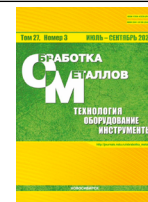




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Исследование механических свойств нанокompозитов на основе сплава Al7075-T6, полученных методом механического замешивания частиц в расплав, с микроструктурным и фрактографическим анализом поверхности

Сухас Патил^{1, а}, Сатиш Чинчаникар^{2, b, *}

¹ Кафедра машиностроения, Институт информационных технологий Вишвакарма, филиал Университета Савитрибай Пхуле Пуны, Пуна – 411048, Махараштра, Индия

² Кафедра машиностроения, Технологический институт Вишвакарма, филиал Университета Савитрибай Пхуле Пуны, Пуна – 411037, Махараштра, Индия

^а <https://orcid.org/0000-0002-2965-1531>, suhas.221p0007@viit.ac.in; ^b <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>, satish.chinchanikar@vit.edu

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 620.1:620.3:539.2:539.374:669.715

История статьи:

Поступила: 14 июля 2025

Рецензирование: 28 июля 2025

Принята к печати: 05 августа 2025

Доступно онлайн: 15 сентября 2025

Ключевые слова:

Металломатричные композиты (ММК)

Сплав Al7075-T6

Метод механического замешивания частиц в расплав

Нанокompозиты

Механические свойства

АННОТАЦИЯ

Введение. Металломатричные композиты (ММК) на основе алюминия в последние годы вызывают повышенный интерес в связи с улучшенными механическими свойствами, что открывает широкие перспективы для их применения в различных отраслях промышленности. В то время как существуют различные способы введения упрочняющих компонентов в металлическую матрицу, метод механического замешивания частиц в расплав (stir casting) является относительно простым и эффективным способом, обеспечивающим более равномерное распределение упрочняющих частиц по объему матрицы. **Цель данной работы:** изучение влияния комбинированного упрочнения наночастицами графена и карбида кремния (SiC) на механические свойства сплава Al7075-T6. Известно, что введение частиц SiC в сплавы серии 7XXX приводит к повышению усталостной прочности. Ранее также было исследовано влияние частиц SiC на механические свойства композитов на основе сплава A356, включая показатели удлинения, прочности при сжатии, прочности при растяжении и твердости. Однако влияние комбинированного упрочнения, в частности введение комбинации графена и частиц SiC, на механические свойства сплава Al7075-T6 остается недостаточно изученным, что и определяет актуальность данного исследования. **Методы.** Учитывая широкую область применения алюминиевых матричных композитов (АМК) в автомобильной и аэрокосмической промышленности, в настоящем исследовании анализируется влияние различных соотношений наночастиц SiC и графена на твердость и предел прочности при растяжении нанокompозитов, полученных методом механического замешивания частиц в расплав на основе алюминиевого сплава Al7075-T6. Дополнительно был выполнен анализ микроструктуры и поверхностей излома композитов с использованием сканирующей электронной микроскопии – энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Основными **задачами исследования** являются разработка легких высокопрочных комбинированных металломатричных нанокompозитных материалов и оценка возможности введения наночастиц графена и SiC в матрицу сплава Al7075. Особое внимание уделено анализу взаимосвязи между составом, микроструктурой и механическими свойствами полученных комбинированных материалов. **Результаты и обсуждение.** В ходе исследования было установлено, что применение механического замешивания частиц в расплав способствует улучшению смачиваемости, когезии и прочности сцепления между упрочняющими компонентами и матрицей, а также снижению пористости. По сравнению с композитами, полученными без замешивания, нанокompозиты, полученные методом механического замешивания частиц в расплав, продемонстрировали повышенные показатели прочности и вязкости, что связано с изменением микроструктуры. Результаты исследования свидетельствуют, что оптимизация параметров механического замешивания частиц в расплав позволяет существенно влиять на механические свойства и морфологию поверхности нанокompозитов на основе Al7075. Анализ результатов показал, что использование комбинированного упрочнения наночастицами значительно повышает как твердость, так и предел прочности при растяжении сплава Al7075-T6. Отмечена четкая корреляция между соотношением наночастиц SiC и графена и механическими свойствами полученных образцов. В частности, образец Al7075, упрочненный 0,5 масс. % графена и 3 масс. % наночастиц SiC, продемонстрировал наилучшие показатели твердости и прочности при растяжении по сравнению с неупрочненным сплавом Al7075 и другими исследованными комбинациями SiC и графена. При содержании графена 0,5 масс. % и содержании SiC 1–3 масс. % нанокompозиты на основе Al7075 характеризовались хорошо сформированной зернистой структурой с четкими и непрерывными границами зерен. Образование мелкодисперсных наночастиц размером от 62,57 до 91,54 нм способствовало эффективной передаче нагрузки, измельчению зерен и препятствовало движению дислокаций, что, в свою очередь, привело к улучшению механических характеристик. Нанокompозит на основе Al7075 с оптимальным составом показал высокие механические свойства, а поверхность излома образцов была плотной, с однородными микропорами и минимальным количеством вырванных частиц. Такое поведение связано с пластическим характером разрушения, обусловленным прочной связью между матрицей и упрочняющими компонентами, а также эффективной передачей нагрузки.

Для цитирования: Патил С., Чинчаникар С. Исследование механических свойств нанокompозитов на основе сплава Al7075-T6, полученных методом механического замешивания частиц в расплав, с микроструктурным и фрактографическим анализом поверхности // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 3. – С. 236–251. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.3-236-251.

Введение

*Адрес для переписки

Чинчаникар Сатиш, д.т.н., профессор

Кафедра машиностроения,

Институт информационных технологий Вишвакарма,

филиал Университета Савитрибай Пхуле Пуны,

Пуна – 411048, Махараштра, Индия

Тел.: +91-2026950401, e-mail: satish.chinchanikar@viit.ac.in

Гибридные металломатричные композиты (ГММК) все шире применяются в автомобильной и аэрокосмической отраслях благодаря уникальному сочетанию свойств, включая низкую

плотность, высокую жесткость, повышенную удельную прочность и низкий коэффициент теплового расширения. Композиционные материалы классифицируются по типу матрицы (металлическая, полимерная или керамическая) и армирующего компонента (дисперсные частицы, волокна или нитевидные кристаллы). В настоящее время дисперсно-упрочненные металломатричные композиты (ДММК) являются одним из наиболее востребованных классов композиционных материалов. ДММК состоят из металлической матрицы (например, алюминия или магния) и дискретных армирующих частиц, таких как карбид кремния (SiC), графен (C), карбид бора (B_4C) или материалы природного происхождения (каменная пыль, яичная скорлупа, джутовое волокно).

Для внедрения армирующих частиц в металлическую матрицу используются различные методы. Метод механического перемешивания расплава (stir casting) выделяется как экономичный и эффективный способ, обеспечивающий достаточно равномерное распределение армирующих частиц в объеме матрицы. Алюминиевые металломатричные композиты (АММК) привлекают значительное внимание благодаря улучшенным механическим свойствам, что делает их перспективными для широкого спектра промышленных применений. Добавление армирующих частиц, таких как карбид кремния (SiC) и графен (Gr), способствует улучшению механических свойств, что подтверждается многочисленными исследованиями [1].

Существенное улучшение механических характеристик достигается при введении таких компонентов, как нанопластины графена (НПГ), нитрид бора (BN) и карбид ванадия (VC). Например, гибридный композит на основе сплава AA7075, армированный НПГ, BN и VC, демонстрирует повышенную твердость и сопротивление сжатию благодаря синергетическому эффекту упрочнения частицами [2]. Использование нанокристаллов борилов, таких как диборид гафния (HfB_2), также способствует увеличению твердости и измельчению зерна металлической матрицы [3].

Оптимизация микроструктуры материала (в частности, уменьшение размера зерна) может быть достигнута с помощью методов интенсивной пластической деформации, таких как равно-

канальное угловое прессование (РКУП/ЕСАР) и консолидация порошков методом искрового плазменного спекания (ИПС/SPS). Подобная оптимизация, в свою очередь, положительно влияет на предел текучести и твердость материала [4]. Для достижения оптимального сочетания свойств необходима комплексная оптимизация размера зерна, состава и параметров технологических процессов. Упрочнение границами зерен, обусловленное их уменьшенным размером, является важным механизмом улучшения механических свойств. Межфазная связь между матрицей и армирующими компонентами имеет решающее значение для эффективной передачи нагрузки, что напрямую определяет механическое поведение композиционного материала.

