

УДК 621.762:620.22-419.8:669.715
AGRIS P33

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/130/28>

СИНТЕЗ НАНОКОМПОЗИТОВ Al–TiC И Al–WC МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

©Жумагулова Б. Т., ORCID: 0009-0000-4102-2634, Ошский государственный университет,
г. Ош, Кыргызстан, zhumagulova.barchyngul@gmail.com

©Мурзаibraimов Б. М., ORCID: 0009-0006-7940-8392, д-р хим. наук,
академик НАН КР, Институт химии и фитотехнологий НАН КР,
г. Бишкек, Кыргызстан, murzubraimov.b@gmail.com

SYNTHESIS OF Al–TiC AND Al–WC NANOCOMPOSITES BY ELECTRICAL SPARK DISPERSION AND INVESTIGATION OF THEIR PROPERTIES

©Zhumagulova B., ORCID: 0009-0000-4102-2634, Osh State University,
Osh, Kyrgyzstan, 0777859505@mail.ru

©Murzaibraimov B., ORCID: 0009-0006-7940-8392, Dr. habil., Academician of the National
Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Institute of Chemistry and Phytotechnologies
of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic,
Bishkek, Kyrgyzstan, murzubraimov.b@gmail.com

Аннотация. Наноккомпозиты на основе алюминиевой матрицы, армированные карбидом титана TiC или карбидом вольфрама WC, обладают высокой прочностью, износостойкостью и термостабильностью. Они применяются в автомобильной, транспортной и оборонной промышленности для создания ответственных узлов, работающих при экстремальных нагрузках. Цель исследования — разработка технологии получения алюмоматричных наноккомпозитов Al–TiC и Al–WC методом электроискрового диспергирования, а также исследование их фазового состава, кристаллической структуры, морфологии, элементного состава и особенностей формирования армирующих карбидных фаз для оценки перспектив их применения в качестве высокопрочных и износостойких конструкционных материалов. В результате электроискрового диспергирования были получены порошки наноккомпозитов со средним размером частиц от 5 до 100 нм в зависимости от типа карбидной системы и режимов обработки. Фазовый анализ методом рентгеновской дифракции (XRD) подтвердил наличие α -Al и соответствующих карбидных фаз (TiC, WC) без существенного образования нежелательных вторичных соединений. Обнаружено незначительное содержание оксида алюминия, обусловленное поверхностным окислением в процессе обработки. Расчеты размеров кристаллитов по уравнению Шеррера показали, что их размеры находятся в диапазоне 15–60 нм. Незначительные искажения кристаллической решетки обусловлены межфазными напряжениями между алюминиевой матрицей и карбидными упрочняющими частицами. Среди исследованных материалов наноккомпозит Al–TiC продемонстрировал наиболее однородную микроструктуру, тогда как системы Al–WC характеризовались более высокой плотностью и повышенной стабильностью карбидной фазы благодаря термодинамическим особенностям систем W–C. Полученные результаты свидетельствуют о том, что электроискровое диспергирование является быстрым, энергоэффективным и масштабируемым методом получения алюмоматричных наноккомпозитов, армированных карбидами, с контролируемым фазовым составом и наноструктурой. Синтезированные материалы представляют значительный интерес для создания перспективных

конструкционных материалов, предназначенных для эксплуатации в условиях повышенных механических нагрузок, интенсивного изнашивания и высоких температур.

