallurgy processing. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2017, vol. 29 (3), pp. 295–299. DOI: 10.1016/j.jksues.2015.11.001.
3. Tahamtan S., Halvae A., Emamy M., Zabihi M.S. Fabrication of Al/A206–Al₂O₃ nano/micro composite by combining ball milling and stir casting technology. *Materials and Design*, 2013, vol. 49, pp. 347–359.

* Corresponding author

Saber Dalia, D.Sc. (Engineering), Professor
Materials Engineering Department, Faculty of Engineering,
Zagazig University,
44519, Zagazig, Egypt
Tel.: 0096645355163, e-mail: daliasaber13@yahoo.com

4. Soltani M.A., Jamaati R., Toroghinejad M.R. The influence of TiO₂ nano particles on bond strength of cold roll bonded aluminum strips. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, vol. 550, pp. 367–374.
5. Saber D., Taha I.B.M., Abd El-Aziz Kh. Wear behavior prediction for Cu/TiO₂ nanocomposite based on optimal regression methods. *Materials Research*, 2023, vol. 26, p. e20220263.
6. Jin Z., Jia L., Wang W., Liu Y., Qi Y., Zhang H. Effect of cooling rate on microstructure and properties of SiCP/A359 composites. *Materials & Design*, 2023, vol. 234, p. 112297.
7. Megahed M., Saber D., Agwa M.A. Modeling of wear behavior of Al-Si/Al₂O₃ metal matrix composites. *Physics of Metals and Metallography*, 2019, vol. 120 (10), pp. 981–988.
8. Shet V.S., Mahadev U.M. Investigation on tribological behavior of metal matrix composites (Al6063-TiO₂). *International Journal of Recent Engineering Research and Development (IJRERD)*, 2017, vol. 2 (8), pp. 117–148.
9. Saber D., Abd El-Aziz Kh., Abdel-Karim R., Kandel A.A. Corrosive wear of alumina particles reinforced Al-Si alloy composites. *Physics of Metals and Metallography*, 2020, vol. 121 (2), pp. 197–203.
10. Abd El-Aziz Kh., Ahmed E.M., Alghtani A.H., Felemban B.F., Ali H.T., Megahed M., Saber D. Development of Al-Mg-Si alloy performance by addition of grain refiner Al-5Ti-1B alloy. *Science Progress*, 2021, vol. 104 (2). DOI: 10.1177/00368504211029469.
11. Mahan H.M., Konovalov S.V., Osintsev K., Panchenko I. The influence of TiO₂ nanoparticles on the mechanical properties and microstructure of AA2024 aluminium alloy. *Materials and Technology*, 2023, vol. 57 (4), pp. 379–384.
12. Mohanasundaram S., Bhong M., Vatsa G., Verma R.P., Srivastava M., Kumar G., Mohammed K.A., Singh D., Gupta L.R. Mg-based metal matrix composite in biomedical applications: a review. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.043.
13. Hossein-Zadeh M., Mirzaee O., Saidi P. Structural and mechanical characterization of Al-based composite reinforced with heat treated Al₂O₃ particles. *Materials and Design*, 2014, vol. 54, pp. 245–250.
14. Saber D., El-Azi K.A., Felemban B.F., Alghtani A.H., Ali H.T., Ahmed E.M., Megahed M. Characterization and performance evaluation of Cu-based/TiO₂ nano composites. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12 (1), p. 6669.
15. Dwivedi S.P., Sharma S., Li Ch., Zhang Y., Kumar A., Singh R., Eldin S.M., Abbas M. Effect of nano-TiO₂ particles addition on dissimilar AA2024 and AA2014 based composite developed by friction stir process technique. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 26, pp. 1872–1881.
16. Al-Jaafari M.A.A. Study the effects of titanium dioxide nanoparticles reinforcement on the mechanical properties of aluminum alloys composite. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1105, p. 012062.
17. Lade J., Mohammed K.A., Singh D., Verma R.P., Math P., Saraswat M., Gupta L.R. A critical review of fabrication routes and their effects on mechanical properties of AMMCs. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.041.
18. Dewangan S., Ganguly S.K., Banchhor R. Analysis of Al 6061-TiO₂-CNT metal matrix composites produced by stir casting process. *International Journal of Engineering and Management Research*, 2018, vol. 8, pp. 147–152.
19. Atta M., Megahed M., Saber D. Using ANN and OA techniques to determine the specific wear rate effectors of A356 Al-Si/Al₂O₃ MMC. *Neural Computing & Applications*, 2022, vol. 34, pp. 14373–14386. DOI: 10.1007/s00521-022-07215-3.
20. Shao N., Dai J.W., Li G.Y., Hane T. Effect of La on the wettability of Al₂O₃ by molten aluminum. *Materials Letters*, 2004, vol. 58 (14), pp. 2041–2044.
21. Abd El-Aziz Kh. Mechanical properties improvements of the materials used in manufacturing of food processing equipment's and containers using different techniques. *Asian Journal of Applied Science and Technology*, 2023, vol. 7 (4), pp. 156–175.
22. Saber D., Taha I.B.M., Abd El-Aziz Kh. Prediction of the corrosion rate of Al-Si alloys using optimal regression methods. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 2021, vol. 29 (3), pp. 757–769. DOI: 10.32604/iasc.2021.018516.
23. Gorny A., Tyrala E. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of thin-walled ductile iron castings. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013, vol. 22, pp. 300–305.
24. Abd El-Aziz Kh., Abo El-Nasr A.A., Elfakhany A., Saber D., Helal M. Influence of casting mould wall thickness on the properties and microstructure of A356 alloy reinforced with micro/nanoalumina particles. *Arctic Journal*, 2018, vol. 71 (7), pp. 26–39.
25. Ashwath P., Xavier M.A. Compression and diametral tensile strength analysis of graphene-Al₂O₃ reinforced AA2024 and AA2219 hybrid nanocomposites. *Advances in Micro and Nano Manufacturing and Surface Engineering*. Singapore, Springer, 2019, pp. 19–32.

