

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. №2 (176). С.24-33.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. №2 (176). P.24-33.

Научная статья
УДК 621.791.9
doi: 10.30987/2223-4608-2026-2-24-33

Селективное лазерное плавление композитов на основе алюминиевых сплавов, армированных углеродными нанотрубками

Дмитрий Владимирович Бокарёв¹, аспирант
Артемий Витальевич Аборкин², к.т.н.

^{1,2} *Владимирский государственный университет, Владимир, Россия*

¹ bokarev.1998@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2964-2651>

² aborkin@vlsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4979-7164>

Аннотация. В данной обзорной работе рассмотрено современное состояние вопроса армирования порошков алюминиевых сплавов углеродными нанотрубками (УНТ) для последующего использования в получении изделий с повышенными физико-механическими свойствами методом селективного лазерного плавления. Среди основных вызовов, с которыми сталкиваются исследовательские коллективы, занимающиеся вопросами консолидации путем селективного лазерного плавления и изучения композитов данной системы, отмечены проблемы, связанные с обеспечением равномерности распределения углеродных нанотрубок в алюминиевой матрице и предотвращением избыточной реакции между алюминием и углеродными нанотрубками с формированием фазы карбида алюминия Al_4C_3 . Для преодоления данных вызовов предложена стратегия *ex-situ* модификации углеродных нанотрубок с формированием специальных интерфейсов на границе раздела перед их введением в матрицу. Наличие промежуточного слоя из различных металлических или керамических фаз между углеродными нанотрубками и алюминиевой матрицей способно предотвращать избыточное формирование карбидной фазы Al_4C_3 благодаря ограничению диффузии атомов на границе раздела, а также улучшать смачиваемость углеродных нанотрубок алюминием и способствовать дополнительному формированию интерметаллических или керамических фаз, улучшающих межфазное взаимодействие матрицы с наполнителем. Предложены наиболее перспективные материалы для формирования интерфейсов различными методами *ex-situ* модификации с точки зрения улучшения смачиваемости углеродных нанотрубок алюминием, а также повышения когерентности границы раздела. Это должно способствовать повышению уровня физико-механических свойств композитных материалов и расширять диапазон эксплуатации изготовленных из них методом селективного лазерного плавления изделий (например, в условиях повышенных нагрузок или температур).

Ключевые слова: композитные материалы, селективное лазерное плавление, углеродные нанотрубки, аддитивные технологии, интерфейс

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВлГУ).

Для цитирования: Бокарёв Д.В., Аборкин А.В. Селективное лазерное плавление композитов на основе алюминиевых сплавов, армированных углеродными нанотрубками // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 2 (176). С. 24–33. doi: 10.30987/2223-4608-2026-2-24-33

Selective laser melting of composites based on aluminum alloys carbon reinforced with carbon nanotubes

Dmitry V. Bokarev¹, PhD student

Artemy V. Aborkin², Ph.D Eng.

^{1,2} Vladimir State University, Vladimir, Russia

¹ bokarev.1998@list.ru

² aborkin@vlsu.ru

Abstract. This review paper examines the current necessity of carbon reinforcing aluminum alloy powders with carbon nanotubes (CNTs) for subsequent use in the production of products with enhanced physical and mechanical properties by selective laser melting. Among the main challenges faced by research teams dealing with issues of consolidation through selective laser melting and the study of composites of this system, problems related to ensuring the uniform distribution of carbon nanotubes in an aluminum matrix and preventing excessive reaction between aluminum and carbon nanotubes with the formation of aluminum carbide phase Al_4C_3 are noted. To find the solution to these problems, a strategy for ex-situ modification of carbon nanotubes with the formation of special interfaces at the boundary before their introduction into the matrix is proposed. The presence of an intermediate layer of various metallic or ceramic phases between carbon nanotubes and an aluminum matrix can prevent excessive formation of the Al_4C_3 carbide phase by limiting the diffusion of atoms at the interface, as well as improve the wettability of carbon nanotubes with aluminum and promote additional formation of intermetallic or ceramic phases that improve the interfacial interaction of the matrix with the filler. The most promising materials for forming interfaces by various ex-situ modification methods are proposed in terms of improving the wettability of carbon nanotubes with aluminum, as well as increasing the coherence of the interface. This should help to increase the level of physical and mechanical properties of composite materials and expand the range of operation of products made of these materials due to selective laser melting (for example, under conditions of increased loads or temperatures).

Keywords: composite materials, selective laser melting, carbon nanotubes, additive technologies, interface

Acknowledgments: this work was completed as part of a state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic FZUN-2024-0004, state assignment to VISU).

