

Синтез мультикомпонентных наночастиц методом искрового разряда в электролитной среде

© А.А. Зарипов, С.Г. Гуломжанова, М.М. Адылов

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова АН Республики Узбекистан,
100125 Ташкент, Узбекистан
e-mail: zaripov@iplt.uz

Поступило в Редакцию 24 ноября 2025 г.

В окончательной редакции 6 февраля 2026 г.

Принято к публикации 6 февраля 2026 г.

Представлен метод синтеза многокомпонентных наночастиц на основе среднеэнтропийного сплава Ti–Al–V–Cr–Fe–Zr–Nb–Mo–Ni с использованием импульсного искрового разряда в жидкой среде. Синтез проведен на оригинальной высокочастотной установке (до 30 kHz), собранной на базе IGBT-транзисторов в 1% водном растворе NaCl. Методами СТЭМ и РФА установлено, что полученные наночастицы имеют структуру „ядро–оболочка“ со средним геометрическим размером 45 nm и размером кристаллитов 32.6 nm. Показано, что эффект сверхбыстрой закалки в электролите позволил сохранить в наноструктурах исходные пропорции девяти легирующих элементов, предотвращая их термодинамическую сегрегацию. Обнаруженное содержание примесей электролита (Na, Cl до 18.3 %) носит поверхностный адсорбционный характер. Результаты ИК-спектроскопии подтвердили наличие защитного оксидного слоя и адсорбированных атмосферных групп. В отличие от традиционных бинарных оксидов синтезированная среднеэнтропийная система обладает высокой фазовой сложностью и уникальным сочетанием свойств переходных металлов, что делает ее перспективной для применения в гетерогенном катализе и материаловедении.

Ключевые слова: среднеэнтропийные сплавы, наночастицы, искровой разряд в электролитах, электроэрозионный синтез, структура ядро–оболочка.

DOI: 10.61011/JTF.2026.07.63133.319-25

Введение

Получение наночастиц от простых элементов до сложных сплавов и оксидов осуществляется различными способами. Существуют физические, химические и механические методы, с помощью которых осуществляется синтез наночастиц в промышленном масштабе [1,2]. У них есть общие недостатки, связанные с агломерированием [3]. Поэтому ведутся научные работы с целью дальнейшего масштабирования синтеза наночастиц [4]. Например, механический синтез осуществляется различными методами, включая механическое измельчение в мельницах (размер частиц 5–20 nm), диспергирование расплавов потоком жидкости или газа, а также центробежный метод, в частности, спиннингование, позволяющее получать аморфные сплавы с нанокристаллическими включениями [5,6]. Физико-химические методы, такие как вакуумное осаждение, лазерная абляция и золь-гель метод, используются для получения нанопорошков различных веществ [7–9]. Вышеперечисленными методами также получают смеси и сложные оксиды — так называемые тройные оксиды [10–12]. Однако среди физико-химических методов синтез наночастиц искровым разрядом обладает рядом преимуществ, несмотря на такие недостатки, как агрегация (присущая большинству методов) и необходимость оптимизации параметров под каждый материал [13]. Одним из преимуществ синтеза наночастиц искровыми разрядами является его универ-

сальность, которая позволяет обрабатывать образцы из различных материалов, включая металлы, сплавы, керамику и композиты [14]. С помощью этого метода, варьируя параметры искрового разряда (мощность, частота, длительность импульсов и т.д.), можно регулировать размер получаемых наночастиц [15].

Если высокая чистота синтеза искровым разрядом в инертной среде позволяет получить более чистые, чем в других методах, наночастицы, то использование жидких сред (электролитов) позволяет управлять химическим составом и фазовым состоянием наночастиц (в частности, получать оксидные фазы), сохраняя при этом чистоту от посторонних примесей, характерную для электроэрозионных методов [16]. Кроме того, оборудование для синтеза искровым разрядом относительно несложное, а сам процесс синтеза не требует больших затрат энергии и реагентов [17]. Особенно важным является способность при синтезе искровым разрядом получать наночастицы различной формы, включая сферические, стержневидные, пластинчатые и другие [18,19]. Однако традиционные методы синтеза многокомпонентных наночастиц сопряжены со значительными технологическими сложностями, связанными с необходимостью контроля стехиометрии, формы наночастиц и предотвращения разделения фаз [20]. В то же время получение таких объектов является критически важной задачей, так как они отличаются высокими физико-химическими пока-

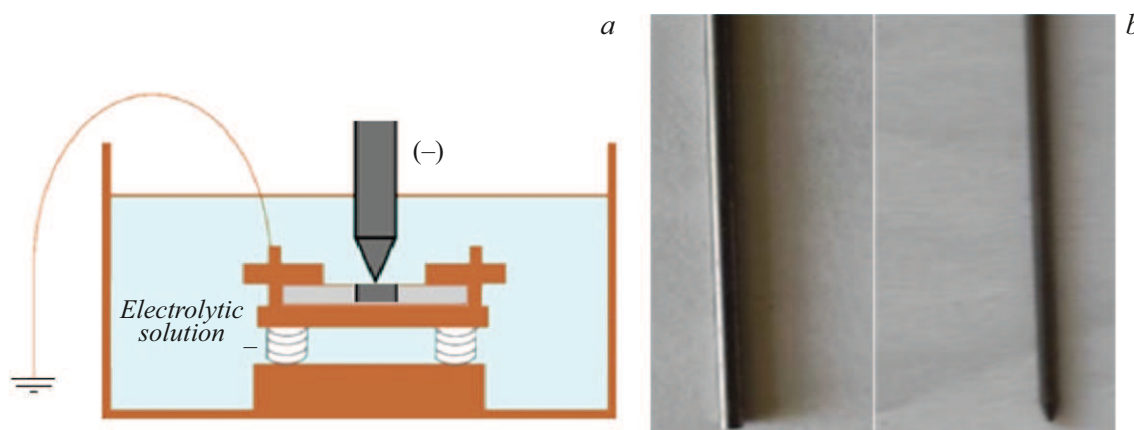


Рис. 1. *a* — схематическое изображение диспергирования наночастиц; *b* — фото анода и катода из многокомпонентного сплава.