АММК приобретают все большую популярность благодаря улучшенным характеристикам по сравнению с неармированными алюминиевыми сплавами [5]. Механические и трибологические свойства АММК зависят от множества факторов, включая технологию изготовления, тип, размер и объемную долю армирующего компонента [6]. К основным методам производства АММК относятся литье с перемешиванием (stir casting), обработка трением с перемешиванием (friction stir processing), порошковая металлургия и искровое плазменное спекание [7].

Обработка трением с перемешиванием (FSP) эффективно измельчает зерно, уменьшая его размер до 10,3 раза по сравнению с исходным сплавом. Механизм измельчения основан на интенсивной пластической деформации и динамической рекристаллизации, вызванных трением, что приводит к значительному улучшению механических свойств. В частности, однородное распределение частиц гибридного упрочнителя, достигаемое с помощью FSP, способствует повышению твердости и предела прочности при сжатии получаемых композитов [2].

Методы порошковой металлургии, включая механическое легирование (mechanical alloying, MA) и горячее прессование (hot pressing, HP), также применяются для улучшения прочности на сжатие, пластичности (относительного удлинения при разрушении) и микротвердости композитов. Например, исследования показали, что горячее прессование обеспечивает превосходные механические свойства для композитов на основе сплава AA2024, армированных много-

стенными углеродными нанотрубками (МУНТ/MWCNTs), по сравнению с другими методами. Это объясняется более равномерным распределением МУНТ и формированием эффективного межфазного соединения [8].

Литье с перемешиванием (stir casting) – экономичный метод получения композитов путем внедрения частиц в металлический расплав. Однако он подвержен проблеме агломерации частиц. Порошковая металлургия, в свою очередь, признана успешным подходом к созданию гибридных алюминиевых нанокомпозитов [5]. Использование литья с перемешиванием позволяет получать нанокомпозиты с повышенной твердостью и улучшенной износостойкостью. Метод способствует формированию плотной микроструктуры с минимальной пористостью, что положительно сказывается на механических характеристиках композита [9].

В качестве упрочняющих фаз традиционно применяются карбид кремния (SiC) и карбид бора (B_4C). В дополнение к ним перспективным является использование порошков, полученных из сельскохозяйственных отходов, таких как зола рисовой шелухи и зола кокосовой скорлупы. Введение этих упрочняющих фаз улучшает прочность на сжатие, твердость и износостойкость [10]. Исследования показали, что добавление B_4C и SiC в композиты на основе сплава Al6061 оказывает значительное влияние на механические свойства, включая твердость, предел прочности при растяжении и ударную вязкость [11].

Установлено, что добавление упрочняющих фаз SiC в сплавы серии 7XXX повышает усталостную прочность [12]. Включение оксида алюминия (Al_2O_3), полученного из отходов алюминиевого производства, в материалы для колесных дисков также влияет на пористость, твердость, предел прочности при растяжении и предел прочности при сжатии [13–15]. Анализ влияния различных наночастиц в базовой жидкости на свойства наножидкостей и характеристики обработки показал, что размер и концентрация наночастиц играют важную роль в определении эффективности наножидкостей [16–19]. Кроме того, изучалось влияние упрочняющих фаз SiC на механические свойства композитов на основе сплава A356, включая твердость, предел прочности при растяжении, прочность на сжатие и относительное удлинение [20].

Несмотря на значительное количество исследований, влияние частиц гибридного упрочнителя на механические свойства сплава Al7075-T6 изучено недостаточно и требует дальнейшего исследования.

Карбид кремния (SiC) и графен (Gr) – перспективные упрочняющие компоненты для композиционных материалов, каждый из которых обладает уникальным набором преимуществ. SiC обеспечивает высокую твердость и предел прочности при растяжении, в то время как графен способствует снижению плотности и увеличению удельной прочности. В настоящей работе исследуется влияние различных пропорций наночастиц SiC и графена на твердость и предел прочности при растяжении сплава Al7075-T6, полученного методом литья с перемешиванием. Проведено исследование микроструктуры и морфологии поверхности изломов образцов композитов с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM) и энергодисперсионного спектрального микроанализа (EDX).

Целью исследования является разработка легких и высокопрочных гибридных металломатричных нанокомпозитов на основе сплава Al7075-T6 с использованием комбинации наночастиц SiC и графена. Особое внимание уделяется установлению взаимосвязи между составом гибридного наполнителя и результирующими механическими свойствами полученных материалов.

Материалы и методы исследования

Алюмоматричные композиты (АМК), армированные карбидом кремния (SiC) и графеном (Gr), активно используются в аэрокосмической и автомобильной промышленности благодаря их улучшенным механическим и трибологическим свойствам [21]. Графен, обладая высоким отношением прочности к весу, потенциально улучшает характеристики композитов, однако его применение может быть ограничено плохой смачиваемостью металлической матрицей и склонностью к агломерации [22]. Для достижения однородного распределения армирующих элементов в матрице из сплава Al7075 использовались различные методы, включая литье с перемешиванием [23].

В настоящей работе в качестве матричного материала выбран сплав Al7075-T6, а в качестве

армирующих элементов – наночастицы карбида кремния (размером 30...50 нм) и графена (размером 5...10 нм). Выбор SiC и графена обусловлен их различными, но взаимодополняющими характеристиками, позволяющими достичь оптимального сочетания механических и физических свойств композита для инженерных применений.

Карбид кремния, характеризующийся высокой твердостью, теплопроводностью и устойчивостью к коррозии и химическому воздействию, хорошо подходит для работы в условиях повышенных температур и обеспечивает повышенную износостойкость. SiC имеет плотность $3,22 \text{ г/см}^3$ и твердость по Бринеллю 2450 НВ, что делает его эффективным компонентом для применений, требующих высокой устойчивости к абразивному износу. Графен с низкой плотностью $2,2 \text{ г/см}^3$ и твердостью 110 НВ является перспективным материалом для создания легких и высокопрочных компонентов. Несмотря на более низкую твердость по сравнению с SiC, графен обладает выдающимся пределом прочности при растяжении (130 ГПа), что позволяет создавать гибкие, но прочные композиты с высоким удельным сопротивлением разрушению.

Механические испытания полученных образцов включали в себя определение твердости по методу Бринелля (в соответствии со стандартом ASTM E10) и испытания на одноосное растяжение (в соответствии со стандартом ASTM B557). Твердость измерялась с использованием

твердомера Бринелля. Испытания на растяжение проводились на универсальной испытательной машине (UTM). Микроструктура композитов и распределение армирующих частиц изучались с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, SEM). Для идентификации элементного состава различных областей образцов применялся энергодисперсионный рентгеновский анализ). SEM и EDX выполнялись на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-IT200.

Экспериментальная установка для приготовления нанокompозитов на основе сплава Al7075 с различными комбинациями армирующих элементов представлена на рис. 1. Исходные слитки сплава Al7075-T6 (массой 1,5 кг каждый) помещались в тигель печи для литья с перемешиванием. Расплавление металла происходило при температуре 750°C в течение 120 минут. Для предотвращения окисления в расплавленный металл добавляли 1 вес. % магния. Затем в расплав вводились наночастицы SiC и графена в различных пропорциях (восемь различных комбинаций). Перед введением в расплав наночастицы SiC и графена подвергались предварительному нагреву в течение 5...7 минут.

Для обеспечения равномерного распределения армирующих элементов в жидком сплаве использовалась механическая мешалка в течение 15 минут. Во избежание дефектов литья с поверхности расплава регулярно удалялся образующийся шлак. Полученные отливки имели



Рис. 1. Подготовка образцов Al7075 с различным упрочнением методом механического замешивания частиц в расплав

Fig. 1. Preparation of Al7075 specimens with varying reinforcements by stir casting

форму цилиндрических стержней диаметром 20 мм и длиной 250 мм. Для улучшения заполнения формы и предотвращения окисления расплава литейная форма предварительно нагревалась в течение 5...7 минут перед заливкой расплавленного металла. Химический состав сплава Al7075 представлен в табл. 1. Состав различных композиционных образцов, полученных методом литья с перемешиванием с использованием различных объемных долей SiC и графена, приведен в табл. 2.