For citation: Bokarev D.V., Aborkin A.V. Selective laser melting of composites based on aluminum alloys carbon reinforced with carbon nanotubes / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 2 (176). P. 24–33. doi: 10.30987/2223-4608-2026-2-24-33

Введение

Производство алюмоматричных композитов является эффективным способом получения конструкционных материалов, обеспечивающим возможность управления свойствами композита за счет комбинирования алюминиевых сплавов, типа, размера и формы упрочняющих частиц. При этом значительное внимание исследователей в настоящее время уделяется созданию алюмоматричных композитов с наноразмерными армирующими фазами. К наиболее важным для практики свойствам алюмоматричных композитов следует отнести высокую удельную прочность (отношение прочности к плотности), отличную теплопроводность и хорошие электропроводность и коррозионную стойкость, которые делают эти материалы востребованными в

автомобильной, авиакосмической и судостроительной промышленности.

Традиционно, для получения алюмоматричных композиционных материалов используют литейные технологии, порошковую металлургию, а также различные методы наплавки и напыления. Однако, в последние годы всё большую популярность приобретает метод селективного лазерного плавления (СЛП), который может обеспечивать получение изделий со сложной геометрией при значительной экономии материала.

Одним из наиболее перспективных видов армирующих наночастиц для создания композитов на основе алюминия и его сплавов являются углеродные нанотрубки (УНТ). Во-первых, это обусловлено их уникальными физико-механическими и теплофизическими свойствами. Так, например, модуль Юнга УНТ,

измеренный с применением различных экспериментальных техник, в зависимости от хиральности, количества стенок, диаметра и дефектности структуры может достигать от ~ 1 до 4 ТПа, прочность при осевом растяжении 63...110 ГПа, теплопроводность $\approx 3000...6000 \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$, а коэффициент теплового расширения близок к нулю в температурном интервале 100...350 °С. Во-вторых, связано с их низкой плотностью 1,1...1,8 г/см³, которая значительно ниже плотности большинства керамических частиц и несколько ниже плотности алюминиевых сплавов и поэтому не ведет к росту плотности композита, а, следовательно, и к снижению весовой эффективности при больших концентрациях наполнителя.

Вместе с тем, в настоящее время повышение уровня свойств алюмоматричных композиционных материалов, армированных УНТ, полученных с помощью СЛП, остается значительно ниже, чем у алюмоматричных композитов, полученных другими методами порошковой металлургии. Это связано с тем, что полноценного использования потенциала свойств УНТ в композитах, получаемых СЛП, не достигнуто. К ключевым проблемам, препятствующим этому, следует отнести: нарушение структурной целостности (деградация) УНТ при создании композиционных материалов и слабую межфазную связь на границе «матрица – армирующая фаза».

Таким образом, чтобы повысить эффективность использования высоких механических свойств УНТ при создании композитов методом СЛП, необходимо учитывать многие аспекты, связанные не только с технологией СЛП композиционного материала, но и с совместимостью матрицы и наполнителя. Связь между матричным материалом и относительно «инертными» УНТ имеет решающее значение для формирования свойств композита. Матричный материал должен иметь хорошую адгезию к поверхности УНТ, чтобы нагрузка могла передаваться на УНТ и предотвратить взаимное скольжение двух контактирующих поверхностей.

Особенности изменения фазового состава и свойств композитов системы Al – УНТ, полученных методом СЛП

Для селективного лазерного плавления используются порошки мелкой (< 100 мкм) фракции со сферической формой частиц, которая обеспечивает равномерность нанесения слоя при 3D-печати. Технология получения композиционных порошков для СЛП должна обеспечивать максимально возможную однородность распределения армирующей фазы при сохранении формы частиц и размеров порошка матричного сплава, а также структурной целостности УНТ. Одним из подходов к получению порошковых композитов для СЛП является *in-situ* выращивание УНТ на частицах алюминиевого порошка. Это обеспечивает высокую сферичность и сыпучесть композиционного порошка, а также хорошую равномерность дисперсии и силу сцепления УНТ с поверхностью частиц порошка. Однако, при данном способе синтеза композиционных порошков системы Al – УНТ большая часть УНТ вступает в реакцию с матрицей, вследствие чего потенциал несущей способности УНТ, из-за их деградации, не может быть использован полностью. Поэтому, наиболее перспективным все же представляется подход, связанный со смешиванием компонентов смеси за счет механической обработки в мельницах на режимах, обеспечивающих максимально возможную равномерность распределения УНТ при сохранении исходной сферической формы частиц матричного порошка. Известно несколько работ по получению композиционных порошков системы Al – УНТ для изготовления изделий методом СЛП механической обработкой в планетарных мельницах при частотах вращения от 100 до 300 мин⁻¹ [1 – 3]. Сравнительный анализ результатов исследований показал, что с увеличением частоты вращения водила или времени обработки порошковых композитов в мельнице увеличивается степень межфазной реакции между УНТ и алюминиевыми