Abstract. Aluminum matrix nanocomposites reinforced with titanium carbide (TiC) or tungsten carbide (WC) exhibit high strength, excellent wear resistance, and superior thermal stability. These materials are widely used in the automotive, transportation, and defense industries for manufacturing critical components operating under extreme mechanical and thermal loads. Objectives: The aim of this study was to develop a technology for producing Al–TiC and Al–WC aluminum matrix nanocomposites by the electrical spark dispersion (ESD) method and to investigate their phase composition, crystal structure, morphology, elemental composition, and the formation characteristics of reinforcing carbide phases in order to evaluate their potential as high-strength, wear-resistant structural materials. Aluminum matrix nanocomposite powders were synthesized by electrical spark dispersion. The resulting powders exhibited average particle sizes ranging from 5 to 100 nm, depending on the carbide system and processing conditions. Phase analysis performed by X-ray diffraction (XRD) confirmed the presence of α -Al together with the corresponding carbide phases (TiC and WC), without significant formation of undesirable secondary phases. A small amount of aluminum oxide was detected, which was attributed to surface oxidation during processing. Crystallite sizes calculated using the Scherrer equation ranged from 15 to 60 nm. Slight distortions of the crystal lattice were observed and were associated with interfacial stresses between the aluminum matrix and the reinforcing carbide particles. Among the investigated materials, the Al–TiC nanocomposite exhibited the most homogeneous microstructure, whereas the Al–WC system demonstrated higher density and greater carbide-phase stability due to the thermodynamic characteristics of the W–C system. The obtained results demonstrate that electrical spark dispersion is a rapid, energy-efficient, and scalable technique for producing carbide-reinforced aluminum matrix nanocomposites with controlled phase composition and nanostructure. The synthesized materials show considerable potential for the development of advanced structural materials intended for operation under severe mechanical loading, intensive wear, and elevated temperatures.

Ключевые слова: алюмоматричные нанокомпозиты, электроискровое диспергирование, карбид титана (TiC), карбид вольфрама (WC), рентгеновская дифракция, наноструктура, фазовый состав, износостойкость.

Keywords: aluminum matrix nanocomposites, electrical spark dispersion, titanium carbide (TiC), tungsten carbide (WC), X-ray diffraction (XRD), nanostructure, phase composition, wear resistance.

Алюминиевые материалы широко применяются в аэрокосмической промышленности, транспортном машиностроении и общем машиностроении благодаря их низкой плотности (2,7 г/см³), высокой удельной прочности, коррозионной стойкости, а также хорошей электро- и теплопроводности [1].

Однако сравнительно низкая твердость, недостаточная износостойкость и ограниченная термическая стабильность чистого алюминия существенно ограничивают область его применения в условиях интенсивных механических и трибологических нагрузок. Одним из наиболее эффективных способов повышения эксплуатационных характеристик алюминия является создание алюмоматричных нанокомпозитов, армированных высокотвердыми керамическими фазами [2].

Карбиды переходных металлов, такие как карбид титана (TiC) и карбид вольфрама (WC) являются перспективными армирующими компонентами благодаря их исключительно высокой твердости (20–30 ГПа), высоким температурам плавления (свыше 2800 °С), термодинамической стабильности и химической совместимости с металлическими матрицами. С термодинамической точки зрения данные карбиды характеризуются значительными отрицательными значениями стандартной энергии Гиббса образования (ΔG°), что свидетельствует об их высокой фазовой устойчивости в широком диапазоне температур. Так, стандартная энергия Гиббса образования карбида титана остается существенно отрицательной даже при высоких температурах, обеспечивая его структурную стабильность в алюминиевых системах. Аналогичная высокая термодинамическая устойчивость характерна для карбидов вольфрама и молибдена, однако их фазовые равновесия и особенности межфазного взаимодействия с алюминием различаются вследствие различий в размерах атомов, электронной структуре и стехиометрии карбидов.

На наноуровне карбидные частицы обеспечивают реализацию нескольких механизмов упрочнения алюминиевой матрицы, включая упрочнение за счет измельчения зерен (эффект Холла-Петча), передачу нагрузки от пластичной алюминиевой матрицы к жестким керамическим частицам, а также упрочнение, обусловленное различием коэффициентов термического расширения между матрицей и армирующими фазами.