Твердость образцов определялась с помощью твердомера Бринелля в соответствии со

стандартом ASTM E10. К поверхности образца прикладывалась нагрузка 187,5 кг (1839 Н) посредством стального шарикового индентора диаметром 2,5 мм в течение 20 секунд. Для оценки однородности распределения армирующих элементов измерения твердости проводились в двух различных точках каждого литого стержня.

Образцы для испытаний на растяжение изготавливались в соответствии со стандартом ASTM B557. Перед установкой в захваты универсальной испытательной машины (UTM) образцы проходили механическую обработку для приведения к требуемым размерам и форме.

Таблица 1

Table 1

Химический состав сплава Al7075-T6
Chemical composition of Al7075-T6 alloy

Элемент	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr	Al
Масс. %	0,10	0,23	1,48	0,07	2,11	0,22	0,01	5,29	0,07	0,02	Основа

Таблица 2

Table 2

Наноккомпозиты на основе Al7075 с различным упрочнением
Al7075 nanocomposites prepared with varying reinforcements

Образец	Упрочнение
S1	Неупрочненный сплав Al7075/ Unreinforced Al7075 alloy
S2	Al7075 + 0,5 % SiC + 0,1 % графена / Al7075 + 0,5 % SiC + 0,1 % graphene
S3	Al7075 + 0,5 % SiC + 0,2 % графена / Al7075 + 0,5 % SiC + 0,2 % graphene
S4	Al7075 + 0,5 % SiC + 0,3 % графена / Al7075 + 0,5 % SiC + 0,3 % graphene
S5	Al7075 + 0,5 % графена + 1 % SiC / Al7075 + 0,5 % graphene + 1 % SiC
S6	Al7075 + 0,5 % графена + 2 % SiC / Al7075 + 0,5 % graphene + 2 % SiC
S7	Al7075 + 0,5 % графена + 3 % SiC / Al7075 + 0,5 % graphene + 3 % SiC
S8	Al7075 + 1 % графена + 2 % SiC / Al7075 + 1 % graphene + 2 % SiC
S9	Al7075 + 1 % графена + 4 % SiC / Al7075 + 1 % graphene + 4 % SiC

Результаты и их обсуждение

В этом разделе представлены результаты исследования влияния различных соотношений наночастиц карбида кремния (SiC) и графена

(Gr) на твердость и предел прочности при растяжении сплава Al7075-T6, полученного методом литья с перемешиванием. Такое исследование актуально в связи с широким применением алюминиевых матричных композитов (АМК)

в аэрокосмической и автомобильной промышленности. Ниже приводятся данные микроструктурного анализа и исследования морфологии поверхности излома полученных композитов с использованием сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным рентгеновским анализом (SEM-EDX).

Целью работы является разработка легких высокопрочных гибридных металлматричных нанокompозитов на основе сплава Al7075-T6 путем комбинирования наночастиц SiC и графена. Основное внимание уделяется установлению взаимосвязи между составом гибридного наполнителя и результирующими механическими свойствами полученных материалов.

Далее будут рассмотрены следующие аспекты:

- влияние различных пропорций наночастиц SiC и графена на твердость и предел прочности при растяжении сплава Al7075-T6;

- микроструктура и морфология поверхности излома нанокompозитов на основе сплава Al7075-T6, исследованные с помощью SEM-EDX;

- основные выводы работы и перспективы дальнейших исследований.

Механические свойства нанокompозитов на основе сплава Al7075-T6

В данном подразделе представлены результаты исследования механических свойств (твердости и предела прочности при растяжении) неармированного сплава Al7075-T6 и нанокompозитов на его основе, полученных методом литья с перемешиванием. Всего было изготовлено восемь образцов композиционных материалов с различным содержанием наночастиц карбида кремния (SiC) и графена (Gr), как указано в табл. 2. Были проведены измерения твердости и предела прочности при растяжении для всех образцов, и результаты сопоставлены для оценки влияния армирующих элементов. На рис. 2 представлены значения твердости и предела прочности при растяжении для неармированного сплава Al7075-T6 и композитов с различным содержанием SiC и Gr.

Анализ данных, представленных на рис. 2, показывает, что добавление армирующих элементов (Gr и SiC) в сплав Al7075-T6 приводит к значительному увеличению как предела проч-

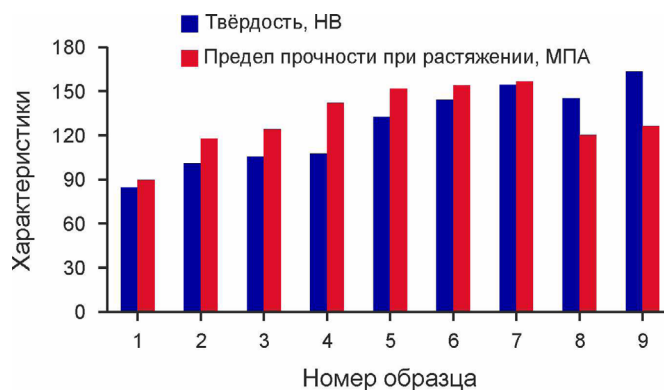


Рис. 2. Твердость и предел прочности при растяжении нанокompозитов на основе сплава Al7075-T6

Fig. 2. Hardness and tensile strength of Al7075-T6 nanocomposites

ности при растяжении, так и твердости материала, что свидетельствует об улучшении общей прочности. Неармированный сплав Al7075-T6 (образец № 1) имеет предел прочности при растяжении 89,47 МПа и твердость по Бринеллю 84,3 НВ. Увеличение содержания графена с 0,1 до 0,3 % (образцы № 2–4) при поддержании постоянного содержания SiC (0,5 %) приводит к постепенному увеличению твердости (от 101,40 до 107,5 НВ) и предела прочности при растяжении (от 117,68 до 141,82 МПа). Аналогично увеличение содержания SiC с 1 до 3 % (образцы № 5–7) при поддержании постоянного содержания графена (0,5 %) также приводит к значительному увеличению предела прочности при растяжении (от 151,55 до 156,62 МПа) и твердости (от 132,60 до 163,40 НВ).

Рис. 2 также демонстрирует, что армированные нанокompозиты на основе сплава Al7075-T6 имеют более высокие значения твердости и предела прочности при растяжении по сравнению с неармированным сплавом. Кроме того, наблюдается тенденция к повышению этих характеристик с увеличением содержания наночастиц SiC и графена. Однако следует отметить, что увеличение содержания SiC оказывает более выраженное влияние на твердость сплава Al7075-T6, чем увеличение содержания графена. При дальнейшем увеличении содержания графена до 1 % наблюдается снижение предела прочности при растяжении, когда содержание SiC становится выше 2 %.

Кроме того, при увеличении содержания SiC с 2 до 4 % при постоянном содержании графена 1 % (образцы № 8 и 9) наблюдается значитель-

ное снижение предела прочности при растяжении (от 120,24 до 126,16 МПа) по сравнению с увеличением твердости (от 145,16 до 163,40 НВ). Снижение предела прочности при растяжении нанокompозита Al7075-T6 при армировании более чем 2 % SiC и постоянном содержании графена 1 % может быть связано с увеличением хрупкости материала, вызванным концентрацией напряжений вокруг частиц SiC. Полученные результаты подчеркивают важность сбалансированного подхода при разработке нанокompозитов для поиска оптимального сочетания твердости и предела прочности при растяжении. Для достижения желаемых характеристик нанокompозитов на основе сплава Al7075 необходимо тщательно подбирать соотношение армирующих элементов.

Оптимальное сочетание упрочняющих элементов (графена и SiC) позволяет добиться синергетического эффекта, приводящего к улучшению механических свойств композита. В рамках данного исследования образец № 7 (Al7075 + 0,5 масс. % графена + 3 масс. % SiC) продемонстрировал наилучший баланс между пределом прочности при растяжении (156,62 МПа) и твердостью (155,52 НВ).