частицами, приводящая к формированию частиц карбида алюминия Al_4C_3 . Результаты испытаний композитов показали, что армирование УНТ улучшает физико-механические свойства объемных образцов. Сравнительный анализ результатов из различных публикаций показал важность задачи сохранения целостности структуры УНТ в ходе подготовки порошковых композиций. Это связано с тем, что воздействие на материал лазерного излучения с одинаковой плотностью энергии лазерного излучения (например, 130...140 Дж/мм³), может как не привести к формированию карбида алюминия Al_4C_3 в случае незначительного повреждения структуры УНТ в ходе механической обработки [2], так и привести к частичной межфазной реакции [1], а также и к полному превращению УНТ в стержни из карбида

алюминия Al_4C_3 . Это связано с тем, что на бездефектной поверхности УНТ химические реакции с большинством веществ протекают медленно из-за ее инертности, однако, реакционная способность дефектных участков в значительной степени повышается. Дефектные участки формируются не только в ходе синтеза УНТ, но и на этапе механической обработки из-за образования оборванных кончиков УНТ при ударах размольных тел. Определенная степень межфазной реакции с формированием незначительного количества Al_4C_3 фазы улучшает уровень физико-механических свойств композитных материалов [4] благодаря улучшению межфазного взаимодействия с сохранением высокого несущего потенциала самих УНТ (рис. 1).

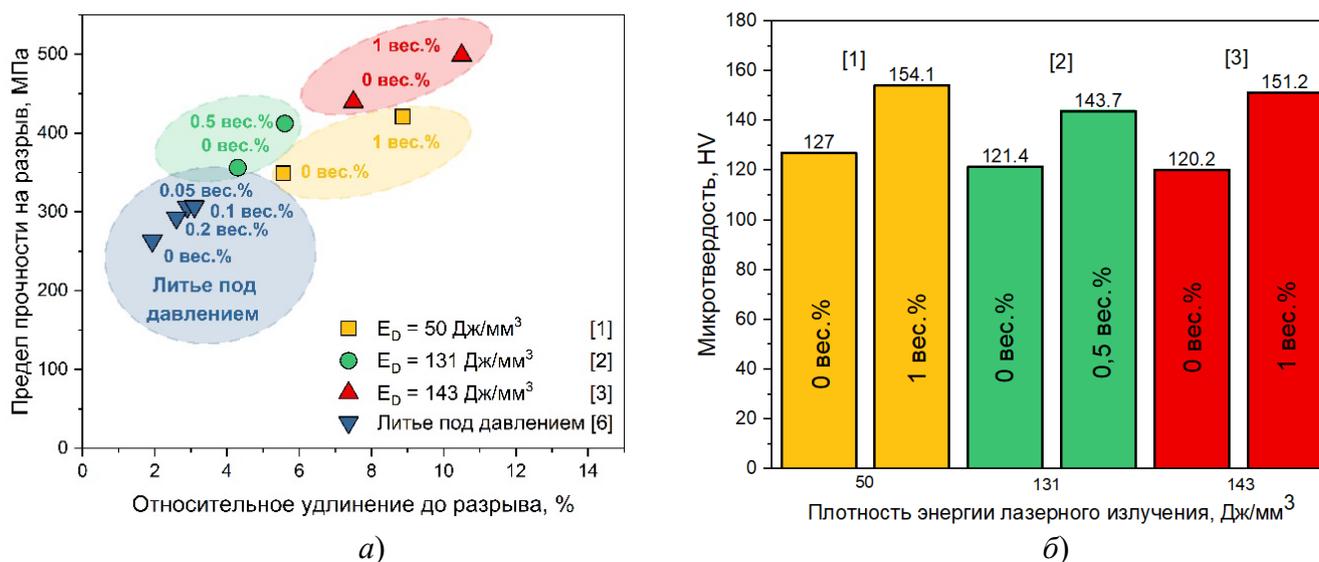


Рис. 1. Характеристики прочности и пластичности (а), а также микротвердости (б) композитных материалов на основе алюминиевых сплавов

Fig. 1. Strength and ductility characteristics (a), together with microhardness (b) of composite materials based on aluminum alloys

