Влияние состава электролитов на свойство порошка Ti-6Al-4V

Б. А. Гоипов[*], А. А. Зарипов[**], Х. Б. Ашуров

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент, 100125, Узбекистан
[*]*e-mail: goipovbunyod7@gmail.com,* [**]*e-mail: zaripov@iplt.uz*

Поступила в редакцию 13.02.2026
После доработки 25.06.2026
Принята к публикации 28.08.2026

Проведен комплексный анализ гранулометрического состава, фазового состояния и химических свойств порошков Ti–6Al–4V, полученных методом электрохимической разрядной обработки в электролитах NaCl и $Al(NO_3)_3$. Показано, что 75,71% частиц, образованных в растворе NaCl, и 79,71% частиц, синтезированных в растворе $Al(NO_3)_3$, находятся в диапазоне 10–47 мкм. Выявлено наличие смешанных кристаллических и частично аморфных фаз в порошках, полученных в NaCl, тогда как использование $Al(NO_3)_3$ способствовало формированию более стабильных кристаллических фаз. Обнаружены связи Ti – O, Al – O, и V – O, однако для порошков, полученных в NaCl, характерна более высокая степень окисления. Установлено наличие связей металл–кислород и поверхностного оксидного слоя, при этом органические загрязнения не обнаружены. Подтверждено, что химическая чистота, фазовая стабильность и гранулометрические характеристики микропорошков Ti-6Al-4V соответствуют требованиям, предъявляемым к материалам для технологий 3D-печати.

Ключевые слова: порошок Ti-6Al-4V, ЭХРО, аддитивное производство, электроэрозия, распределение размеров частиц, фазовый анализ, окисление, электролит, анионная группа

УДК: 621.9.048.4
https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.4.55

ВВЕДЕНИЕ

Титановый сплав Ti-6Al-4V характеризуется низкими теплопроводностью и плотностью, большой прочностью, а также высокой стойкостью к воздействию повышенных температур и коррозионных сред. Благодаря этому он широко применяется в авиационной промышленности [1], автомобилестроении [2], судостроении [3], энергетике [4], медицине [5] и в области аддитивного производства (АП) [6] (англ. Additive Manufacturing, AM). Несмотря на сложности, в аддитивных технологиях сплав Ti-6Al-4V используется как в литом, так и в порошковом состоянии. Однако из отливок напрямую трудно изготавливать комплексные 3D-формы. Поэтому в процессах АП обычно используется порошок сплава. Но при использовании порошковых материалов несоответствие требованиям по форме частиц, их размеру и дисперсности делает невозможным их применение.

Для получения порошков Ti-6Al-4V используются механические (дисковое измельчение [7], шаровое измельчение [8], водная атомизация [9]), химические (процесс гидрид–дегидрид [10], химическое осаждение [11]) и физические методы, такие как электронно-лучевое плавление [12], газовая атомизация [13], индукционная газовая атомизация электрода [14] и плазменный процесс вращающегося электрода [15]. Каждый из механических, химических и физических методов имеет свои преимущества и недостатки при производстве порошков. Механические методы являются относительно простыми и экономически доступными, однако получаемые порошки характеризуются неправильной формой частиц, развитой шероховатостью поверхности и широким распределением размеров частиц [16]. Химические методы обеспечивают возможность контроля размеров частиц, однородного химического состава и высокой чистоты порошков, однако частицы, полученные такими способами, часто имеют внутреннюю пористость и неравномерную морфологию поверхности [17]. Физические методы, в частности плазменная и газовая атомизация, позволяют получать порошки высокой чистоты, сферической формы и с хорошей текучестью, однако такие процессы требуют сложного оборудования и значительных финансовых затрат [18]. В связи с этим в последние годы наблюдается возрастающий интерес к исследованию нетрадиционных способов получения металлических порошков, в частности методов электроэрозионной обработки (ЭЭО). Кроме того, электропроводность материала не является ограничивающим

фактором для метода ЭЭО, что позволяет применять данный подход для обработки металлов [19, 20], сплавов [21], стекла [22, 23] и керамики [24, 25].