зателями и уникальной функциональной активностью, превосходящей характеристики бинарных систем [21].

Актуальность исследования определяется потребностью в разработке методов синтеза наночастиц сложных многокомпонентных (четыре и более компонента) композитов и сплавов. Получение таких систем традиционными химическими методами является крайне сложной задачей из-за трудности сохранения гомогенности состава. Однако именно многокомпонентные наночастицы отличаются наиболее высокими физико-химическими показателями. Настоящая работа направлена на исследование возможностей искровых разрядов в контексте диспергирования среднеэнтропийных наночастиц системы Ti–Al–V–Cr–Fe–Zr–Nb–Mo–Ni, где высокая скорость закалки в электролите позволяет стабилизировать уникальные метастабильные фазы.

1. Методика эксперимента

На рис. 1, *a* представлено схематическое изображение экспериментальной установки для получения наночастиц металлов и их сплавов методом искрового разряда. Конструкция включает конический катод и цилиндрический анод диаметром 2 mm (рис. 1, *b*), выполненные из исследуемого материала и расположенные вертикально друг напротив друга. Техническая реализация установки базируется на оригинальном импульсном источнике питания, собранном на базе высокоскоростных силовых IGBT-ключей IRG4PH50UD и диодов 150EBU04. Схема управления позволяет гибко варьировать параметры синтеза: рабочее напряжение до 450 V, силу тока до 10 A и частоту следования импульсов до 30 kHz. Для инициирования стабильного искрового разряда и эффективного диспергирования среднеэнтропийного сплава анод полностью погружался в электролит, в то время как глубина погружения конического катода варьировалась в диапазоне от 1 до 8 mm. В процессе работы была обеспечена непрерывная циркуляция рабочей жидкости, что способствовало термостатированию зоны реакции и

своевременному выносу продуктов эрозии из межэлектродного зазора, предотвращая их повторный переплав или коагуляцию.

Во время экспериментов на установку подавалось постоянное напряжение до 250 V, при этом система управления обеспечивала формирование импульсов с частотой до 30 kHz. В процессе работы поддерживалась сила тока до 1 A, что позволяло сохранять стабильный искровой режим разряда.

Для приготовления рабочей жидкости — 1%-го электролита — использовалась соль NaCl марки ХЧ (ГОСТ 4233-77) и дистиллированная вода. Все взвешивания проводились на аналитических весах с погрешностью ± 0.001 g. Концентрация электролита была оптимизирована экспериментально, при содержании соли менее 1 % наблюдалась нестабильность инициации искрового разряда, тогда как превышение этого порога приводило к усилению паразитных электрохимических процессов. Использование импульсного высокочастотного режима позволило локализовать воздействие в зоне искрового канала, минимизируя вклад электролиза в формирование конечных продуктов.

Для изучения размеров полученных наночастиц мультикомпонентного композита применялся сканирующий трансмиссионный электронный микроскоп (СТЭМ) Thermo Scientific Talos F200i, оснащенный системой энергодисперсионного рентгеновского анализа (ЭДС). Фазовый состав и параметры кристаллической решетки были исследованы методом рентгеновской дифракции (РД) на дифрактометре Rigaku RD-6100. Идентификация функциональных групп, присутствующих в образцах, была проведена с использованием инфракрасной спектроскопии с фурье-преобразованием (ИКФС) на спектрометре Cary 640 Series FT-IR.

Мультикомпонентный сплав электродов содержит (в атомарных процентах): Ti (59.38 %), Fe (14.68 %), V (11.39 %), Si (5.54 %), Eu (5.28 %), Zr (2.56 %), Cr (2.07 %), Nd (2.03 %), Sm (1.04 %).