Наилучший комплекс физико-механических свойств (предел прочности на разрыв в 498,6 МПа, микротвердость 151,2 HV и относительное удлинение в 10,5 %) был продемонстрирован при обработке композита на основе AlSi10Mg, полученного шаровым размолотом при 300 мин⁻¹ [3]. В этом случае, эффект

повышения микротвердости и предела прочности на разрыв составлял 31 HV и ~ 100 МПа (или 25 и 13 %, соответственно). Схожих показателей можно добиться при использовании в качестве армирующей фазы углеродного волокна [4], то есть УНТ в композитах, получаемых методом СЛП-синтеза, не могут

реализовать весь свой потенциал в качестве наполнителя, так как сами по себе имеют значительно более высокие значения механических свойств по сравнению с углеволокном. При этом, например, в исследовании [5] отливки АК9ч + 0,1 % вес. УНТ обладают на 15 % более высоким пределом текучести по сравнению с матрицей, которая является литейным аналогом сплава AlSi10Mg. В этом исследовании доля УНТ в композите в 10 раз ниже. В исследовании [6] проводили получение композитных образцов на основе сплава AlSi9Cu3Mg путем литья под давлением. Использование в качестве частиц армирующей фазы УНТ в количестве 0,05 или 0,1 % вес. обеспечивало увеличение прочности образцов на разрыв на 16,5 % по сравнению с матричным материалом. В работе [7] проводили консолидацию композиционных порошков методом искрового плазменного спекания. Микротвердость композитных образцов возросла на 15 %, а предел прочности на 30 % по сравнению с образцами из чистого алюминия. То есть, при классических маршрутах получения объемных композитных образцов (литье или порошковая металлургия) УНТ обеспечивают схожий прирост физико-механических свойств при меньшей на порядок весовой доле.

Механизмы повышения прочности Al – УНТ композитов, полученных методом СЛП

К основным механизмам повышения прочности композитов, полученных в том числе и методом СЛП, следует отнести: твердорастворное, зернограничное, дисперсное и дислокационное упрочнения. Так, например, УНТ, находящиеся в алюминиевой матрице, в соответствии с эффектом Зинера, способны снижать рекристаллизационный рост зерна при воздействии лазерного луча на порошковый слой за счет торможения межзеренных границ. Это должно способствовать формированию более тонкой структуры композиционного материала, и, таким образом, одним из основных

механизмов, благодаря которому должна увеличиться их прочность, будет эффект Холла-Петча, который связывает повышение прочности и твердости с увеличением объемной доли межзеренных границ в материале. Помимо этого, прочность композиционных материалов должна возрасти из-за большой разницы в коэффициентах теплового расширения УНТ с матричным материалом, что должно привести к большой плотности дислокаций. Большинство исследователей сходится во мнении, что основной причиной повышения физико-механических свойств образцов, полученных СЛП-методом, является утончение структуры материала [1, 2]. Для дополнительного снижения размера формирующегося зерна матричного сплава, необходимо, чтобы в формирующейся ванне расплава армирующие частицы являлись гетерогенными центрами кристаллизации. В соответствии с принципом структурного и размерного соответствия Данкова-Конобеевского, максимальное отклонение периода кристаллической решетки растущего кристалла от периода кристаллической решетки матрицы не должно превышать 8 % [8]. Как известно, алюминий обладает гранецентрированным кубическим типом кристаллической решетки, а УНТ – гексагональным, и отклонение периода кристаллической решетки для границ металлов с ГЦК-типом решетки и структур с гексагональным типом решетки направления $\langle 011 \rangle \{ 111 \}$ ГЦК // $\langle 1010 \rangle \{ 0001 \}$ составляет 12,33 % [9]. Эффекты от введения УНТ оказываются сравнительно невысокими вследствие того, что исходные УНТ не могут являться гетерогенными центрами кристаллизации при формировании ванны расплава, и, вероятно, не могут значительно снизить размер зерна матричного материала. Преодолеть высокую степень отклонений периодов кристаллических решеток алюминия и УНТ можно с помощью модификации поверхности УНТ. Наблюдения тонкой структуры с помощью просвечивающей электронной микроскопии в исследовании [9], например, демонстрируют улучшение когерентности в случае наличия на

границе УНТ и алюминия переходного нанослоя меди: величина отклонения периода в этом случае снижается более чем на порядок по сравнению с исходной границей Al – УНТ и составляет 0,59 %. Таким образом, УНТ с тонким слоем медного покрытия, теоретически, могут являться гетерогенными центрами кристаллизации, что будет способствовать формированию гораздо более тонкозернистой структуры композитного материала.