В процессе ЭЭО межэлектродный зазор между анодом и катодом заполняется диэлектрической средой (жидкостью или газом), в которой под действием электрических разрядов осуществляется обработка образца. Использование в качестве рабочей среды деионизированной и дистиллированной воды [26] обеспечивает высокую теплопроводность и теплоемкость, эффективное охлаждение, а также удаление продуктов эрозии из зоны обработки [27]. В методе ЭЭО в качестве диэлектрической среды применяется не только дистиллированная вода, но и керосин, что позволяет получать из металлов сферические частицы микро- [28] и наноразмерного диапазона [29]. Кроме того, для интенсификации эрозионного процесса в воду вводят различные добавки, такие как диэлектрические жидкости [30, 31], металлические частицы [32], диэлектрические порошки [33, 34] и даже солевые растворы [35–37]. Установлено, что введение порошков в диэлектрическую жидкость в процессе ЭЭО способствует увеличению скорости обработки и улучшению качества поверхности [38, 39]. При этом принципиально важно, чтобы концентрация порошков не превышала 20 г/л, а размеры частиц находились в диапазоне 1–55 мкм или 20–150 нм [40]. Однако при реализации классического метода ЭЭО ионизация диэлектрической среды и формирование токопроводящего канала требуют применения высоких мощностей и значительных потенциалов [41, 42].

Низкоэнергетической ионизации удалось достичь за счет использования не диэлектрической среды, а водного электролита; при этом данный процесс был объяснен на основе синергетического механизма [43]. По своей природе данный метод представляет собой комбинированный процесс электрохимической и электроразрядной обработки, то есть является методом электрохимической разрядной обработки (ЭХРО). Этот метод успешно применяется для обработки сплава Ti-6Al-4V [44], который характеризуется низкой тепло- и электропроводностью [45], а также высокой механической прочностью и коррозионной стойкостью [46]. Кроме того, авторами установлено, что увеличение напряжения с 60 до 80 В приводит к росту интенсивности разрядов и скорости обработки, а также к минимизации поверхностных дефектов [47]. Помимо этого, исследователями показано, что при ЭХРО сплава Ti-6Al-4V добавление в рабочий электролит солей с различными ионными группами позволяет стабилизировать параметры процесса [48]. В частности, установлено, что обработка сплава Ti-6Al-4V в растворе $NaNO_3$ обеспечивает увеличение скорости обработки на 30% по сравнению с раствором, а в NaCl – также снижение шероховатости поверхности на 50% [49]. Вместе с тем, несмотря на указанные преимущества, в процессе ЭХРО существует высокий риск изменения исходного химического состава материала под воздействием электрохимических реакций. В связи с этим рекомендуется использование электролитов низкой концентрации [50].

Из анализа опубликованных работ [43–50] следует, что изменение исходного состава сплава Ti-6Al-4V под воздействием высоких концентраций электролита при ЭХРО является одной из наиболее актуальных проблем. В настоящей работе в качестве решения данной проблемы предложено применение низко концентрированных растворов NaCl и $Al(NO_3)_3$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для получения порошка сплава Ti-6Al-4V схема экспериментальной установки ЭХРО приведена на рис. 1.

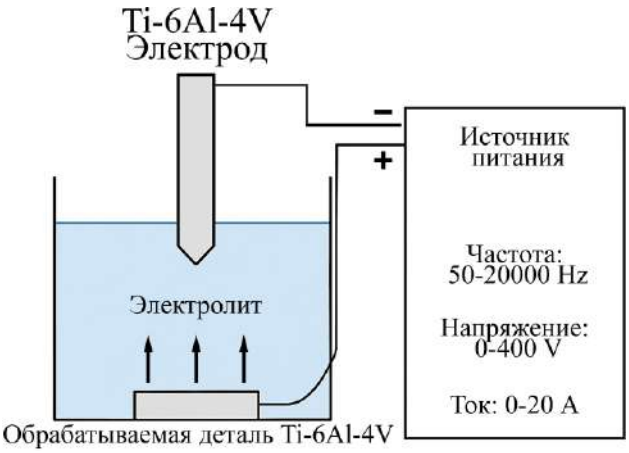


Рис. 1. Схема устройства ЭХРО.

Для получения порошка использовались электроды диаметром 4 мм, изготовленные из сплава Ti – 6Al – 4V. Электроды погружались в водные электролиты с концентрацией 0,171 моль/л NaCl и $Al(NO_3)_3$, при этом катоду задавался отрицательный потенциал, а аноду – положительный. Установка обеспечивала работу при напряжении до 400 В, токе до 20 А и диапазоне частот от 50 Гц до 20 кГц. После разрядов образовавшиеся в рабочей среде частицы подвергались центрифугированию в установке EBA 20S фирмы Hittech на скорости