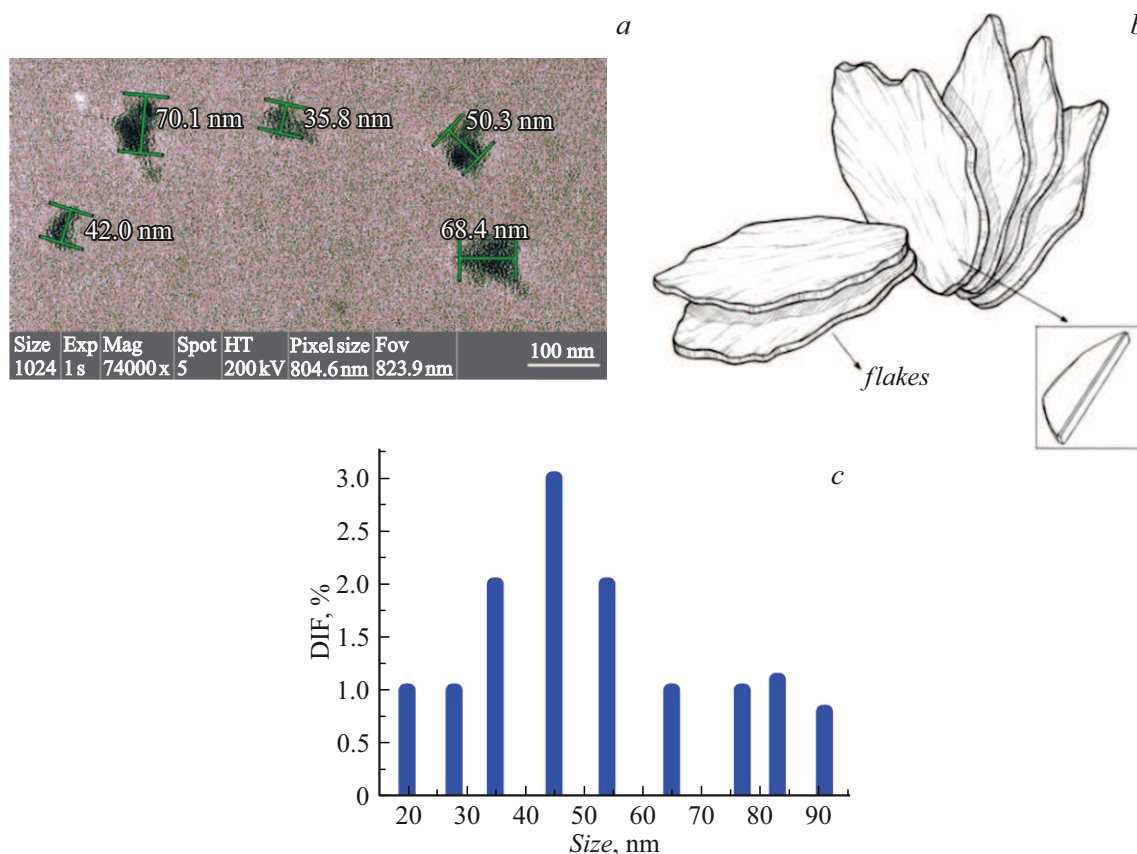


Рис. 2. *a* — изображение образца, полученное методом СТЭМ; *b* — схематическое изображение чешуйчатой морфологии наночастиц; *c* — гистограмма распределения наночастиц по размерам.

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлено изображение с высоким увеличением, полученное СТЭМ. Снимок демонстрирует агрегаты наночастиц чешуйчатой формы на более светлом фоне. На этих объектах-частицах видны отдельные детали, что указывает на высокое разрешение изображения. В правом верхнем углу находится шкала масштаба, равная 100 nm.

Из-за высокой дисперсности и особенностей наложения объектов на рис. 2, *a* их детальная визуализация затруднена, в связи с чем на рис. 2, *b* представлен схематический эскиз типичной частицы. Такая чешуйчатая форма характеризуется малым отношением толщины к латеральному размеру (аспектное отношение), что может быть обусловлено спецификой кристаллизации материала в условиях искрового разряда. Такая форма наночастиц, полученная методом искрового измельчения, вероятно, обусловлена анизотропным разрушением вдоль плоскостей с минимальной энергией связи. Сама чешуйчатая форма является визуальным проявлением анизотропных размеров кристаллитов, характеризующихся существенно большими латеральными размерами по сравнению с толщиной. Значит, полученная чешуйчатая морфология наночастиц при искровом измельче-

нии — следствие анизотропии, вызванной преимущественным разрушением решетки вдоль кристаллографических плоскостей с пониженной энергией связи.

Статистический анализ (рис. 2, *c*) размеров частиц проводился по микрофотографиям, полученным методом СТЭМ. Высокое разрешение метода позволило точно определить границы наночастиц и рассчитать их средний диаметр, который составил 45–50 nm.

Для выяснения состава полученного образца были получены спектры рентгенофлуоресцентного анализа (РФА), которые приведены на рис. 3.

График зависимости интенсивности излучения от энергии (рис. 3) состоит из нескольких областей, разделенных вертикальными линиями, каждая из которых соответствует определенной области, соответствующие определенным элементам. В верхней части изображения присутствуют метки (масштабы) „x6000“, „x900“, „x300“, „x200“, которые указывают на кратное увеличение съемки. Значения относительной интенсивности (по оси „Y“) варьируются от 0 до 1. График содержит различные спектральные линии, соответствующие определенным элементам. Названия „La“, „Ma“ и „Ka“ обозначают серии характеристических рентгеновских линий. Анализируя положение и интенсивность линий, можно определить элементный состав образца, напри-

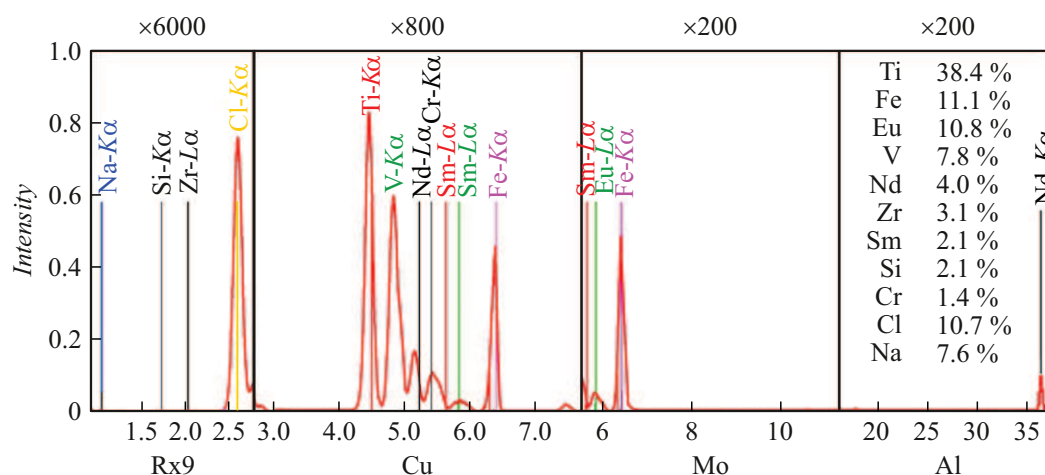


Рис. 3. Спектры РФА анализа образца.