Повышение механических характеристик композита на основе сплава Al7075-T6 при добавлении SiC и графена объясняется следующими факторами:

- высокая твердость и модуль упругости SiC способствуют эффективной передаче нагрузки от матрицы к упрочняющим частицам, препятствуя пластической деформации;
- SiC способствует измельчению зерна металлической матрицы;
- высокая прочность на растяжение и большая площадь поверхности графена улучшают

межфазную адгезию и предотвращают образование трещин;

- различия в коэффициентах теплового расширения между матрицей и армирующими элементами приводят к возникновению дислокаций, которые затрудняют пластическую деформацию.

Таким образом, совместное использование карбида кремния и графена позволяет повысить предел прочности при растяжении, твердость и износостойкость композита.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что предел прочности при растяжении и твердость гибридных нанокompозитов выше, чем у неармированного сплава Al7075, и они увеличиваются с ростом суммарной объемной доли гибридного упрочнителя. В следующем подразделе на основе данных микроструктурного анализа и исследования поверхности излома будет проведено обсуждение взаимосвязи между механическими свойствами и однородностью распределения наночастиц, пористостью и агломерацией. Однородное распределение наночастиц способствует эффективному торможению движения дислокаций.

Микроструктурный анализ и анализ поверхности разрушения нанокompозитов

Для объяснения различий в механических свойствах, наблюдавшихся для различных составов композитов, был проведен анализ микроструктуры и морфологии поверхности разрушения образцов. В частности, наивысший предел прочности при растяжении (156,62 МПа) и твердость (155,52 НВ), продемонстрированные образцом № 7 (Al7075 + 0,5 масс. % Gr + 3 масс. % SiC), были проанализированы на основе данных ска-

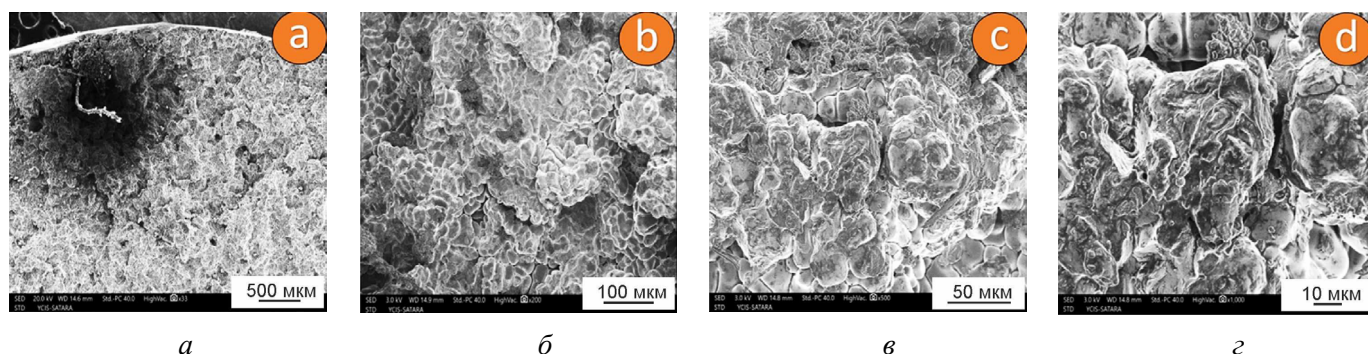


Рис. 3. Микрофотографии, полученные с помощью СЭМ, поверхности излома после испытания на растяжение образца № 7

Fig. 3. SEM images of fractured surfaces after tensile testing for Specimen 7

нирующей электронной микроскопии (СЭМ). На рис. 3 представлены СЭМ-изображения поверхности разрушения образца № 7 после испытания на растяжение, полученные при различных увеличениях (рис. 3, *а–г*) и позволяющие оценить микроструктурные особенности и механизмы разрушения.

СЭМ-анализ выявил плотную ямочную структуру поверхности разрушения с равномерно распределенными микропорами и небольшим вытягиванием частиц, что свидетельствует о преобладающем механизме вязкого разрушения и прочной связи между матрицей и армирующими элементами, обеспечивающей эффективную передачу нагрузки. Мелкие, равномерно распределенные ямки, по-видимому, формируются в местах локализации частиц SiC, действующих как центры зародышеобразования при затвердевании. Присутствие графена способствует замедлению распространения трещин и препятствует движению дислокаций.

Для сравнения на рис. 4, *а–г* представлены СЭМ-изображения поверхности разрушения образца № 8 (Al7075 + 1 масс. % Gr + 2 масс. % SiC). В данном случае наблюдаются неравномерные ямки с признаками смешанного (вязкого и хрупкого) типа разрушения. Неравномерное распределение ямок указывает на потерю адгезии на межфазной границе и вытягивание армирующих частиц из матрицы. Снижение адгезии может быть связано с агломерацией графена и ухудшением смачиваемости при увеличении его концентрации. В результате концентрация напряжений вблизи неоднородностей микроструктуры приводит к преждевременному образованию трещин, что объясняет более низкие значения

предела прочности при растяжении и твердости образца № 8 по сравнению с образцом № 7, несмотря на большее суммарное содержание армирующих элементов.

В рамках исследования было установлено, что образцы нанокompозитов на основе сплава Al7075, подвергавшиеся механическому перемешиванию во время приготовления, демонстрируют более однородную микроструктуру по сравнению с образцами, полученными без перемешивания. На рис. 5 представлены СЭМ-изображения поверхности композитов, полученных без перемешивания (рис. 5, *а*) и с перемешиванием (рис. 5, *б*). На поверхности композита, полученного без перемешивания, наблюдается плоская структура с разбросанными частицами, неравномерное армирование и агломераты, что указывает на недостаточное диспергирование армирующих элементов в матрице и плохую связь между матрицей и армирующими элементами. Напротив, на поверхности композита, полученного с перемешиванием, наблюдается однородная структура с равномерным распределением мелких частиц, что свидетельствует об улучшенном диспергировании армирующих элементов в матрице, а также о снижении пористости и улучшении адгезии между матрицей и армирующими элементами. Таким образом, механическое перемешивание оказывает существенное влияние на микроструктуру и механические свойства нанокompозитов на основе сплава Al7075.

Для подтверждения однородности распределения наночастиц SiC и графена в алюминиевой матрице был проведен анализ элементного состава методом энергодисперсионной спектро-

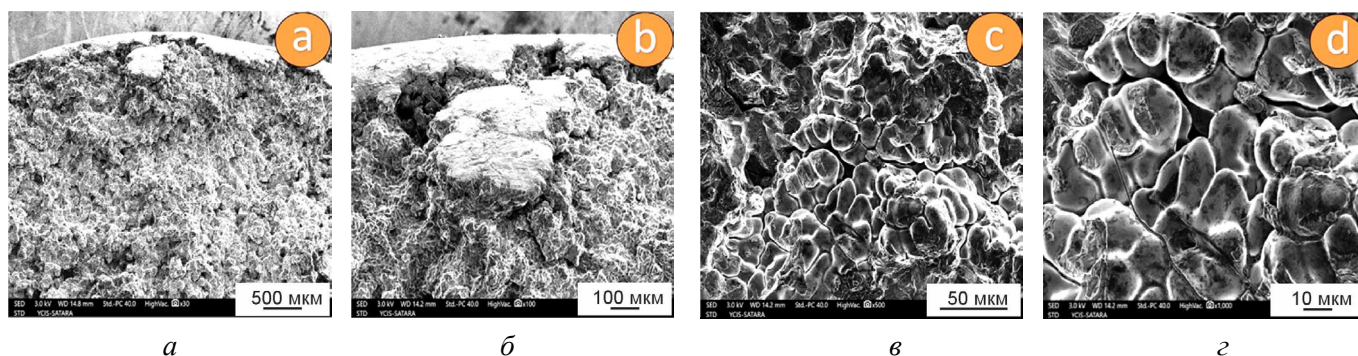


Рис. 4. Микрофотографии, полученные с помощью СЭМ, поверхности излома после испытания на растяжение образца № 8