26. Chandrasekhar B., Dharme A., Kumar Sharma S., Taluja R., Jarali O.A., Kalra R., Kumar G. Role of CNT in influencing the mechanical properties of the Mg-based composites: an overview. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.02.385.
27. Madhusudhan, Narendranaath S., Mohankumar G.C., Mukunda P.G. Effect of mould wall thickness on rate of solidification of centrifugal casting. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010, vol. 2 (11), pp. 6092–6096.
28. Haro-Rodríguez S., Goytia-Reyes R.E., Goytia R., Dheerendra K.D. On influence of Ti and Sr on microstructure, mechanical properties and quality index of cast eutectic Al–Si–Mg alloy. *Materials & Design*, 2011, vol. 32, pp. 1865–1871.
29. He Q., Zhang G., Zhang S., Teng D., Jia H., Li J., Guan R. Microstructural characterization of recycled Al–Mg–Si-based alloys upon the synergistic effect of ultrasonic technology (UT) and novel refiners. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, vol. 31, pp. 481–495.
30. Hamasaiid A., Dargusch M.S., Dour G. The impact of the casting thickness on the interfacial heat transfer and solidification of the casting during permanent mold casting of an A356 alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 47, pp. 229–237.
31. Kang S.B., Zhang J., Wang S., Cho J., Stetsenko V.U. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties in Al–Si alloys. *Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys*, Yokohama, Japan. The Japan Institute of Light Metals Cooling, 2010, pp. 675–680.
32. Liu G.L., Si N.C., Sun S.C., Wu Q.F. Effect of mould sand type and casting wall thickness on properties and microstructure of multivariate Al–7.5Si–4Cu alloy. *Materials Research Innovations*, 2013, vol. 17, suppl. 1, pp. 246–250. DOI: 10.1179/1432891713Z.000000000224.
33. Ragazin A.A., Aryshensky V.Yu., Konovalov S.V., Aryshenskii E.V., Bakhtegareev I. Study of the effect of hafnium and erbium content on the formation of microstructure in aluminium alloy 1590 cast into a copper chill mold. *Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26 (1), pp. 99–112.
34. Liu X., Zhao Q., Jiang Q. Effects of cooling rate and TiC nanoparticles on the microstructure and tensile properties of an AlCu cast alloy. *Materials Science & Engineering: A*, 2020, vol. 790, p. 139737.
35. Fan W., Bai Y., Zuo G., Hao H. The control of NbB₂ particles in Al–NbB₂ master alloy and its effect on grain refinement of AZ91 magnesium alloy. *Materials Science & Engineering: A*, 2022, vol. 854, p. 143808.
36. He C., Yu W., Li Y., Wang Z., Wu D., Xu G. Relationship between cooling rate, microstructure evolution, and performance improvement of an AlCu alloy prepared using different methods. *Materials Research Express*, 2020, vol. 7 (11), p. 116501.
37. Ravkov L., Diak B., Gallerneault M., Clark P., Marzano G. The role of cooling rate on microstructure in a sand-cast Al–Cu–Ag alloy containing high amounts of TiB₂. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2021, vol. 60 (2), pp. 57–65.