мер, области, отмеченные как $Zr-L\alpha$ — это линии, соответствующие характеристическому излучению Zr.

В условиях искрового разряда, где напряжение — 0–450 В, ток — до 20 А, частота импульсов — до 20 кГц создают неравновесную низкотемпературную плазму, испаряющую материал электродов, которые зафиксированы методом РФА (рис. 3). Точнее в межэлектродном промежутке происходит формирование канала неравновесной низкотемпературной плазмы. Высокая плотность энергии в канале разряда приводит к мгновенному плавлению и испарению микрообъемов среднеэнтропийного сплава, что в сочетании с последующей закалкой в жидкой фазе обеспечивает переход материала в наноразмерное состояние. А выбор именно 1% раствора NaCl в качестве рабочей среды обусловлен необходимостью поддержания стабильной электропроводности для инициирования искрового разряда в диапазоне рабочих напряжений до 250 В (при техническом пределе установки 450 В). Использование водного электролита вместо спиртовых сред позволило избежать загрязнения продуктов синтеза продуктами пиролиза углеводородов. Также рабочая жидкость участвует в охлаждении и конденсации испаренного материала и способствует формированию оксидной фазы на поверхности наноструктур за счет присутствия кислорода (например, $Ti+O \rightarrow TiO_2$).

На правой стороне рис. 3 в таблице приведен список возможных элементов в составе образца. Она демонстрирует элементный состав образца и массовую долю каждого элемента в массовых процентах. Например, Ti (38.4%), Fe (11.1%), Eu (10.8%), V (7.8%) и т.д. Высокое содержание элементов Na и Cl обусловлено их поступлением из электролита (1% NaCl) в процессе синтеза. Остальные элементы (Nd, Zr, Sm, Si, Cr) присутствуют в меньших количествах, с массовой долей менее 4%. Таким образом, РФА показывает, что образец, синтезированный искровым разрядом в 1% водном растворе электролита NaCl, содержит значительные массовые доли элементов Ti, Fe, Eu, V, Nd, Zr, Sm, Si, Cr, Na и

Cl. В процессе искрового разряда происходит локальный разогрев и эрозия материала электродов. Формирующиеся наночастицы наследуют элементный состав исходного среднеэнтропийного сплава благодаря эффекту быстрой закалки, препятствующей диффузионному разделению компонентов. Контакт ювенильных поверхностей с 1% раствором NaCl инициирует формирование оксидной оболочки и адсорбцию ионов из раствора, что объясняет наличие натрия и хлора в данных РФА при сохранении базовых пропорций легирующих элементов в объеме частиц.

После определения морфологии и состава образца, важно выявить степень кристалличности, что немаловажно для определения структуры полученных образцов. На рис. 4 представлена дифрактограмма, полученная методом рентгеновской дифракции (РД).

Изображение представляет собой набор пиков, соответствующих дифракционным максимумам. Дифракционные пики обусловлены конструктивной интерференцией рентгеновских лучей, рассеянных на атомах кристаллической решетки. Интенсивность пиков зависит от нескольких факторов, включая количество вещества, находящегося в данной кристаллической фазе. А структурный фактор зависит от расположения атомов в элементарной ячейке. Ширина пиков на рентгенограмме связана с размерами кристаллитов (областей когерентного рассеяния); уширение пиков может быть вызвано мелкими кристаллитами диаметрами менее 100 нм, а также наличием дефектов в кристаллической решетке, например, микронапряжений, дислокаций, неоднородности размеров кристаллитов.

В условиях искрового разряда низкая температура жидкости (по сравнению с высокотемпературной плазмой разряда, где температура достигает тысяч градусов) приводит к высокой скорости кристаллизации, что может увеличивать долю аморфной фазы. Рабочая среда остается в жидкой фазе, выступая как загрязнитель в составе наночастиц. Кислород в составе жидкости

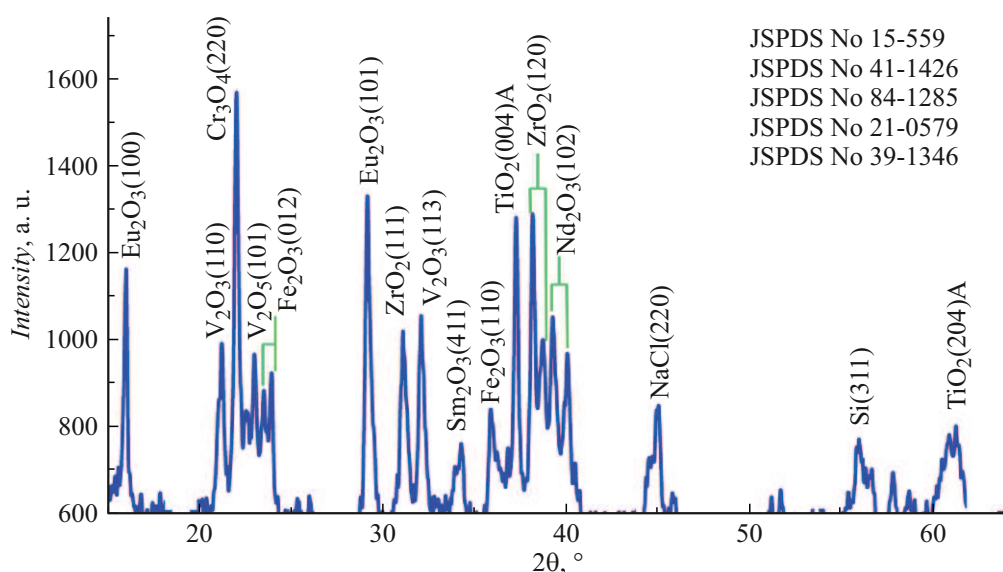


Рис. 4. Дифрактограмма образца.