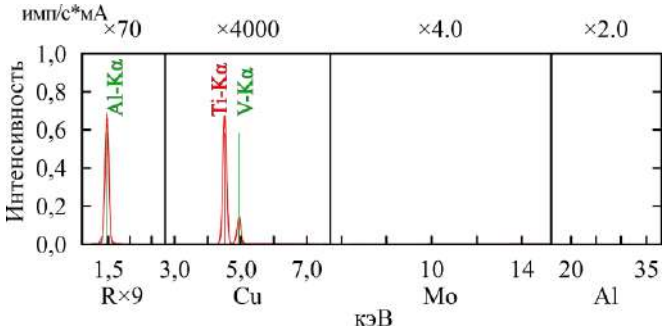


Рис. 2. Изображение сплава по данным РФА.

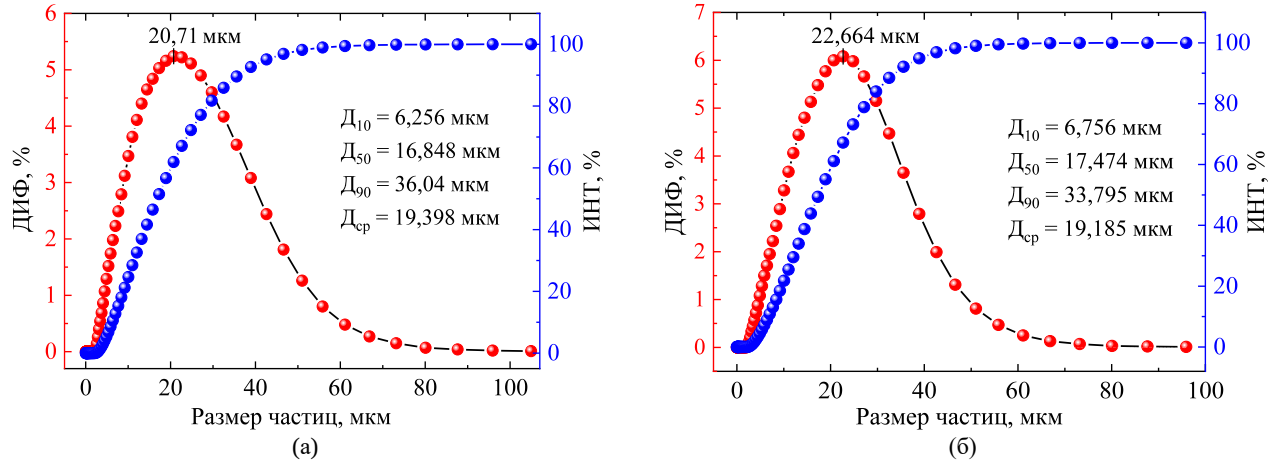


Рис. 3. Распределение размеров частиц Ti-6Al-4V, полученных в растворах: (а) – NaCl; (б) – $Al(NO_3)_3$.

60 об/с в течение 5 мин для отделения от жидкости и последующей очистки от сгустков по специальной методике. Полученные осадочные частицы сушились в печи FAITHFUL SH-6C при температуре 70 °C в течение 24 ч.

Размерное распределение высушенного порошка измерялось с помощью лазерного анализатора частиц WJL-602 в диапазоне 0,1–800 мкм с точностью ±0,5%. Первичный химический состав порошка определялся с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра Rigaku NEX CG. На последующих этапах фазовый состав и кристаллическая структура порошка исследовались методом рентгеновской дифрактометрии Rigaku SmartLab SE, химические связи анализировались с помощью рамановского спектрометра InVia компании Renishaw, а функциональные группы и химическая структура – с помощью ИК-Фурье-спектрометра Cary 640 Series Agilent Technologies. Все полученные данные обрабатывались и корректировались в программном обеспечении OriginPro 9.1.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В процессе разряда в электролитической среде анод подвергается большей эрозии под воздействием электрических импульсов. В результате эрозии образуются микрочастицы, химический состав которых соответствует составу электролита и электрода. Дисперсность этих микрочастиц обеспечивается за счет управления параметрами генератора разряда.

Перед получением микрочастиц методом ЭХРО исходный химический состав электродов был определен с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (РФА): Ti – 89,3%, Al – 6,51%, V – 3,66% (см. рис. 2).

Известно, что дисперсность полученных порошковых частиц играет крайне важную роль в технологиях аддитивного производства. На рис. 3 представлено распределение частиц. При измерении использовался лазерный анализатор (He – Ne) с длиной волны λ = 632,8 нм.