Fig. 4. SEM images of fractured surfaces after tensile testing for Specimen 8

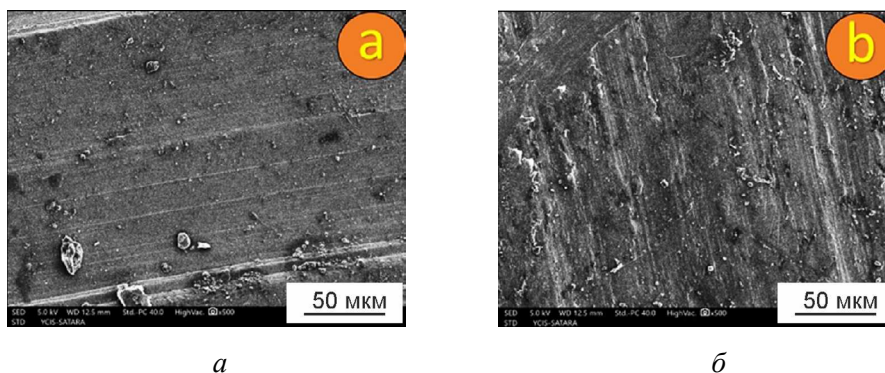


Рис. 5. Изображения поверхности образца № 7, полученного методом литья без механического перемешивания (а) и с перемешиванием (б)

Fig. 5. Surface images without (a) and with (б) stirring for Specimen 7

скопии (EDX). На рис. 6 и 7 представлены результаты EDX-анализа образцов № 7 (Al7075 + 0,5 масс. % Gr + 3 масс. % SiC) и № 8 (Al7075 + 1 масс. % Gr + 2 масс. % SiC) соответственно. Результаты EDX показывают присутствие наночастиц SiC в алюминиевой матрице, что подтверждается наличием пиков, соответствующих углероду (C) и кремнию (Si) на спектрах. Кроме того, результаты EDX четко показывают присутствие графена в алюминиевой матрице, о чем свидетельствуют пики углерода, наблюдаемые в обоих образцах. Таким образом, данные EDX подтверждают диспергирование наночастиц SiC и графена в алюминиевой матрице, что способствует улучшению механических свойств композитного материала.

Анализ элементного состава с помощью EDX показывает, что доминирующим элементом в нанокompозитах на основе сплава Al7075 является алюминий (Al), что подтверждается

интенсивным сигналом Al на спектрах, представленных на рис. 6 и 7. Наличие пиков титана (Ti) и циркония (Zr) может свидетельствовать о механической активации поверхности армирующих элементов или о присутствии этих элементов в исходном сплаве Al7075. Наличие кремния (Si) может указывать на образование интерметаллических соединений или керамических фаз. Следовые количества железа (Fe), марганца (Mn), хрома (Cr), никеля (Ni), меди (Cu) и цинка (Zn) указывают на сложный легирующий состав сплава Al7075, направленный на повышение прочности, износостойкости и коррозионной стойкости. Следует отметить, что метод EDX имеет ограниченную чувствительность к легким элементам, таким как углерод (C). Однако наличие небольшого пика углерода в области 2 кэВ указывает на присутствие графена или графитоподобного углерода. Несмотря на относительно низкую концентрацию, графен оказывает суще-

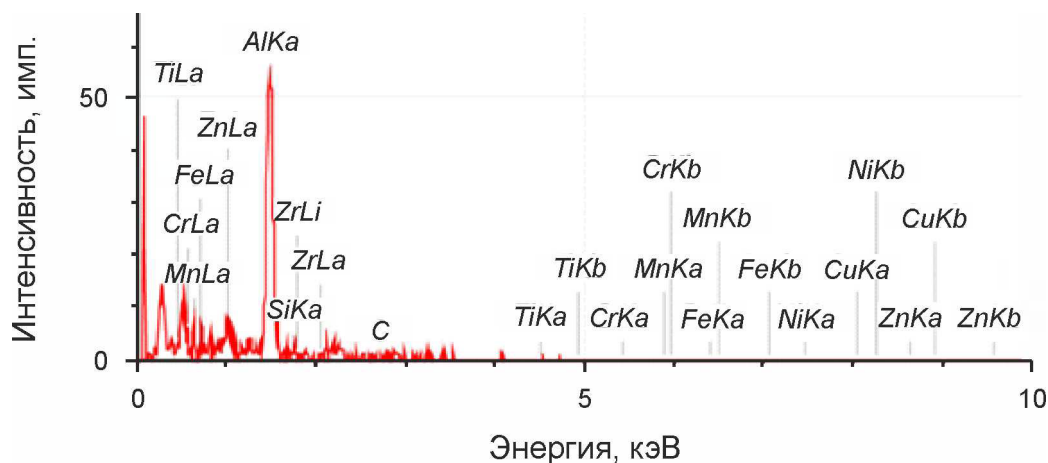


Рис. 6. Элементный состав образца № 7 (Al7075 + 0,5 % Gr + 3 % SiC)

Fig. 6. Elemental analysis of Specimen 7 (Al7075 + 0.5% graphene + 3% SiC)

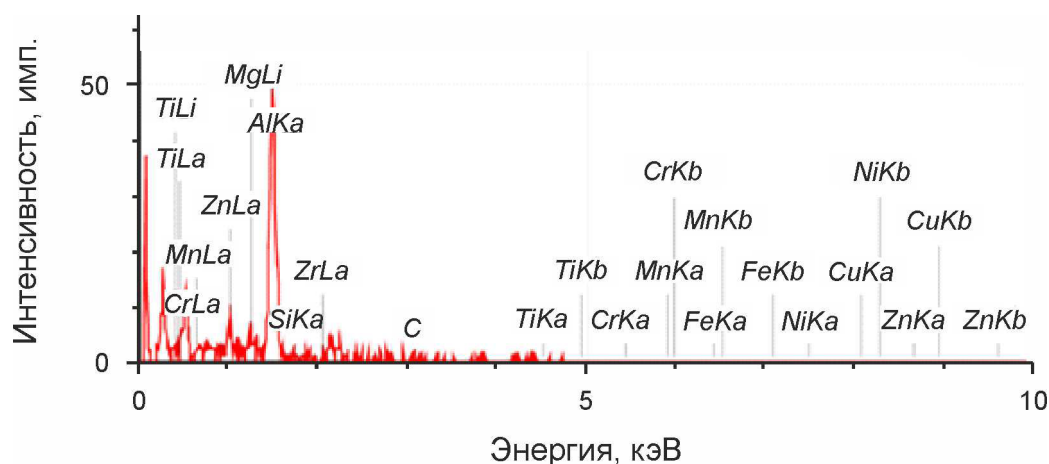


Рис. 7. Элементный состав образца № 8 (Al7075 + 1 % Gr + 2 % SiC)

Fig. 7. Elemental analysis of Specimen 8 (Al7075 + 1% graphene + 2% SiC)

ственное влияние на структурные и функциональные характеристики композита благодаря высокой прочности на растяжение и развитой поверхности.

В целом результаты EDX подтверждают успешное внедрение микро- и наноразмерных упрочняющих элементов в алюминиевую матрицу, что свидетельствует о перспективности разработанного композиционного материала для использования в передовых конструкциях.

На рис. 7 представлен анализ элементного состава образца № 8, полученный методом EDX. Как и в предыдущем случае, доминирует сигнал AlK α с энергией 1,5 кэВ, подтверждающий, что алюминий является основным компонентом матричного материала. Наличие интенсивного сигнала MgK α свидетельствует о присутствии магния, добавленного для улучшения прочностных характеристик, снижения плотности и повышения коррозионной стойкости сплава. Обнаружение пиков титана (TiL α , TiK α), циркония (ZrL α) и кремния (SiK α) подтверждает наличие упрочняющих фаз и, возможно, указывает на взаимодействие этих элементов с матрицей, улучшающее механические и термические свойства композита.

В диапазоне энергий от 5 до 9 кэВ наблюдаются пики, соответствующие переходным металлам, таким как хром (Cr), марганец (Mn), железо (Fe), никель (Ni), медь (Cu) и цинк (Zn). Это указывает на присутствие легирующих элементов, входящих в состав сплава Al7075, которые способствуют повышению твердости, износостойкости и многофункциональности композита.

Спектры EDX показывают различия в содержании магния, что, вероятно, связано с локальными вариациями состава образца. В целом спектр иллюстрирует сложную многофазную систему композита на основе алюминия, сформированную путем введения различных элементов для обеспечения заданных структурных и функциональных свойств.