Средние диаметры кристаллитов, рассчитанные по формуле Шеррера

№	<i>K</i>	λ , nm	2θ , °	FWHM, β	<i>d</i> , nm	Средний размер, nm
1	0.9	0.1541	22.131	0.2891	27.99	32.26
2	0.9	0.1541	37.33	0.3213	34.38	
3	0.9	0.1541	37.335	0.2438	34.42	

усиливает образование оксидов (например, TiO_2 , Fe_2O_3 , ZrO_2 , NiO , Cr_3O_4) за счет реакции испаренных металлов и H_2O . Это объясняет присутствие оксидов как основных фаз в наноструктурах. Азот (N_2) в плазме искрового разряда может частично ионизироваться, но образование нитридов (например, TiN , Fe_4N) маловероятно при комнатной температуре рабочей жидкости, если, конечно, пренебречь температурой в локальной зоне вблизи катода, где происходят нестационарные процессы. Нитриды требуют более высоких температур и инертной атмосферы для предотвращения окисления.

Если конкретизировать XRD-паттерн, то Ti встречается в основном в фазах TiO_2 (анатаз). Фаза анатаза появляется при углах дифракции 37.3° (003) и 61.3° (204) [22,23]. А железо в форме гематита (Fe_2O_3) появляется при углах дифракции 24° и 35.9° . Кроме обнаруженных в образце фазы TiO_2 (анатаз), Fe_2O_3 (гематит) и NaCl замечено присутствие оксидов Eu_2O_3 , V_2O_3 , Nd_2O_3 , ZrO_2 , Sm_2O_3 , Cr_3O_4 и Si . Они обнаружены под углами дифракции: 16.1, 21.25, 22.1, 23.05, 29.25, 31.15, 32.15, 34.35, 38.2, 39.2 и 56° . Эти углы соответствуют к следующим индексам Миллера: (100), (110), (220), (101), (101), (111), (113), (411), (120), (102) и (311). Эти фазы указывают на то, что материал имеет высокую степень кристалличности. По литературным данным диоксид титана (TiO_2), который встречается в

форме фаз анатаза в образце, усиливает его фотоэлектрические и каталитические свойства [24]. А гематит (Fe_2O_3) и диоксид циркония (ZrO_2) образуют структуры, устойчивые при высоких температурах [25]. А NaCl как загрязнитель, перешедший из рабочей жидкости, обнаружен под углом 45.1° (220) [26,27].

XRD-анализ показывает, что нанопорошок, синтезированный искровым разрядом в 1% растворе NaCl , содержит кристаллические фазы TiO_2 (анатаз), Fe_2O_3 (гематит), Eu_2O_3 , V_2O_3 , Nd_2O_3 , ZrO_2 , Sm_2O_3 , Cr_3O_4 с высокой долей кристаллической фазы, обусловленной быстрой кристаллизацией из-за быстрого охлаждения в жидкости.

С помощью формулы Шеррера рассчитали средний размер кристаллита (см. таблицу), диаметр которого составил в среднем 32.26 nm.

Использованная длина волны рентгеновского излучения (λ) составила 0.1541 nm, что соответствует $\text{CuK}\alpha$ -излучению. Удвоенные углы дифракции (2θ) для выбранных дифракционных пиков составили 22.131° , 37.33° и 37.335° , указывая на различные кристаллические плоскости. Анализ полной ширины пика на половине максимума (FWHM, β) в градусах показал различное уширение пиков, где пик №2 имел наибольшее уширение, а пик №3 — наименьшее. Средний размер кристаллитов, рассчитанный по всем трем пикам, составил 32.26 nm,

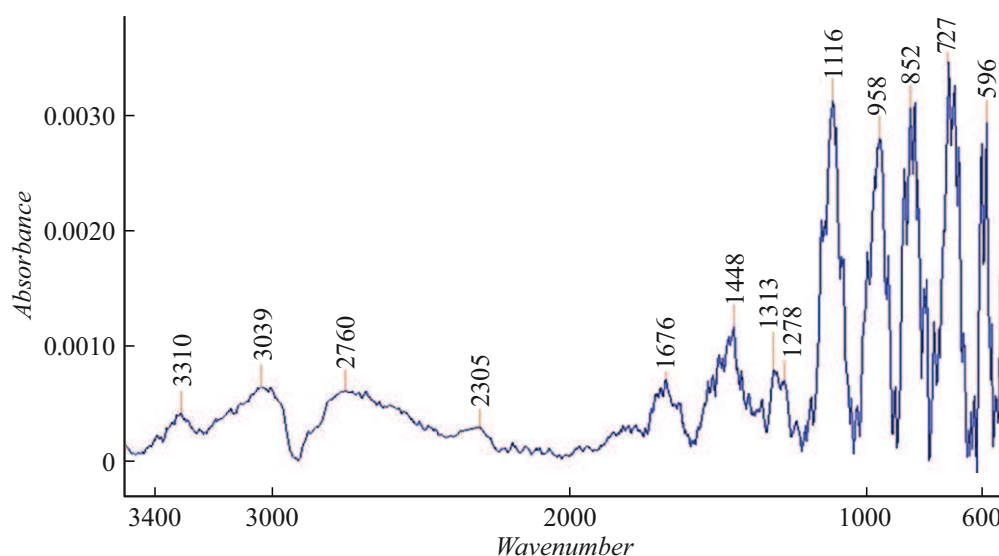


Рис. 5. ИКФС образца.