Лазерный анализ проводился при концентрации порошка в диапазоне 1,5–1,7. Красная кривая на рис. 3а обозначает дифференциальную функцию распределения (ДИФ, %), а синяя кривая – интегральную функцию распределения (ИНТ, %). По оси X размеры частиц порошка представлены в линейном масштабе в диапазоне 0,1–105 мкм. Левая ось *Y* показывает долю наиболее часто встречающихся частиц в процентах, правая ось *Y* – кумулятивное распределение в процентах от общей суммы частиц.

В диапазоне 0,1–6,256 мкм наблюдается среднее увеличение дифференциального распределения на 0,71%, интегрального – до

8,58%, что указывает на малую долю мелких частиц. В диапазоне 6,256–20,71 мкм ДИФ и ИНТ резко увеличиваются до 5,24 и 62% соответственно, при этом распределение частиц относительно симметрично. Далее для диапазона 20,71–46,622 мкм (составляющего 40,24% частиц) дифференциальное распределение снижается с 5,24 до 1,26%, а интегральное достигает 96,9%. Справа на графике указано $Д_{10}$ = 6,256 мкм, что означает: 10% частиц имеют размер меньше 6,256 мкм, средний размер частиц $Д_{ср}$ = 19,398 мкм. Таким образом, основная часть частиц образца, полученного в растворе NaCl, составляет примерно 75,71% в диапазоне 10–47 мкм, что соответствует узкому распределению и полностью удовлетворяет требованиям к порошку для 3D-печати.

На рис. 3б красная кривая также обозначает дифференциальную функцию распределения (ДИФ, %), а синяя – интегральную (ИНТ, %). По оси *X* размеры частиц указаны в линейном масштабе в диапазоне 0,1–100 мкм. Левая ось *Y* – доля наиболее часто встречающихся частиц, правая ось *Y* – кумулятивное распределение в процентах. В диапазоне 0,1–6,756 мкм среднее увеличение ДИФ составило 0,68%, интегральное распределение достигло 8,9%, что также указывает на малую долю мелких частиц. В диапазоне 6,756–22,664 мкм ДИФ и ИНТ резко увеличиваются до 6,1 и 67,2% соответственно, распределение частиц относительно симметрично. Для диапазона 22,664–46,662 мкм (37,1% частиц) ДИФ снижается с 6,1 до 0,81%, а интегральное распределение достигает 98,2%. Справа на графике указано $Д_{10}$ = 6,756 мкм, средний размер частиц $Д_{ср}$ = 19,185 мкм, остальные показатели ($Д_{50}$, $Д_{90}$, $Д_{97}$) аналогичны. Следовательно, основная часть частиц образца, полученного в растворе $Al(NO_3)_3$, составляет примерно 79,71% в диапазоне 10–47 мкм, что также соответствует узкому распределению.

Для определения фазового состава и кристаллической структуры образцов был проведен рентгеновский дифракционный анализ (РДА), представленный на рис. 4.

Измерения (см. рис. 4а) проводились на источнике излучения Cu – Kα (λ = 1,5406 Å) при следующих условиях: напряжение 40 кВ, ток 50 мА. Образцы сканировались в диапазоне углов 2θ от 10 до 100° с шагом 0,01° и скоростью сканирования 4°/мин. На рис. 4а по оси *X* представлен угол 2θ в диапазоне 20–75°, по оси *Y* – интенсивность. Основные пики наблюдались при углах: 25,32°, 28,84°, 31,3°, 36,7°, 48,22°, 54,32°, 57,64°, 62,86°, 69,04°. Для TiO_2 анатаз – 48,22°(200), 62,86°(204) (PDF 86-1157) [51], 36,7°(103) (JCPDF №73-1764); рутил – 54,32°(211), 69,04°(301) (JCPDF №73-1765); брукит – 25,32°(210) (JCPDF №76-1936) [52]. V_2O_5 соответствуют тетрагональная и орторомбическая фазы – 28,84°(241) (JCPDS №00-45-1074) [53]. Для α – Al_2O_3 выявлены пики 57,64°(116) (JCPDS №88-0826) [54] и 31,3°(301) (JCPDS №77-2418) [55]. В порошке, полученном в растворе NaCl, обнаружено образование различных устойчивых кристаллических фаз Ti, Al и V, а также аморфных смешанных фаз, что указывает на низкую степень структурной стабильности полученных порошковых частиц. Несмотря на то что в процессе анодного растворения при ЭХРО основное участие принимал анион Cl^-, данный ион не был обнаружен при РФА. Это может указывать на то, что он способствовал повышению аморфности состава образца. Как известно, достижение аморфного состояния происходит при сверхбыстром переходе вещества из жидкого состояния в твердое. В этом процессе ионы соли в электролите повышают электропроводность, что приводит к возникновению микроразрядов (искр) на поверхности. Эти разряды локально расплавляют металл, а сам электролит выполняет роль закалочной среды, обеспечивая мгновенное охлаждение и фиксацию расплавленного слоя в аморфной структуре.