На рис. 8 представлены оптические микрофотографии образцов № 7 (Al7075 + 0,5 масс. % Gr + 3 масс. % SiC) и № 8 (Al7075 + 1 масс. % Gr + 2 масс. % SiC), демонстрирующие микроструктуру композитов, полученных с различным соотношением графена и SiC.

На рис. 8, а отчетливо видна зернистая структура образца № 7. Структура характеризуется хорошо отполированной поверхностью и четкими непрерывными границами зерен. Отсутствие видимой пористости и агломерации свидетельствует об эффективной межфазной связи между матрицей и армирующими элементами. Кроме того, наличие мелкозернистой структуры указывает на то, что частицы SiC эффективно инициируют процесс зародышеобразования при затвердевании расплава. Анализ СЭМ-изображений высокого разрешения подтверждает наноразмерный размер армирующих частиц и их равномерное распределение в матрице. Размер частиц варьируется от 62,57 до 91,54 нм, что свидетельствует о хорошем диспергировании армирующей фазы. Высокое отношение площади поверхности к объему наноразмерных частиц обеспечивает прочную связь с матрицей, что способствует улучшению механических свойств композита.

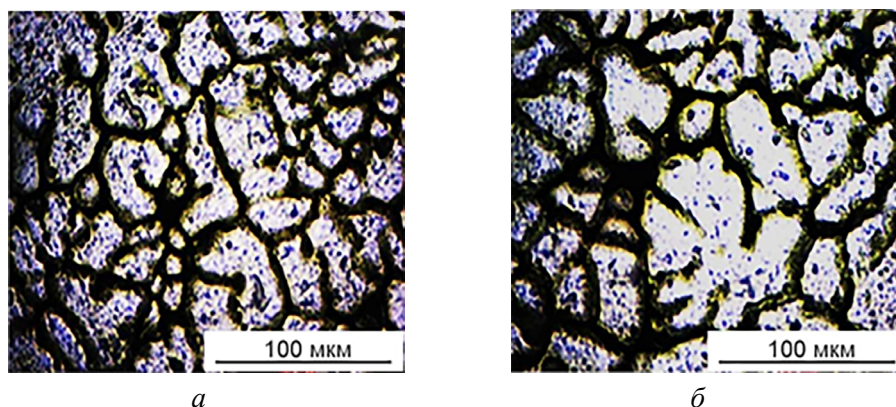


Рис. 8. Микроструктура:
а – образец № 7; б – образец № 8

Fig. 8. Microstructure observed for:
а – Specimen 7; б – Specimen 8

Эффективная передача нагрузки, измельчение зерна и затруднение движения дислокаций приводят к увеличению твердости, предела прочности при растяжении и износостойкости, что соответствует высоким значениям механических свойств, наблюдаемым для образца № 7.

Напротив, на рис. 8, б представлена микроструктура образца № 8, характеризующаяся более грубым распределением частиц с размером от 90,49 до 116,9 нм. Наблюдаются более крупные и менее однородные зерна с нечеткими границами. Наличие агломератов и больший размер частиц свидетельствуют об агломерации, которая может быть вызвана недостаточным перемешиванием или термодинамической нестабильностью в процессе обработки. Агломерированные частицы создают концентраторы напряжения и ухудшают взаимодействие между матрицей и армирующими элементами, ограничивая передачу нагрузки. Уменьшение плотности границ зерен и ухудшение однородности структуры приводят к снижению сопротивления движению дислокаций, что коррелирует со снижением механических свойств, наблюдаемым для образца № 8.

Таким образом, сравнительный анализ микроструктуры образцов № 7 и 8 показывает, что содержание упрочняющего элемента, размер частиц и качество диспергирования играют ключевую роль в определении механического поведения гибридных нанокомпозитов на основе сплава Al7075. Полученные результаты предоставляют ценные сведения для разработки передовых материалов с улучшенными характеристиками для различных промышленных применений.

Закключение

В настоящей работе было исследовано влияние различных соотношений наночастиц карбида кремния (SiC) и графена (Gr) на твердость и предел прочности при растяжении сплава Al7075-T6, полученного методом литья с перемешиванием. Актуальность работы обусловлена широким применением алюминиевых матричных композитов (АМК) в аэрокосмической и автомобильной промышленности. Микроструктурный анализ и анализ поверхности разрушения с использованием SEM-EDX позволили установить взаимосвязь между составом, микроструктурой и механическими свойствами разработанных гибридных нанокомпозитных материалов. Основной целью исследования являлась разработка легких и высокопрочных композитов путем объединения наночастиц SiC и Gr со сплавом Al7075. На основании полученных результатов можно сформулировать следующие выводы.

– Наилучшее сочетание предела прочности при растяжении (156,62 МПа) и твердости (155,52 НВ) было достигнуто для нанокомпозита на основе сплава Al7075, содержащего 0,5 масс. % Gr и 3 масс. % SiC. Установлено, что добавление SiC наиболее эффективно повышает твердость, а добавление Gr – предел прочности при растяжении.

– Механическое перемешивание расплава оказывает положительное влияние на однородность микроструктуры композитов, уменьшая пористость и улучшая смачиваемость и сцепле-

ние между матрицей и упрочняющими элементами. Композиты, полученные с использованием перемешивания, демонстрируют более высокую прочность и вязкость.

– Увеличение содержания графена до 1 масс. % при одновременном снижении содержания SiC до 2 масс. % (наноккомпозит на основе сплава Al7075) приводит к ухудшению механических свойств, что связано со снижением плотности границ зерен и ухудшением однородности структуры, облегчающими движение дислокаций.

– Анализ оптической микроструктуры наноккомпозита на основе сплава Al7075, содержащего 0,5 масс. % Gr и 1–3 масс. % SiC, выявил однородную структуру с отчетливыми и непрерывными границами зерен. Мелкодисперсные наночастицы (размером 62,57...91,54 нм) обеспечивают эффективную передачу нагрузки, измельчение зерна и затрудняют движение дислокаций, что способствует улучшению механических характеристик.

– Поверхность разрушения наноккомпозита с оптимальным сочетанием механических свойств характеризуется плотной ямочной структурой с однородными микропорами и небольшим вытягиванием частиц, что свидетельствует о преобладающем механизме вязкого разрушения и прочной связи между матрицей и упрочняющими элементами.

– В целом полученные результаты демонстрируют, что содержание упрочняющих элементов, их размер и качество диспергирования оказывают существенное влияние на механическое поведение гибридных наноккомпозитов на основе сплава Al7075. Результаты исследования могут быть использованы для разработки передовых материалов с улучшенными характеристиками для различных промышленных применений.

Список литературы

1. Ajithkumar J.P., Xavier M.A. Cutting force and surface roughness analysis during turning of Al 7075 based hybrid composites // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 30. – P. 180–187. – DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.026.

2. An investigation of the mechanical, thermal and electrical properties of an AA7075 alloy reinforced with hybrid ceramic nanoparticles using friction stir processing / A.B. Khoshaim, E.B. Moustafa, M.A. Alazwari,

M.A. Taha // *Superalloys*. – 2023. – Vol. 13 (1). – P. 124. – DOI: 10.3390/met13010124.

3. Ultrasound-assisted liquid-phase synthesis and mechanical properties of aluminum matrix nanocomposites incorporating boride nanocrystals / B. Ma, I. Gómez-Recio, L. Mazerolles, P. Mazeran, C. Sanchez, S. Delalande, D. Portehault // *Small*. – 2021. – Vol. 18 (4). – P. 2104091. – DOI: 10.1002/SMLL.202104091.

4. Microstructure, mechanical properties, and thermal stability of Al-Al₂O₃ nanocomposites consolidated by ECAP or SPS from milled powders / A. Lacour-Gogny-Goubert, V. Doquet, M. Novelli, A. Tanguy, S. Hallais, J. Bourgon, B. Villeroy, R. Massion // *Metals*. – 2023. – Vol. 13 (5). – P. 825. – DOI: 10.3390/met13050825.

5. Ujah C.O., Kallon D.V.V. Trends in aluminium matrix composite development // *Crystals*. – 2022. – Vol. 12 (10). – P. 1357. – DOI: 10.3390/cryst12101357.