38. Wang T.M., Chen Z.N., Fu H.W., Li T.J. Grain refining performance of Al–B master alloys with different microstructures on Al–7Si alloy. *Metals and Materials International*, 2013, vol. 19 (2), pp. 367–70.
39. Kong X., Wang Y., Fan H., Wu J., Xu H., Mao H. Effect of high cooling rate on the solidification microstructure of Al–Cu/TiB₂ alloy fabricated by freeze-ablation casting. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 25, pp. 593–607.
40. Dewangan R., Sharma B.P., Sharma S.S. Investigation of hardness behavior in aluminum matrix composites reinforced with coconut shell ash and red mud using Taguchi analysis. *Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26 (3), pp. 179–191.
41. Reddy M.P., Ubaid F., Shakoor R.A., Parande G., Manakari V., Mohamed A.M.A., Gupta M. Effect of reinforcement concentration on the properties of hot extruded Al–Al₂O₃ composites synthesized through microwave sintering process. *Materials Science & Engineering: A*, 2017, vol. 696, pp. 60–69.
42. Malaki M., Xu W., Kasar A.K., Menezes P.L., Dieringa H., Varma R.S., Gupta M. Advanced metal matrix nanocomposites. *Metals*, 2019, vol. 9 (3), p. 330.
43. Kok M. Production and mechanical properties of Al₂O₃ particle-reinforced 2024 aluminium alloy composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 161 (3), pp. 381–387.
44. Mattli M.R., Matli P.R., Khan A., Abdelatty R.H., Yusuf M., Ashraf A.A., Kotalo R.G., Shakoor R.A. Study of microstructural and mechanical properties of Al/SiC/TiO₂ hybrid nanocomposites developed by microwave sintering. *Crystals*, 2021, vol. 11, p. 1078. DOI: 10.3390/cryst11091078.
45. Golnaz N.A., Arvin T.T., Aghajani H. Investigation on corrosion behavior of Cu–TiO₂ nanocomposite synthesized by the use of SHS method. *Journal of Material Research and Technology*, 2019, vol. 8 (2), pp. 2216–2222.



46. Walker J.C., Rainforth W.M., Jones H. Lubricated sliding wear behaviour of aluminium alloy composites. *Wear*, 2005, vol. 259, pp. 577–589.

47. Khandoori G., Mer K.K.S., Chandraveer Singh. Sliding behaviour of aluminium metal matrix composite reinforced with TiO₂. *International Journal of Resent Scientific Research*, 2015, vol. 6 (5), pp. 4197–4203.

48. Gatou M.-A., Syrrakou A., Lagopati N., Pavlatou E.A. Photocatalytic TiO₂-based nanostructures as a promising material for diverse environmental applications: a review. *Reactions*, 2024, vol. 5, pp. 135–194. DOI: 10.3390/reactions5010007.

49. Antony Vasantha Kumar C., Selwin Rajadurai J. Influence of rutile (TiO₂) content on wear and microhardness characteristics of aluminium-based hybrid composites synthesized by powder metallurgy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, vol. 26 (1), pp. 63–73. DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64089-X.

50. Ahamad N., Mohammad A., Sadasivuni K.K., Gupta P. Wear, optimization and surface analysis of Al-Al₂O₃-TiO₂ hybrid metal matrix composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2021, vol. 235 (1), pp. 93–102. DOI: 10.1177/1350650120970432.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).