На рис. 4б представлена дифрактограмма порошка, полученного в 1%-м растворе $Al(NO_3)_3$. По оси *X* указаны углы 2θ в диапазоне 25–75°, по оси *Y* – интенсивность. Основные пики наблюдаются при следующих углах: 38,95° (112), 47,88° (200) (JCPDF №73-1764) [52], 48,32° (200) (JCPDS №21-1272) [56], что соответствует высоко кристаллической фазе TiO_2 анатаза. Пики 36,13°(101), 56,47°(220) (JCPDF №73-1765) соответствуют рутилу с высокой степенью кристалличности, а пик 54,42° (211) (JCPDF №73-1765) – фазе брукит TiO_2 [52]. Пик 28,8° (241) относится к тетрагональной кристаллической фазе V_2O_5 (JCPDS №00-45-1074) [53], 35,39° (104) (JCPDS №42-1468) [57] и 66,2° (214) – к гексагональной кристаллической структуре α – Al_2O_3, относящейся к фазовой группе R-3c (JCPDS №88-0826) [54]. Для γ – Al_2O_3 отмечены пики 31,69° (220), 29,37° (107), 42,76° (1110), 40,8° (226) (JCS №10-0425) [58]. Фаза γ – Al_2O_3 имеет кубическую структуру с размерами ячейки $a = b = c$ = 79 нм и углами α = β = γ = 90°. Пики 31,77° (400) и 45,43° (411) (JCPDS №41-1426) [59], 32,82° (011) (JCPDS №77-2418) соответствуют орторомбической фазе V_2O_5 [55]. Проведенный РФА позволяет заключить, что порошок, полученный в растворе $Al(NO_3)_3$, содержит высокостабильные кристаллические фазы Ti, Al и V. При этом

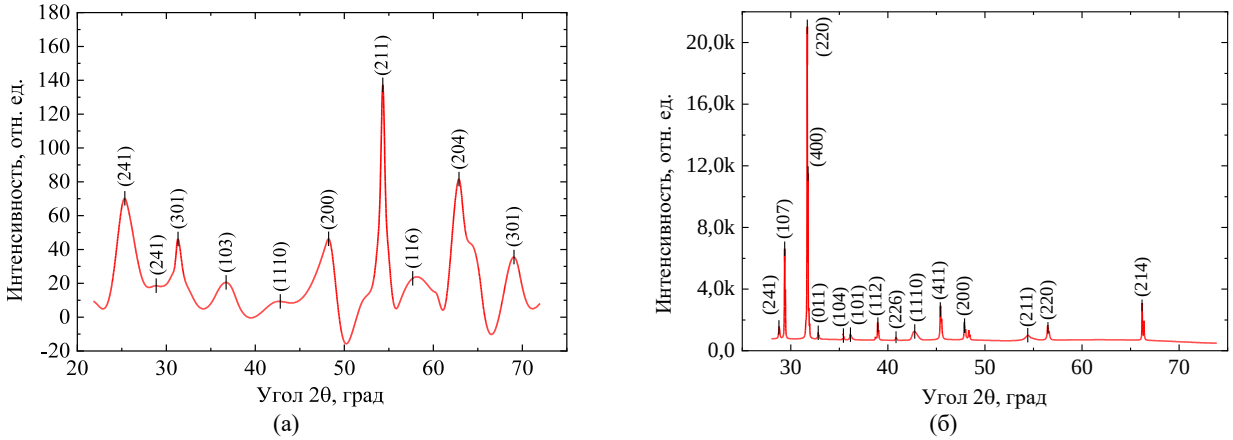


Рис. 4. Дифрактограммы порошков, полученных в 1%-м растворе: (а) – NaCl; (б) – $Al(NO_3)_3$.