Методы модификации поверхности УНТ и ее влияние на смачиваемость и межфазное взаимодействие с алюминием

Существует большое количество разнообразных ex-situ методов поверхностной модификации УНТ. Принципиальное отличие ex-situ подходов к формированию межфазного слоя состоит в том, что формирование покрытия на поверхности УНТ происходит до введения в алюминиевую матрицу, а при in-situ подходе – на этапе получения порошковых композитов и/или их консолидации в ходе внутренних химических реакций. Ex-situ группа методов включает в себя технологические подходы, состоящие в химическом получении покрытий из раствора, электролизе, осаждении из газовой фазы, смешивании на молекулярном уровне, золь-гель синтезе и другие. В настоящее время существует много работ по ex-situ модификации УНТ для улучшения физико-механических свойств образцов, полученных прессованием или литьем, а также покрытий,

полученных газодинамическим напылением. Краткий обзор работ по влиянию различных ex-situ интерфейсов на фазовый состав композитов системы представлен в работе [10]. Однако все еще неизвестно о публикациях по применению ex-situ модификации УНТ для производства композиционных материалов СЛП-методом. Следует отметить, что поверхностная модификация УНТ перед введением в алюминиевую матрицу обладает большим потенциалом в области подготовки порошковых композиций для СЛП, так как термодинамические расчеты предсказывают ингибирование реакции карбидообразования между УНТ и алюминиевой матрицей благодаря получению на поверхности УНТ покрытий из таких фаз, как TiC, Ni и Cu. Помимо этого, при формировании межфазного металлического или керамического слоя происходит изменение адгезии на границе Al – УНТ.

Смачиваемость является важным условием обеспечения адгезии. Характеристикой смачиваемости поверхности является контактный угол Θ , а оценить изменение адгезии можно по величине работы адгезии, рассчитанной по уравнению Юнга-Дюпре.

Результаты расчета величины работы адгезии в различных системах на основании приведенных в исследовательских работах величинах краевого угла смачивания при взаимодействии расплавленного алюминия с УНТ (или углеволокном) с предварительно полученными интерфейсами приведены в табл. 1.

1. Оценка смачиваемости различных УНТ-гибридных наноструктур алюминием по величине контактного угла смачивания при ~ 1100 К

1. Evaluation of the wettability of various CNT hybrid nanostructures by aluminum based on the contact angle of wetting at ~ 1100 K

Система	Краевой угол смачивания Θ , °	Работа адгезии, мДж/м ²	Ссылка
Al – УНТ	140	200	[11]
Al – Ni / УНТ	81,9	970	[11]
Al – Cu / УНТ	91	835	[12]
Al – TiC / углеволокно	60	1275	[13]

Анализ приведенных выше данных свидетельствует о том, что исходные УНТ обладают низкой смачиваемостью расплавом алюминия при ~ 1100 К [11], вследствие чего, наличие на границе раздела любого из приведенных материалов способствует улучшению смачиваемости УНТ алюминием. Наибольшая работа адгезии с алюминием достигается при покрытии поверхности УНТ наночастицами никеля, при котором работа адгезии увеличивается в 4,9 раз [11]. Однако в работе [14] на основании результатов спектроскопии комбинационного рассеяния света авторами сделаны выводы о том, что атомы никеля из покрытия на этапе механической обработки в мельнице растворяются в матрице, оставляя дефекты на поверхности УНТ и значительно повышая плотность их расположения. Это в значительной степени интенсифицирует реакцию формирования Al_4C_3 . В случае покрытия поверхности УНТ наночастицами меди работа адгезии с алюминием возрастает в 4,2 раза [12], а прочная связь покрытия с УНТ обеспечивается химическим взаимодействием между частицами меди и предварительно модифицированными УНТ. В работах по ex-situ модификации УНТ медными наночастицами отмечен эффект ингибирования реакции карбидообразования на границе раздела Al – УНТ за счет устранения дефектов УНТ медными наночастицами и уменьшения количества активных центров карбидообразования на поврежденных участках УНТ.

Помимо улучшения межфазного взаимодействия за счет создания плотных и когерентных интерфейсов, само наличие покрытий также может способствовать in-situ образованию дополнительных промежуточных фаз на границе раздела, например, в случае медных покрытий, это могут быть фазы Al_2Cu или $AlCu$. Другим соединением, перспективным для формирования интерфейса на границе Al – УНТ, является карбид титана TiC , жаропрочное соединение с ГЦК-решеткой. Известно, что покрытие поверхности углеволокна слоем из карбида титана приводило к увеличению работы адгезии с алюминием в 6,4 раз

[13]. При этом, несколькими независимыми научными коллективами отмечается следующая особенность формирования покрытия из частиц TiC на поверхности УНТ. В ходе синтеза покрытия атомы титана проникают в дефекты УНТ и взаимодействуют с их поверхностью, формируя наноблоки из TiC , которые связывают внешние стенки УНТ с внутренними. Это способствует повышению передачи нагрузки на внутренние стенки УНТ и способствует прочной связи покрытия с поверхностью УНТ.