что указывает на нанокристаллическую структуру полученного материала и типично для искрового разряда, особенно в жидкой среде, где быстрое охлаждение испаренного материала препятствует росту кристаллитов и, в конечном итоге, способствует образованию нанокристаллических структур с малыми размерами кристаллитов 27.99–34.42 nm, как указано в таблице. Сравнительный анализ показал, что средний размер областей когерентного рассеяния (ОКР), рассчитанный по методу Шеррера (32.6 nm), меньше среднего диаметра частиц по данным электронной микроскопии (45 nm). Такое различие характерно для многокомпонентных систем, получаемых методом искрового разряда. Оно свидетельствует о том, что большинство наночастиц являются либо поликристаллическими, либо образуют прочные агрегаты непосредственно в процессе конденсации в электролите. Поскольку ультразвуковое редиспергирование и фракционирование не проводились, полученные результаты отражают реальный гранулометрический состав продукта в 1 % растворе NaCl.

Для выяснения функциональных групп и типы связей в молекулах образца использовали ИКФС. На рис. 5 представлен спектр отражения инфракрасного излучения ИКФС образца. Спектр зарегистрирован в диапазоне волновых чисел от 3400 до 600 cm^{-1} .

В графике связи энергии колебания молекул и поглощения инфракрасного излучения наблюдаются характеристические пики поглощения, соответствующие определенным функциональным группам в молекуле. В области 3400–3000 cm^{-1} наблюдаются пики, соответствующие валентным колебаниям связей N–H и O–H. Наличие пика 3310 cm^{-1} может указывать на присутствие таких групп. Область 3000–2800 cm^{-1} характеризуется наличием пиков, соответствующих валентным колебаниям C–H-связей в алканах и других органических соедине-

ниях, пики 3039 и 2760 cm^{-1} относятся к этой области. В области 1800–1600 cm^{-1} часто наблюдаются пики, соответствующие колебаниям карбонильной группы C=O, пик 1676 cm^{-1} на рисунке указывает на наличие такой группы. Область „отпечатков пальцев“ (1500–600 cm^{-1}) содержит сложную картину пиков, характеризующих колебания различных связей и групп в молекуле, которым относятся пики 1448, 1313, 1278, 1116, 958, 852, 727 и 596 cm^{-1} . Если конкретизировать, то наличие широкого пика, представляющего собой связь в группе OH, указывает на присутствие адсорбированной воды в нанопорошке. Пик при 3310 cm^{-1} соответствует валентной вибрации группы OH [28]. Пики 3039, 2260, 2305, 1676, 1313, 1278 cm^{-1} представляют собой валентные колебания =C–H, –C–H и C=O, C–O соответственно, которые принадлежат к ароматическим кольцам, органическим соединениям и соединениям амидов углерода [29–32]. Пик, сформированный при 1448 cm^{-1} , соответствует дифракционной вибрации –CH₂– [33]. При этом колебания, составляющие основу структуры нанопорошка, наблюдаются в диапазоне 1000 и 600 cm^{-1} . Пики при 1116 и 958 cm^{-1} указывают на наличие фундаментальной вибрации со связью Si–O–Si, которая представляет собой кварц (SiO₂) [34]. Деформационные колебания Me–O при 852, 727 и 596 cm^{-1} указывают на присутствие металлических оксидов [35,36]. Таким образом, анализ инфракрасного спектра нанопорошка подтвердил наличие оксидов TiO₂, Fe₂O₃, Eu₂O₃, V₂O₃, Nd₂O₃, ZrO₂, Sm₂O₃ и Cr₃O₄ на основе пиков поглощения, соответствующих валентным и деформационным колебаниям функциональных групп.

Наличие функциональных групп углерода и следов азота, зафиксированных методами ИК-спектроскопии (рис. 5), носит адсорбционный характер и обусловлено контактом рабочей среды с атмосферой. Кремний в со-

ставе образцов идентифицирован как фоновая примесь, связанная с частичным выщелачиванием лабораторного стекла реактора в процессе искрового воздействия.

3. Применения наночастиц оксидов металлов

После обнаружения оксидов металлов в составе наночастиц образца, основываясь на литературных данных, выяснили область применения этого мультикомпонентного нанопорошка. К сожалению, научные работы, посвященные именно этому мультикомпонентному образцу, обнаружены не были. В связи с этим был проведен анализ областей применения каждого из составляющих образца металлических оксидов.