6. Mechanical and tribological properties of aluminum-based metal-matrix composites / A. Lakshmi-kanthan, S. Angadi, V. Malik, K.K. Saxena, C. Prakash, S. Dixit, K.A. Mohammed // *Materials*. – 2022. – Vol. 15 (17). – P. 6111. – DOI: 10.3390/ma15176111.

7. Aynalem G.F. Processing methods and mechanical properties of aluminium matrix composites // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 220(1). – P. 3765791. – DOI: 10.1155/2020/3765791.

8. Mechanical properties of AA2024 aluminum/MWCNTs nanocomposites produced using different powder metallurgy methods / F. Stergioudi, A. Prospathopoulos, A. Farazas, E.Ch. Tsirogiannis, N. Michailidis // *Metals*. – 2022. – Vol. 12 (8). – P. 1315. – DOI: 10.3390/met12081315.

9. Stir casting process analysis and optimization for better properties in Al-MWCNT-GR-based hybrid composites / K. Shivalingaiah, V. Nagarajaiah, C. Selvan, S. Kariappa, N. Chandrashekarappa, A. Lakshmi-kanthan, M. Chandrashekarappa, E. Linul // *Metals*. – 2022. – Vol. 12 (8). – P. 1297. – DOI: 10.3390/met12081297.

10. Ratna Kumar G.E.V., Senthil Kumar K., Ranga Babu J.A. A Review on fabrication and mechanical characterization of particulate reinforced Al-7075 metal matrix composites/hybrid composites // *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. – 2023. – Vol. 34 (2). – P. 62–71. – DOI: 10.37934/araset.34.2.6271.

11. Characterization of hybrid silicon carbide and boron carbide nanoparticles-reinforced aluminum alloy composites / L. Poovazhagan, K. Kalaichelvan, A. Rajadurai, V. Senthilvelan // *Procedia Engineering*. – 2013. – Vol. 64. – P. 681–689. – DOI: 10.1016/j.proeng.2013.09.143.

12. Mechanical properties and morphology of aluminium metal matrix nanocomposites-stir

cast products / Md. T. Alam, A.H. Ansari, S. Arif, Md. N. Alam // *Advances in Materials and Processing Technologies*. – 2017. – Vol. 3 (4). – P. 600–615. – DOI: 10.1080/2374068X.2017.1350543.

13. Characterization and machinability studies of aluminium-based hybrid metal matrix composites – A critical review / S.P. Patil, S.S. Kore, S.S. Chinchani, S.Y. Waware // *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. – 2023. – Vol. 101 (2). – P. 137–163. – DOI: 10.37934/arfmts.101.2.137163.

14. Waware S.Y., Kore S.S., Patil S.P. Heat transfer enhancement in tubular heat exchanger with jet impingement: A review // *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. – 2023. – Vol. 101 (2). – P. 8–25. – DOI: 10.37934/arfmts.101.2.825.

15. Innovative heat transfer enhancement in tubular heat exchanger: An experimental investigation with minijet impingement / S.Y. Waware, S.S. Kore, A.S. Kurhade, S.P. Patil // *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. – 2024. – Vol. 116 (2). – P. 51–58. – DOI: 10.37934/arfmts.116.2.5158.

16. Kulkarni P., Chinchani S. A review on machining of nickel-based superalloys using nanofluids under minimum quantity lubrication (NFMQL) // *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*. – 2023. – Vol. 104 (1). – P. 183–199. – DOI: 10.1007/s40032-022-00905-w.

17. Chinchani S., Kore S.S., Hujare P. A review on nanofluids in minimum quantity lubrication machining // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 68. – P. 56–70. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.05.028.

18. Kulkarni P., Chinchani S. Machining effects and multi-objective optimization in Inconel 718 turning

with unitary and hybrid nanofluids under MQL // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2024. – Vol. 18 (68). – P. 222–241. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.68.15.

19. Kulkarni P., Chinchani S. Machinability of Inconel 718 using unitary and hybrid nanofluids under minimum quantity lubrication // *Advances in Materials and Processing Technologies*. – 2024. – Vol. 11 (1). – P. 421–449. – DOI: 10.1080/2374068X.2024.2307103.

20. Patil S.P., Ghadage K.L., Bhawe S.V. Machinability studies of aluminium-based hybrid metal matrix composites – A critical review // *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*. – 2023. – Vol. 3 (1). – P. 94–99. – DOI: 10.48175/IJARSCT-9014.

21. Advancements in aluminum matrix composites reinforced with carbides and graphene: A comprehensive review / M.A. Alam, H.B. Ya, M. Azeem, M. Mustapha, M. Yusuf, F. Masood, R.V. Marode, S.M. Sapuan, A.H. Ansari // *Nanotechnology Reviews*. – 2023. – Vol. 12 (1). – P. 20230111. – DOI: 10.1515/ntrev-2023-0111.

22. Recent development in graphene-reinforced aluminium matrix composite: A review / A. Md Ali, M.Z. Omar, H. Hashim, M.S. Salleh, I.F. Mohamed // *Reviews on Advanced Materials Science*. – 2021. – Vol. 60 (1). – P. 801–817. – DOI: 10.1515/rams-2021-0062.

23. A systematic review on the mechanical, tribological, and corrosion properties of Al 7075 metal matrix composites fabricated through stir casting process / M. Sambathkumar, R. Gukendran, T. Mohanraj, D.K. Karupannasamy, N. Natarajan, D.S. Christopher // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2023. – Spec. iss. – P. 5442809. – DOI: 10.1155/2023/5442809.

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



Investigation on the mechanical properties of stir-cast Al7075-T6-based nanocomposites with microstructural and fractographic surface analysis

Suhas Patil^{1, a}, Satish Chinchani^{2, b, *}

¹ Department of Mechanical Engineering, Vishwakarma Institute of Information Technology, Affiliated to Savitribai Phule Pune University, Pune – 411048, India

² Department of Mechanical Engineering, Vishwakarma Institute of Technology, Affiliated to Savitribai Phule Pune University, Pune – 411037, India

^a  <https://orcid.org/0000-0002-2965-1531>,  suhas.221p0007@vit.ac.in; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>,  satish.chinchani@vit.edu

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 July 2025

Revised: 28 July 2025

Accepted: 05 August 2025

Available online: 15 September 2025

Keywords:

Metal matrix composites (MMCs)

Al7075-T6 alloy

Stir casting

Nanocomposites

Mechanical properties

ABSTRACT

Introduction. Aluminum-based metal matrix composites (MMCs) have garnered considerable attention recently due to their enhanced mechanical properties, making them suitable for a wide range of industrial applications. While other methods exist for incorporating reinforcements into the base metal, stir casting is a particularly efficient process as it promotes a more uniform distribution of reinforcement particles throughout the matrix. *The purpose of this work.* It has been demonstrated that adding silicon carbide (SiC) reinforcements to alloys from the 7XXX series enhances their fatigue strength. The impact of SiC reinforcements on the mechanical properties of A356 composites, such as elongation, compressive strength, tensile strength, and hardness, has also been investigated. However, there is a need for more research on how hybrid reinforcement particles affect the mechanical properties of Al7075-T6 alloy. **Methods.** Considering the broad application spectrum of aluminum matrix composites (AMCs) in the automotive and aerospace sectors, this study examines the influence of varying ratios of nano-sized SiC and graphene reinforcements on the hardness and tensile strength of stir-cast Al7075-T6 aluminum alloy. The scanning electron microscopy — energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS) analysis of the composites' microstructural and fractographic surfaces is also included. The objectives of this work are to develop lightweight, high-performance hybrid metal matrix nanocomposite materials and to explore the feasibility of integrating graphene and SiC nanoparticles into Al7075 alloy. Particular emphasis is placed on the discussion of the mechanical characteristics of these hybrid materials. **Results and discussion.** This study found that mechanical stirring improved the bonding, wetting, and cohesion between the reinforcements and matrix while reducing porosity. Compared to composites produced without stirring, stirred composites exhibited improved strength and toughness due to microstructural changes. The study suggests that appropriate mixing strategies can significantly impact the mechanical properties and surface morphology of Al7075 nanocomposites. The results indicated that the hybrid reinforcement nanoparticles significantly improved both the hardness and tensile strength of the Al7075-T6 alloy. Moreover, a distinct correlation between the ratio of silicon carbide to graphene nanoparticles and the mechanical properties of the specimens was observed. Specifically, an Al7075 specimen reinforced with 0.5 wt.% graphene and 3 wt.% silicon carbide nanoparticles demonstrated superior hardness and tensile strength compared to unreinforced Al7075 and other combinations of silicon carbide and graphene nanoparticles considered in this study. With a 0.5 wt.% graphene content and 1–3 wt.% SiC content, the Al7075-based nanocomposites consistently exhibited a well-defined grain structure with distinct, continuous grain boundaries. The resulting finely dispersed nanoparticles, ranging in size from 62.57 to 91.54 nm, facilitated effective load transfer, grain refinement, and impeded dislocation motion, leading to enhanced mechanical properties. An Al7075-based nanocomposite exhibited superior mechanical performance characterized by a dense, dimpled surface featuring uniform microvoids and minimal particle pull-out. This behavior was attributed to ductile fracture resulting from strong matrix-reinforcement bonding and efficient load transfer. Consistent with these observations, the study indicates that the mechanical behavior of hybrid Al7075-based nanocomposites is significantly influenced by the reinforcement ratio, particle size, and dispersion quality. This information is valuable for advanced industrial applications. The study further demonstrates that a balanced combination of graphene and silicon carbide nanoparticle reinforcements can enhance the mechanical properties of Al7075, emphasizing the need for further investigation into these synergistic effects.