В работе [15] на основании результатов спектроскопии комбинационного рассеяния света сделаны выводы о защите целостности структуры УНТ за счет наличия покрытия из TiC на этапе высокоэнергетического шарового размола и предотвращения реакции карбидообразования в композите, армированном TiC / УНТ наноструктурами на этапе горячего прессования. Высокотемпературные испытания на сжатие композитов на основе AMg_2 , армированного TiC / УНТ показали, что напряжение текучести композитов, армированных исходными УНТ, составляет 300 и 86 МПа при 300 и 500 °С, а в случае армирования аналогичной весовой долей наноструктур напряжение текучести составляет 350 и 137 МПа при 300 и 500 °С, соответственно. Другими словами, наличие покрытия из TiC на поверхности УНТ повышало величину сопротивления высокотемпературной деформации композита при температурах 300...500 °С на 14...37 % по сравнению с композитом, армированным УНТ. Это свидетельствует о защите поверхности УНТ от реакции карбидообразования в алюмоматричных композитных материалах за счет покрытия из TiC . Таким образом, армирование сплава $AlSi10Mg$ УНТ-гибридными наноструктурами, покрытыми частицами или сплошным слоем TiC или Cu может повысить его жаропрочность по сравнению с матричным сплавом [16, 17], для которого характерно значительное снижение механических свойств под воздействием высоких температур из-за разрушения сетки кремния [18].

Заклучение

Композиты на основе алюминиевых сплавов, армированные УНТ, являются перспективными материалами для аддитивных технологий благодаря сочетанию характерных для матрицы низкой плотности и коррозионной стойкости и повышению прочности, жесткости и износостойкости. Ключевыми проблемами получения Al – УНТ композитов методом СЛП являются нарушение структурной целостности УНТ при воздействии лазерного излучения и слабая межфазная связь на границе «матрица-армирующая фаза». Одним из вариантов решения данных проблем является ex-situ модификация поверхности УНТ путем создания металлических или керамических покрытий, которые позволят сохранить структурную целостность УНТ в условиях СЛП и повысить прочность межфазной границы «матрица-армирующая фаза». Правильный выбор материала покрытия должен способствовать повышению физико-механических и трибологических свойств композитов за счет совокупности механизмов зернограничного, дисперсного и дислокационного упрочнения. При этом, перспективным является модификация поверхности УНТ наночастицами меди. Это может позволить ингибировать реакции карбидообразования, улучшить межфазное взаимодействие за счет создания плотных и когерентных интерфейсов, а также способствовать in-situ образованию дополнительных интерметаллидных фаз на границе раздела. В то же время, модификация поверхности УНТ медными или керамическими покрытиями из карбида титана, кроме ограничения межфазной химической реакции, позволят повысить жаропрочность композиционного материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gu D., Rao X., Dai D., Ma C., Xi L., Lin K. Laser additive manufacturing of carbon nanotubes (CNTs) reinforced aluminum matrix nanocomposites: Processing

optimization, microstructure evolution and mechanical properties // Additive Manufacturing. 2019. Vol. 29. P. 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100801>

2. Wang L., Chen T., Wang S. Microstructural characteristics and mechanical properties of carbon nanotube reinforced AlSi10Mg composites fabricated by selective laser melting // Optik. 2017. Vol. 143. P. 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.06.086>

3. Luo S., Li R., He P., Yue H., Gu J. Investigation on the Microstructure and Mechanical Properties of CNTs-AlSi10Mg Composites Fabricated by Selective Laser Melting // Materials. 2021. Vol. 14. P. 1–14. <https://doi.org/10.3390/ma14040838>

4. Ожерелков Д.Ю., Пелевин И.А., Наливайко А.Ю., Зотов Б.О., Федоренко Л.В., Громов А.А. Применение углеродных нановолокон в аддитивном производстве алюмоматричных композитов // Деформация и разрушение материалов. 2023. Vol. 4. P. 15–23. <https://doi.org/10.31044/1814-4632-2023-4-15-23>

5. Романов А.Д., Романова Е.А., Миронов А.А., Кикеев В.А., Обьедков А.М., Каверин Б.С., Вилков И.В. Разработка технологии получения алюмоматричного композиционного материала, упрочненного многостенными углеродными нанотрубками // Металлург. 2024. Vol. 3. P. 91–94. https://doi.org/10.52351/00260827_2024_3_91