Как известно, кристаллизация обеспечивает материалу фотоэлектрические, фотокаталитические и магнитные свойства, что делает его пригодным для применения в катализе, сенсорах и фотоэлектрохимии. Анализ литературных данных показывает, что фазы TiO_2 , составляющие значительную часть полученного образца, обладают развитой удельной поверхностью и высокой фотокаталитической активностью. Это обуславливает их способность эффективно разлагать органические загрязнители [37]. Кроме того, присутствие примесных элементов (Fe, V, Cr) в составе высокоэнтропийной системы может способствовать сужению запрещенной зоны TiO_2 и расширению области поглощения в видимый диапазон спектра, что потенциально повышает общую эффективность фотокатализа. Например, датчики на основе нанотрубок TiO_2 чувствительны к водороду, кислороду, влажности, глюкозе и перекиси водорода, показывая низкий предел обнаружения и высокую стабильность [38]. Кроме того, добавки в масло TiO_2 (0.01 % объема) повышают грузоподъемность подшипников на 40 % [39]. Также наночастицы (TiO_2 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) обеспечивают точную доставку лекарств и улучшают медицинскую визуализацию [40]. В стоматологии TiO_2 проявляют антибактериальные свойства [41]. Ткани с покрытиями TiO_2 блокируют УФ-излучение [42]. Металлооксидные наноматериалы TiO_2 эффективны для рекультивации почвы, удаляя тяжелые металлы и органические загрязнители путем адсорбции, фотокатализа и окисления [43]. Наночастицы Fe_2O_3 , стабильные оксиды железа, применяются в диагностике, терапии и доставке лекарств [44]. Нанооксид Fe_2O_3 используется в недорогих качественных газовых датчиках [45]. Также TiO_2 , Fe_2O_3 широко применяются в фотокатализе, биосенсорах, биомедицине и сельском хозяйстве благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам [46]. Анализ литературных данных показывает, что наночастицы оксидов металлов TiO_2 , составляющие значительную часть образца, обладают уникальными физико-химическими свойствами. Это обеспечивает их широкое применение в таких областях, как фотокатализ, биомедицина, сенсоры,

рекультивация почвы, доставка лекарств, УФ-защита и аэрокосмическая промышленность.