Эффективность перечисленных механизмов в значительной степени определяется размером армирующих частиц, прочностью межфазного сцепления, равномерностью их распределения и фазовой чистотой материала. В связи с этим выбор и контроль технологии синтеза играют решающую роль в получении однородных наноструктурированных композитов. Алюмоматричные композиты относятся к числу перспективных конструкционных материалов благодаря сочетанию высокой удельной прочности, малой плотности и хороших эксплуатационных характеристик. При оптимизации химического состава и равномерном распределении армирующей фазы такие материалы способны одновременно обеспечивать высокую теплопроводность, электрическую проводимость и повышенную износостойкость [3].

Традиционные методы получения алюмоматричных композитов, армированных карбидами, включают порошковую металлургию, механическое легирование, литье с протеканием реакций *in situ* и самораспространяющийся высокотемпературный синтез [4, 5].

Однако указанные технологии нередко сопровождаются длительной продолжительностью процесса, риском загрязнения материала продуктами износа мелющих тел, недостаточным качеством межфазного взаимодействия, а также агломерацией наночастиц. Кроме того, процессы, протекающие в условиях, близких к термодинамическому равновесию, ограничивают возможность формирования метастабильных фаз и высокодисперсных наноструктур. Метод электроискрового диспергирования представляет собой неравновесную плазменную технологию, позволяющую получать ультрадисперсные и наноструктурированные композиционные порошки. Процесс основан на возникновении импульсных электрических разрядов между электропроводящими электродами, погруженными в диэлектрическую жидкость. Во время каждого разряда формируется локальный плазменный канал с температурой порядка 10^3 – 10^4 К и чрезвычайно высокой плотностью энергии, что приводит к мгновенному плавлению и частичному испарению материала электродов. Последующее сверхбыстрое охлаждение (со скоростями до 10^6 – 10^8 К/с) обеспечивает формирование сферических микро- и наночастиц с мелкокристаллической структурой, а в ряде случаев с образованием метастабильных фаз.

Материалы и методы исследования

Методом электроискрового диспергирования получены порошки алюмоматричных нанокompозитов со средним размером частиц 5–100 нм, определяемым типом карбидной системы и условиями обработки. По данным рентгеновской дифракции (XRD), синтезированные материалы содержат α -Al и соответствующие карбидные фазы (TiC и WC), при этом образование нежелательных вторичных фаз практически отсутствует. Наличие незначительного количества Al_2O_3 объясняется поверхностным окислением частиц в процессе синтеза.

Результаты и обсуждение

Результаты рентгенодифракционного анализа (XRD) подтвердили многофазную структуру всех синтезированных нанокompозитов. Доминирующей фазой во всех исследованных системах являлся алюминий с гранцентрированной кубической кристаллической решеткой (α -Al), что свидетельствует о сохранении структурной стабильности алюминиевой матрицы в процессе электроискрового диспергирования. На дифрактограммах отчетливо идентифицированы характерные рефлексы, соответствующие карбидам титана (TiC) и вольфрама (WC) в соответствующих композиционных системах.

В пределах чувствительности метода рентгеновской дифракции не выявлено образования значительных количеств нежелательных интерметаллидных соединений систем Al–Ti, Al–W. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в условиях неравновесной плазменной обработки, реализуемой при электроискровом диспергировании, основные карбидные фазы сохраняют высокую термодинамическую стабильность и практически не вступают в химическое взаимодействие с алюминиевой матрицей.

На дифрактограммах также обнаружены незначительные количества оксида алюминия (Al_2O_3), образование которого обусловлено поверхностным окислением частиц в процессе их сверхбыстрой кристаллизации в диэлектрической среде. При этом содержание оксидной фазы оставалось незначительным и не оказывало существенного влияния на общий фазовый состав синтезированных материалов. Наблюдаемое уширение дифракционных максимумов свидетельствует о формировании кристаллитов наноразмерного диапазона. Расчеты по уравнению Шеррера показали, что средний размер кристаллитов составляет приблизительно от 15 до 60 нм в зависимости от типа карбидной системы. Наименьший средний размер кристаллитов был получен для нанокompозита Al–TiC, что указывает на более эффективное измельчение структуры по сравнению с композициями Al–WC.