6. Špada V., Stanić D., Holjevac G.T., Brnardić I. Новые пути получения нанокompозитов на основе многостенных углеродных нанотрубок и алюминиевого сплава методом литья под высоким давлением // Металлург. 2022. Vol. 9. P. 62–70. https://doi.org/10.52351/00260827_2022_09_62

7. Бунаков Н.А., Козлов Д.В., Голованов В.Н., Климов Е.С., Ефимов М.С. Композиционный материал на основе алюминия с добавлением многостенных углеродных нанотрубок: получение, структура, свойства // Известия вузов. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2016. Vol. 2 (38). P. 134–146. <https://doi.org/10.21685/2072-3040-2016-2-11>

8. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю. Пути решения научной проблемы модифицирования литейных сплавов // Литьё и металлургия. 2018. Vol. 4 (93). P. 15–18. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-4-15-18>

9. Guo B., Chen Y., Wang Z., Yi J., Ni S., Du Y., Li W., Song M. Enhancement of strength and ductility by interfacial nano-decoration in carbon nanotube/aluminum matrix composites // Carbon. 2020. Vol. 159. P. 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.12.038>

10. Aborkin A.V., Babin D.M., Bokaryov D.V. Control of Al4C3 phase formation in aluminum matrix composites reinforced with carbon nanostructures // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 431. P. 06012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343106012>

11. Zhang P. X., Yan H., Zeng M. Decorating nano Ni on the surface of CNTs and their wettability behaviors

analysis with aluminum alloy // *Materials Letters*. 2023. Vol. 335. P. 133795. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133795>

12. Zeng M., Dong X., Zhang P., Li K., Yan H. Remarkable improvement of wettability of Cu-coated carbon nanotubes by molten aluminum // *Diamond and Related Materials*. 2023. Vol. 137. P. 110155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110155>

13. Contreras A. Wetting of TiC by Al-Cu alloys and interfacial characterization // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2007. Vol. 311 (1). P. 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.02.041>

14. Anas N. S., Ramakrishna M., Vijay R. Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of CNT/Ni Coated CNT-Dispersed Al Alloys Produced by High Energy Ball Milling and Hot Extrusion // *Metals and Materials International*. 2020. Vol. 26 (2). P. 272–283. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00327-x>

15. Бокарёв Д.В., Панкратов С.А., Аборкин А.В. Влияние поверхностной модификации нанотрубок на сопротивление деформации композитного материала на основе алюминия в условиях повышенных температур // *Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества: Материалы докладов IX Международной конференции с элементами научной школы для молодежи*. 2022. P. 43–44. EDN MSMYIQ

16. Бенариев И., Дынин Н.В., Кузнецова П.Е., Сбитнева С.В. Изменение структуры и механических свойств при термической обработке алюминиевого сплава AlSi10MgCu, полученного методом селективного лазерного сплавления // *Технология легких сплавов*. 2023. С. 5–18. <https://doi.org/10.24412/0321-4664-2023-4-5-18>

17. Сбитнева С.В., Зайцев Д.В., Бенариев И. Особенности структуры термически упрочняемого алюминиевого сплава AlSi10MgCu, полученного методом селективного лазерного сплавления // *Труды ВИАМ*. 2024. С. 15–24. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2024-0-9-15-24>

18. Jiang Z., Sun J., Berto F., Wang X., Qian G. Усталость и разрушение сплава AlSi10Mg, полученного методом селективного лазерного плавления // *Физическая мезомеханика*. 2023. P. 5–29. https://doi.org/10.55652/1683-805X_2023_26_2_5

REFERENCES

1. Gu D., Rao X., Dai D., Ma C., Xi L., Lin K. Laser additive manufacturing of carbon nanotubes (CNTs) reinforced aluminum matrix nanocomposites: Processing optimization, microstructure evolution and mechanical properties // *Additive Manufacturing*. 2019. Vol. 29. P. 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100801>

2. Wang L., Chen T., Wang S. Microstructural characteristics and mechanical properties of carbon nanotube reinforced AlSi10Mg composites fabricated by selective laser melting // *Optik*. 2017. Vol. 143. P. 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.06.086>

3. Luo S., Li R., He P., Yue H., Gu J. Investigation on the Microstructure and Mechanical Properties of CNTs-AlSi10Mg Composites Fabricated by Selective Laser Melting // *Materials*. 2021. Vol. 14. P. 1–14. <https://doi.org/10.3390/ma14040838>