For citation: Patil S., Chinchani S. Investigation on the mechanical properties of stir-cast Al7075-T6-based nanocomposites with microstructural and fractographic surface analysis. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 3, pp. 236–251. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.3-236-251. (In Russian).

References

1. Ajithkumar J.P., Xavier M.A. Cutting force and surface roughness analysis during turning of Al 7075 based hybrid composites. *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 30, pp. 180–187. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.026.

* Corresponding author

Satish Chinchani, Ph.D. (Engineering), Professor

Department of Mechanical Engineering,

Vishwakarma Institute of Information Technology,

Affiliated to Savitribai Phule Pune University, Pune – 411048, India

Tel.: 91-2026950401, e-mail: satish.chinchani@vit.edu

2. Khoshaim A.B., Moustafa E.B., Alazwari M.A., Taha M.A. An investigation of the mechanical, thermal and electrical properties of an AA7075 alloy reinforced with hybrid ceramic nanoparticles using friction stir processing. *Superalloys*, 2023, vol. 13 (1), p. 124. DOI: 10.3390/met13010124.
3. Ma B., Gómez-Recio I., Mazerolles L., Mazeran P.-E., Sanchez C., Delalande S., Portehault D. Ultrasound-assisted liquid-phase synthesis and mechanical properties of aluminum matrix nanocomposites incorporating boride nanocrystals. *Small*, 2021, vol. 18 (4), p. 2104091. DOI: 10.1002/SMLL.202104091.
4. Lacour-Gogny-Goubert A., Doquet V., Novelli M., Tanguy A., Hallais S., Bourgon J., Villeroy B., Arruffat-Massion R. Microstructure, mechanical properties, and thermal stability of Al-Al₂O₃ nanocomposites consolidated by ECAP or SPS from milled powders. *Metals*, 2023, vol. 13 (5), p. 825. DOI: 10.3390/met13050825.
5. Ujah C.O., Kallon D.V.V. Trends in aluminium matrix composite development. *Crystals*, 2022, vol. 12 (10), p. 1357. DOI: 10.3390/cryst12101357.
6. Lakshmikanthan A., Angadi S., Malik V., Saxena K.K., Prakash C., Dixit S., Mohammed K.A. Mechanical and tribological properties of aluminum-based metal-matrix composites. *Materials*, 2022, vol. 15 (17), p. 6111. DOI: 10.3390/ma15176111.
7. Aynalem G.F. Processing methods and mechanical properties of aluminium matrix composites. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 2020 (1), p. 3765791. DOI: 10.1155/2020/3765791.
8. Stergioudi F., Prospathopoulos A., Farazas A., Tsirogiannis E.-Ch., Michailidis N. Mechanical properties of AA2024 aluminum/MWCNTs nanocomposites produced using different powder metallurgy methods. *Metals*, 2022, vol. 12 (8), p. 1315. DOI: 10.3390/met12081315.
9. Shivalingaiah K., Nagarajaiah V., Selvan C., Kariappa S., Chandrashekarappa N., Lakshmikanthan A., Chandrashekarappa M., Linul E.E. Stir casting process analysis and optimization for better properties in Al-MWCNT-GR-based hybrid composites. *Metals*, 2022, vol. 12 (8), p. 1297. DOI: 10.3390/met12081297.
10. Ratna Kumar G.E.V., Senthil Kumar K., Ranga Babu J.A. A review on fabrication and mechanical characterization of particulate reinforced Al-7075 metal matrix composites/hybrid composites. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 2023, vol. 34 (2), pp. 62–71. DOI: 10.37934/araset.34.2.6271.
11. Poovazhagan L., Kalaichelvan K., Rajadurai A., Senthilvelan V. Characterization of hybrid silicon carbide and boron carbide nanoparticles-reinforced aluminum alloy composites. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 64, pp. 681–689. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.09.143.
12. Alam Md. T., Ansari A.H., Arif S., Alam Md. N. Mechanical properties and morphology of aluminium metal matrix nanocomposites-stir cast products. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2017, vol. 3 (4), pp. 600–615. DOI: 10.1080/2374068X.2017.1350543.
13. Patil S.P., Kore S.S., Chinchani S.S., Waware S.Y. Characterization and machinability studies of aluminium-based hybrid metal matrix composites – A critical review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2023, vol. 101 (2), pp. 137–163. DOI: 10.37934/arfmts.101.2.137163.
14. Waware S.Y., Kore S.S., Patil S.P. Heat transfer enhancement in tubular heat exchanger with jet impingement: A review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2023, vol. 101 (2), pp. 8–25. DOI: 10.37934/arfmts.101.2.825.
15. Waware S.Y., Kore S.S., Kurhade A.S., Patil S.P. Innovative heat transfer enhancement in tubular heat exchanger: An experimental investigation with minijet impingement. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2024, vol. 116 (2), pp. 51–58. DOI: 10.37934/arfmts.116.2.5158.
16. Kulkarni P., Chinchani S. A review on machining of nickel-based superalloys using nanofluids under minimum quantity lubrication (NFMQL). *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, 2023, vol. 104 (1), pp. 183–199. DOI: 10.1007/s40032-022-00905-w.
17. Chinchani S., Kore S.S., Hujare P. A review on nanofluids in minimum quantity lubrication machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 68, pp. 56–70. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.05.028.
18. Kulkarni P., Chinchani S. Machining effects and multi-objective optimization in Inconel 718 turning with unitary and hybrid nanofluids under MQL. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2024, vol. 18 (68), pp. 222–241. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.68.15.
19. Kulkarni P., Chinchani S. Machinability of Inconel 718 using unitary and hybrid nanofluids under minimum quantity lubrication. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2024, vol. 11 (1), pp. 421–449. DOI: 10.1080/2374068X.2024.2307103.
20. Patil S.P., Ghadage K.L., Bhawe S.V. Machinability studies of aluminium-based hybrid metal matrix composites – A critical review. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 2023, vol. 3 (1), pp. 94–99. DOI: 10.48175/IJARSCT-9014.



21. Alam M., Ya H., Azeem M., Mustapha M., Yusuf M., Masood F., Marode R., Sapuan S., Ansari A. Advancements in aluminum matrix composites reinforced with carbides and graphene: A comprehensive review. *Nanotechnology Reviews*, 2023, vol. 12 (1), p. 20230111. DOI: 10.1515/ntrev-2023-0111.

22. Md Ali A., Omar M.Z., Hashim H., Salleh M.S., Mohamed I.F. Recent development in graphene-reinforced aluminium matrix composite: A review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2021, vol. 60 (1), pp. 801–817. DOI: 10.1515/rams-2021-0062.

23. Sambathkumar M., Gukendran R., Mohanraj T., Karupannasamy D.K., Natarajan N., Christopher D.S. A systematic review on the mechanical, tribological, and corrosion properties of Al 7075 metal matrix composites fabricated through stir casting process. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2023, spec. iss., p. 5442809. DOI: 10.1155/2023/5442809.

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>).