Выводы

В работе успешно реализован метод электроэрозионного синтеза многокомпонентных наночастиц на основе среднеэнтропийного сплава $\text{Ti-Al-V-Cr-Fe-Zr-Nb-Mo-Ni}$ в среде 1 % водного раствора NaCl . Разработанная высокочастотная (до 30 kHz) установка на базе IGBT-транзисторов обеспечила стабильное горение искрового разряда при напряжении 250 V. Использование 1 % раствора NaCl позволило оптимизировать электропроводность среды, обеспечив воспроизводимость процесса и эффективный выход наноструктур. Полученные частицы имеют средний геометрический размер 45 nm (по данным СТЭМ) при размере области когерентного рассеяния 32.6 nm (по Шерреру). Разница в значениях указывает на поликристаллическую структуру и формирование естественных агрегатов в солевой среде без применения дополнительного редиспергирования. Метод сверхбыстрой закалки в жидкости позволил сохранить в наночастицах базовые пропорции девяти легирующих элементов исходного сплава, предотвращая их сегрегацию. Установлено формирование структуры „ядро-оболочка“, где металлическое ядро защищено оксидным слоем, возникшим из-за взаимодействия с кислородом воды. Присутствие Na и Cl (до 18.3 %) идентифицировано как поверхностная адсорбция электролита. Впервые получены наноструктуры столь сложного состава данным методом. В отличие от простых бинарных оксидов синтезированная среднеэнтропийная система обладает уникальной фазовой сложностью, что открывает новые возможности для создания высокоэффективных катализаторов и функциональных материалов. Таким образом, предложенный метод является перспективным и экономически эффективным способом получения уникальных многокомпонентных наноматериалов, свойства которых могут гибко настраиваться за счет варьирования состава электродов и параметров разряда.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Институту ионных плазменных и лазерных технологий Академии наук Узбекистана за финансовую поддержку, в рамках которой проводились исследования с использованием базового финансирования, выделенного институту.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Hachhach, S. Bayou, A. El Kasmi, M.Z. Saidi, H. Akram, M. Hanafi, T. Chafik. Eng, **6** (7), 149 (2025)
- [2] C. Fernandes, M. Jathar, B.K.S. Sawant, T. Warde. *Scale-up of nanoparticle manufacturing process. In Pharmaceutical process engineering and scale-up principles*. (Cham: Springer Nature, Switzerland, 2023), p. 173–203.
- [3] D. Vollath. Beilstein J. Nanotechnology, **11** (1), 854 (2020).
- [4] M. Singh, K.S. Pentapati. *Feasibilities and Difficulties of Scaling-up Sophisticated Nanomaterials for Green Energy*. In Resilience and Sustainability for Energy and Water (Apple Academic Press, 2024), p. 9–30.
- [5] L.C. Damonte, L.M. Zélis, B.M. Soucase, M.H. Fenollosa. Powder Technol., **148** (1), 15 (2004).
- [6] C.L. DeCastro, B.S. Mitchell. *Nanoparticles from mechanical attrition. Synthesis, functionalization, and surface treatment of nanoparticles* (2022), v. 5.
- [7] N. Al-Harbi, N.K. Abd-Elrahman. J. Umm Al-Qura Univ. Appl. Sci., **11**, 356 (2025).
- [8] N. Rajput. Intern. J. Adv. Eng. Technol., **7** (6), 1806 (2015).
- [9] X. Fang, L. Wu. (Eds.) *Handbook of innovative nanomaterials: From syntheses to applications* (Jenny Stanford Publishing, NY., 2012)
- [10] M. Mardanian, A.A. Nevar, M. Nedel'ko, N.V. Tarasenko. Europ. Phys. J. D, **67**, 1 (2013).
- [11] J. Elmroth Nordlander, M. Bermeo, P. Ternero, D. Wahlqvist, T. Schmeida, S. Blomberg, J.M. Hübner. Materials, **16** (3), 1113 (2023).
- [12] J. Feng, R. Geutjens, N.V. Thang, J. Li, X. Guo, A. Kéri, A. Schmidt-Ott. ACS Appl. Mater. Interfaces, **10** (7), 6073 (2018).
- [13] T.V. Pfeiffer, J. Feng, A. Schmidt-Ott. Adv. Powder Technol., **25** (1), 56 (2014).
- [14] N. Mohri, Y. Fukuzawa, T. Tani, N. Saito, K. Furutani. CIRP Annals, **45** (1), 201 (1996).
- [15] A. Voloshko, T.E. Itina. *Nanoparticle formation by laser ablation and by spark discharges—properties, mechanisms, and control possibilities*. In Nanoparticles Technology (IntechOpen, 2015), p. 1–12.
- [16] D.A. Mylnikov, M.N. Urazov, A.A. Efimov, A.A. Lizunova, V.V. Ivanov. AIP Conf. Proceed., **1858** (1), 040007 (2017).
- [17] M. Vazquez-Pufleau, I. Gomez-Palos, L. Arevalo, J. Garcia-Labanda, J.J. Vilatela. Adv. Powder Technol., **34** (3), 103955 (2023).
- [18] A.A. Efimov, P.V. Arsenov, V.I. Borisov, A.I. Buchnev, A.A. Lizunova, D.V. Korniyushin, V.V. Ivanov. Nanomaterials, **11** (1), 234 (2021).
- [19] A. Hamdan, J.L. Liu. Plasma Processes and Polymers, **18** (7), 2100013 (2021).
- [20] М.Р. Аль-Махмуд, М.К.Х. Шишир, С. Ахмед, С. Табассум, С.И. Садия, М.М.Х. Саччу, М.А. Алам. Журн. роста кристаллов, **643**, 127815 (2024).
- [21] D. Xu, M. Wang, T. Li, X. Wei, Y. Lu. Microstructures, **2**, 2022001 (2022).
- [22] K. Sakurai, M. Mizusawa. Analyt. Chem., **82** (9), 3519 (2010).
- [23] Т.К. Турдалиев. Восточно-европейский физический журн., **1**, 250 (2025). DOI: 10.26565/2312-4334-2025-1-27
- [24] R. Li, T. Li, Q. Zhou. Catalysts, **10** (7), 804 (2020).
- [25] I. Guzman. *Redox Potential Measurements of Aqueous Systems at High Temperature and High Pressure* (University of Toronto, Canada, 2018)
- [26] S. Karlsson, J. Pettersson, L.G. Johansson, J.E. Svensson. Oxidation Metals, **78**, 83 (2012).
- [27] M. Broström, S. Enestam, R. Backman, K. Mäkelä. Fuel Process. Technol., **105**, 142 (2013).
- [28] N.S. Nemeş, A. Negrea. Microbial Electrochemical Technologies: Fundamentals and Applications, **1**, 163 (2023).
- [29] H. Zhang, Y. Xin, Y. Deng, X. An, X. Liu, X. Wu. Chem. Cat. Chem., **16** (19), e202400740 (2024).
- [30] M. Rozenberg, G. Shoham, I. Reva, R. Fausto. Phys. Chem. Chem. Phys., **7** (11), 2376 (2005).
- [31] L.K. Parrott, E. Erasmus. Catalysis Lett., **148**, 2008 (2018).
- [32] V. Zdravkova, M. Mihaylov, K. Hadjiivanov. J. Phys. Chem. C, **116** (23), 12706 (2012).
- [33] Y. Li, X. Wang, Z. Duan, D. Yu, Q. Wang, D. Ji, W. Liu. Separation and Purification Technol., **293**, 121099 (2022).
- [34] T.E. Alam. *Metal oxide graphene nanocomposites for organic and heavy metal remediation* (Doctoral dissertation, University of South Florida, 2012)
- [35] B. Jaleh, P. Fakhri. *Infrared and Fourier transform infrared spectroscopy for nanofillers and their nanocomposites. In Spectroscopy of polymer nanocomposites* (William Andrew Publishing, 2016), p. 112–129.
- [36] C. Yang, C. Wöll. Adv. Phys.: X, **2** (2), 373 (2017).
- [37] H. Hamrayev, S. Korpavev, K. Shameli. J. Res. Nanosc. Nanotechnol., **12** (1), 1 (2024).
- [38] L. Yang, S. Luo, Q. Cai, S. Yao. Chinese Sci. Bull., **55** (4), 331 (2010).
- [39] S. Zilabi, M. Shareei, A. Bozorgian, A. Ahmadpour, E. Esmaeil. Adv. J. Chem. Sect. B. Nat. Prod. Med. Chem., **4**, 209 (2022).
- [40] P. Formoso, R. Muzzalupo, L. Tavano, G. De Filpo, F. Pasquale Nicoletta. Mini Rev. Med. Chem., **16** (8), 668 (2016).
- [41] C.M. Ghiciuc, O.N. Ghiciuc, L. Ochiuz, C.E. Lupuşoru. *Antibacterial effects of metal oxides-containing nanomaterials in dentistry*. In 2017 E-Health and Bioengineering Conf. (EHB), IEEE, 365 (2017)
- [42] T. Tsuzuki, X. Wang. Res. J. Textile Apparel, **14** (2), 9 (2010).
- [43] A.G. Mohanapragash, R.K. Kaleeswari, S. Meena, M. Baskar, T. Umamaheswari, M. Selvamurugan, T. Ramesh, D. Madhupriya. Soil Sediment Contamination: An Intern. J., **34** (7), 1 (2025).
- [44] M. Pourmadadi, M.J. Ahmadi, H.S. Dinani, N. Ajalli, F. Dorkoosh. Pharmaceutical Nanotechnol., **10** (2), 90 (2022).
- [45] N.V. Long, T. Teranishi, Y. Yang, C.M. Thi, Y. Cao, M. Nogami. Int. J. Metall. Mater. Eng., **1** (119), 2455 (2015).
- [46] K. Hajra, D. Maity, S. Saha. Adv. Mater. Lett., **15** (1), 2401 (2024).