Дифракционные картины электронной дифракции выбранной области (SAED), полученные для всех трех нанокompозитов, подтвердили наличие рефлексов, соответствующих алюминиевой матрице α -Al и соответствующим карбидным фазам, при отсутствии признаков образования вторичных интерметаллидных соединений. Анализ методом высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии (HRTEM) показал, что метод электроискрового диспергирования обеспечивает получение нанокompозиционных порошков с хорошо сформированными карбидными наночастицами, наноразмерной кристаллической структурой и прочными межфазными границами между матрицей и армирующей фазой. Эти особенности являются ключевыми факторами, обеспечивающими повышение механических и теплофизических характеристик полученных материалов.

Элементный состав и распределение элементов. Результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS) подтвердили присутствие алюминия, а также титана, вольфрама и углерода в соответствующих композиционных системах. Картирование распределения химических элементов показало относительно равномерное распределение

армирующих компонентов в объеме алюминиевой матрицы. Полученные атомные соотношения соответствовали исходному составу композиционных электродов, что свидетельствует о сохранении общего стехиометрического состава в процессе электроискрового диспергирования. Были зарегистрированы слабые сигналы кислорода, обусловленные поверхностным окислением частиц, однако их интенсивность оставалась незначительной. Признаков существенной сегрегации химических элементов или фазового расслоения обнаружено не было, что подтверждает эффективное перемешивание компонентов в условиях плазменно-эрозионной обработки.