4. Cheryolkov D.Yu., Pelevin I.A., Nalivaiko A.Yu., Zotov B.O., Fedorenko L.V., Gromov A.A. Use of carbon nanofibers in the additive manufacturing of aluminum matrix composites // *Deformation & Fracture of Materials*. 2023, vol. 4. Pp. 15–23. <https://doi.org/10.31044/1814-4632-2023-4-15-23>

Romanov A.D., Romanova E.A., Mironov A.A., Kikeev V.A., Obedkov A.M., Kaverin B.S., Vilkov I.V. Technology for producing aluminum matrix composite reinforced with multi-walled carbon nanotubes // *Metallurgist*. 2024, vol. 3. Pp. 91–94. https://doi.org/10.52351/00260827_2024_3_91

6. Špada V., Stanić D., Holjevac G.T., Brnardić I. New methods for producing nanocomposites based on multi-walled carbon nanotubes and aluminum alloy by high-pressure casting // *Metallurg*. 2022. Vol. 9. P. 62–70. https://doi.org/10.52351/00260827_2022_09_62

7. Bunakov N.A., Kozlov D.V., Golovanov V.N., Klimov E.S., Efimov M.S. An aluminum-based composite material with multi-walled carbon nanotubes: fabrication, structure and properties // *Izvestiya vuzov. The Volga region. Physical and mathematical sciences*. 2016, vol. 2 (38), pp. 134–146. <https://doi.org/10.21685/2072-3040-2016-2-11>

8. Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu. Solutions of the scientific problem of modifying foundry alloys // *Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 4, Pp. 15–18. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-4-15-18>

9. Guo B., Chen Y., Wang Z., Yi J., Ni S., Du Y., Li W., Song M. Enhancement of strength and ductility by interfacial nano-decoration in carbon nanotube/aluminum matrix composites // *Carbon*. 2020. Vol. 159. P. 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.12.038>

10. Aborkin A.V., Babin D.M., Bokaryov D.V. Control of Al4C3 phase formation in aluminum matrix composites reinforced with carbon nanostructures // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 431. P. 06012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343106012>

11. Zhang P. X., Yan H., Zeng M. Decorating nano Ni on the surface of CNTs and their wettability behaviors analysis with aluminum alloy // *Materials Letters*. 2023. Vol. 335. P. 133795. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133795>

12. Zeng M., Dong X., Zhang P., Li K., Yan H. Remarkable improvement of wettability of Cu-coated carbon nanotubes by molten aluminum // *Diamond and Related*

Materials. 2023. Vol. 137. P. 110155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110155>

13. Contreras A. Wetting of TiC alloys and interfacial characterization // Journal of Colloid and Interface Science. 2007. Vol. 311 (1). P. 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.02.041>

14. Anas N. S., Ramakrishna M., Vijay R. Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of CNT/Ni Coated CNT–Dispersed Al Alloys Produced by High Energy Ball Milling and Hot Extrusion // Metals and Materials International. 2020. Vol. 26 (2). P. 272–283. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00327-x>

15. Bokarev D.V., Pankratov S.A., Aborkin A.V. The effect of surface modification of carbon nanotubes on the heat resistance of an aluminum matrix composite // Functional nanomaterials and high-purity substances: proceedings of the IX-th International Conference with elements of

a scientific school for young people. 2022, pp. 43–44. EDN MSMYIQ

16. Benarieb I., Dynin N.V., Kuznetsova P.E., Sbitneva S.V. Changes in the structure and mechanical properties during heat treatment of AlSi10MgCu Aluminum alloy produced by selective laser melting. // Technology of light alloys. 2023, pp. 5–18. <https://doi.org/10.24412/0321-4664-2023-4-5-18>

17. Sbitneva S.V., Zaitsev D.V., Benarieb I. Results of structural studies of aluminum alloys of the AlSi₁₀MgCu system obtained by selective laser melting // Proceedings of VIAM. 2024, pp. 15–24. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2024-0-9-15-24>

18. Jiang Z., Sun J., Berto F., Wang X., Qian G. Усталость и разрушение сплава AlSi10Mg, полученного методом селективного лазерного плавления // Физическая мезомеханика. 2023. P. 5–29. https://doi.org/10.55652/1683-805X_2023_26_2_5

Вклад авторов: Бокаре́в Д.В. - сбор материала, обработка материала, написание статьи. Аборкин А.В. - сбор материала, обработка материала, научное редактирование текста. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: D.V. Bokarev - data collection, data processing, article writing. A.V. Aborkin - data collection, data processing, scientific editing. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.07.2025; одобрена после рецензирования 14.07.2025; принята к публикации 30.08.2025.

The article was submitted 10.07.2025; approved after reviewing 14.07.2025; assepted for publication 30.08.2025.