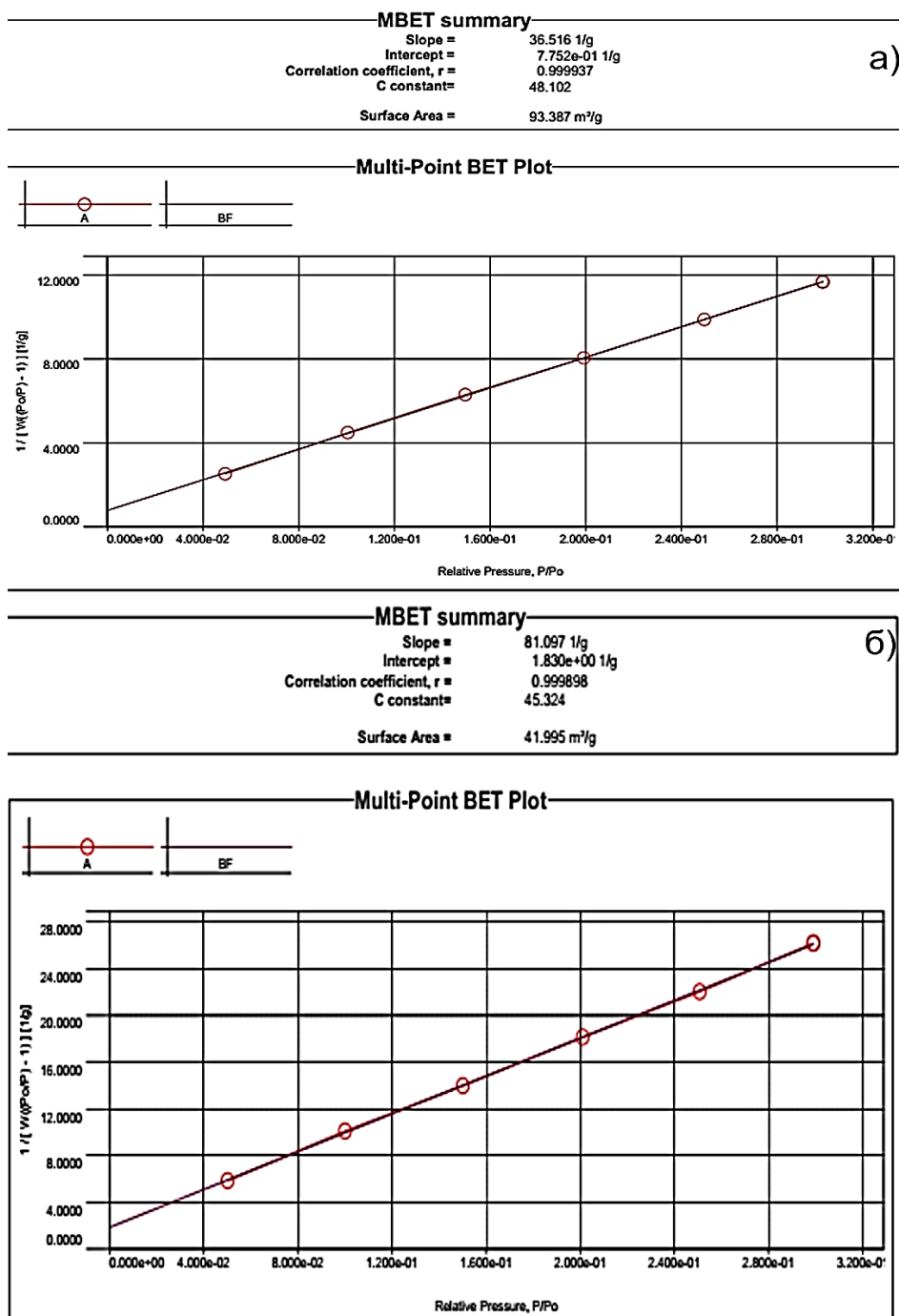


Рисунок. Результаты BET-анализа (Brunauer–Emmett–Teller), используемого для определения удельной поверхности нанокompозитов а) Al–TiC и б) Al–WC по изотерме адсорбции азота

С термодинамической точки зрения карбид титана (TiC) продемонстрировал наиболее благоприятную межфазную совместимость с алюминиевой матрицей, что, вероятно, обусловило более высокую структурную однородность нанокompозита Al–TiC. Карбиды вольфрама (WC) несмотря на их высокую термодинамическую стабильность, характеризуются большей плотностью и иными значениями межфазной энергии, что оказывает влияние на кинетику роста частиц и равномерность их распределения. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности метода электроискрового диспергирования для синтеза многофазных алюмоматричных нанокompозитов наноразмерного диапазона с контролируемым фазовым составом и мелкодисперсной микроструктурой. Сравнительный анализ показал, что тип карбидной армирующей фазы оказывает существенное влияние на размер кристаллитов, однородность распределения частиц и, как следствие, на потенциальные механические свойства полученных композиционных материалов.

Структурные особенности. Совокупность полученных данных на Рисунке свидетельствует о том, что образец 2 обладает выраженной иерархической пористой структурой. Ультрамикropоры (менее 2 нм) формируют высокоэнергетические центры адсорбции, определяющие селективность материала при низких давлениях. Мезопоры (2–50 нм), доминирующие по объему пор с модальными значениями 1,5–1,7 нм, обеспечивают основную адсорбционную емкость материала и протекание процессов капиллярной конденсации. Макropоры (более 50 нм) проявляющиеся резким увеличением адсорбции при высоких значениях относительного давления, способствуют улучшению массопереноса и облегчают процессы регенерации материала.

Выводы

Результаты рентгенодифракционного анализа подтвердили структурную стабильность карбидных фаз TiC и WC в алюминиевой матрице и отсутствие образования значительных количеств нежелательных интерметаллидных соединений. Расчеты размеров кристаллитов показали, что они находятся в наноразмерном диапазоне (15–60 нм). Исследования методами сканирующей электронной микроскопии (SEM) и просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ) выявили преимущественно сферическую форму частиц, сформировавшихся в результате процессов сверхбыстрого плавления и последующей кристаллизации.

Сравнительный анализ показал, что нанокompозит Al–TiC характеризуется наиболее однородным распределением армирующей фазы и наиболее развитой мелкозернистой микроструктурой, тогда как композиты Al–WC обладают более плотной структурой, обусловленной физико-химическими свойствами соответствующих карбидов. Использование наноразмерных карбидных частиц способствует реализации эффективных механизмов упрочнения материала.

Список литературы:

1. Гарбузова А. К., Галевский Г. В., Руднева В. В., Ширяева Л. С. Анализ современного состояния производства и применения карбида титана // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2014. №1 (7). С. 34–39.
2. Kandrotaitė Janutienė R., Mažeika D., Dlouhý J., Syzonenko O., Torpakov A., Lipian E., Baltušnikas A. Investigation of the microstructure of sintered Ti–Al–C composite powder materials under high-voltage electrical discharge // Materials. 2023. V. 16. №17. P. 5894. <https://doi.org/10.3390/ma16175894>
3. Никитин Д. С., Насырбаев А., Циммерман А. И., Шаненков И. И., Сайгаш А. С., Сивков А. А. Формирование композитов с алюминиевой матрицей, армированных наночастицами

карбида вольфрама // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. №3. С. 124-136.

4. Ervina Efzan M. N., Siti Syazwani N., Al Bakri A. M. M. Fabrication method of aluminum matrix composite (AMCs): a review // Key Engineering Materials. 2016. V. 700. P. 102-110. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.700.102>

5. Масанский О. А., Токмин А. М., Анисимов А. Г., Масанский С. О. Получение алюмоматричных композитных материалов по технологии электроимпульсного спекания // Известия Алтайского государственного университета. 2024. №1 (135). С. 37-42. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2024\)1-04](https://doi.org/10.14258/izvasu(2024)1-04)

References:

1. Garbuzova, A. K., Galevskij, G. V., Rudneva, V. V., & Shiryayeva, L. S. (2014). Analiz sovremennogo sostoyaniya proizvodstva i primeneniya karbida titana. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*, (1 (7)), 34-39. (in Russian).

2. Kandrotaitė Janutienė, R., Mažeika, D., Dlouhý, J., Syzonenko, O., Torpakov, A., Lipian, E., & Baltušnikas, A. (2023). Investigation of the microstructure of sintered Ti–Al–C composite powder materials under high-voltage electrical discharge. *Materials*, 16(17), 5894. <https://doi.org/10.3390/ma16175894>

3. Nikitin, D. S., Nasyrbaev, A., Cimmerman, A. I., Shanenkov, I. I., Sajgash, A. S., & Sivkov, A. A. (2024). Formirovanie kompozitov s alyuminievoj matricej, armirovannyh nanochasticami karbida vol'frama. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 335(3), 124-136. (in Russian).

4. Ervina Efzan, M. N., Siti Syazwani, N., & Al Bakri, A. M. (2016). Fabrication method of aluminum matrix composite (AMCs): a review. *Key Engineering Materials*, 700, 102-110. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.700.102>

5. Masanskij, O. A., Tokmin, A. M., Anisimov, A. G., & Masanskij, S. O. (2024). Poluchenie alyumomatrichnyh kompozitnyh materialov po tehnologii ehlektroimpul'snogo spekaniya. *Izvestiya Altajskogo gosudarstvennogo universiteta*, (1 (135)), 37-42. (in Russian). [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2024\)1-04](https://doi.org/10.14258/izvasu(2024)1-04)

Поступила в редакцию
09.07.2026 г.

Принята к публикации
16.07.2026 г.

Ссылка для цитирования:

Жумагулова Б. Т., Мурзаibraimov Б. М. Синтез нанокompозитов Al–TiC и Al–WC методом электроискрового диспергирования и исследование их свойств // Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12. №9. С. 251-257. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/130/28>

Cite as (APA):

Zhumagulova, B., & Murzaibraimov, B. (2026). Synthesis of Al–TiC and Al–WC Nanocomposites by Electrical Spark Dispersion and Investigation of their Properties. *Bulletin of Science and Practice*, 12(9), 251-257. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/130/28>