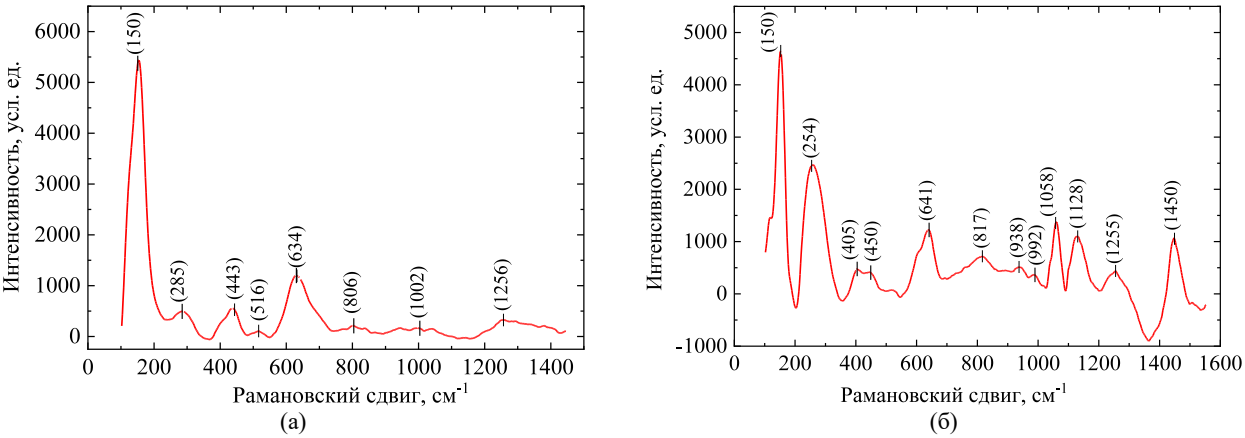


Рис. 5. Рамановский анализ порошков, полученных в 1%-м растворе: (а) – NaCl; (б) – $Al(NO_3)_3$.

порошковые частицы обладают большой структурной стабильностью. В процессе эрозии анион NO_3^- (нитрат) разлагается на газы NO_2, NO, N_2O_5, O_2 и улетучивается.

Для подтверждения результатов РДА и более глубокого изучения промежуточных фаз, химических связей и степени окисления в составе порошка дополнительно был проведен анализ методом рамановской спектроскопии (рис. 5).

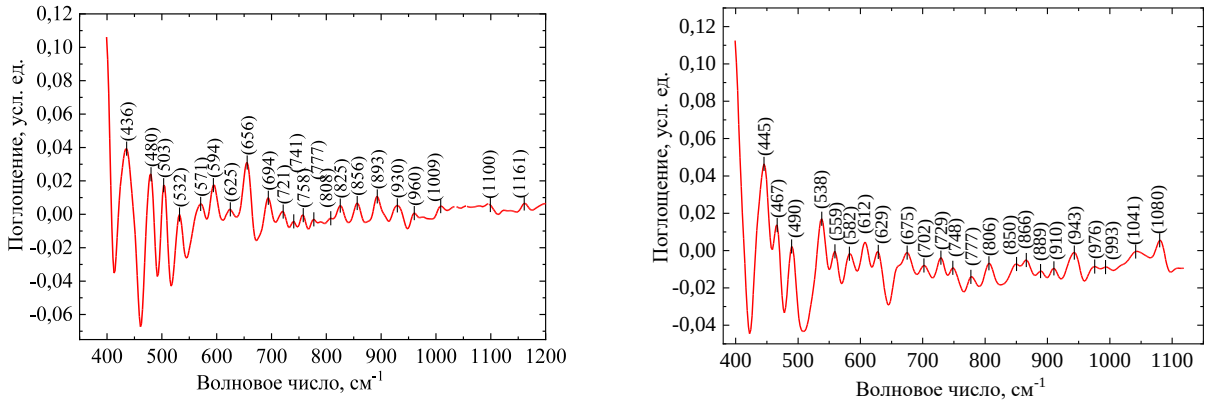
Рамановские спектры, представленные на рис. 5, были получены при комнатной температуре. В ходе измерений использовался лазер Cobolt CW DPSS с длиной волны 532 нм и дифракционная решетка с плотностью 1800 линий/мм. Спектральные данные регистрировались с помощью CCD-детектора Renishaw в диапазоне 0–3200 $см^{-1}$ при средней спектральной разрешающей способности 0,5–1 $см^{-1}$.

На рис. 5а представлен рамановский спектр порошков Ti-6Al-4V, полученных электроразрядной обработкой в электролите с 1%-м раствором NaCl. По оси *Y* отложена интенсивность, по оси *X* – рамановское смещение ($см^{-1}$). Зафиксированы характерные пики при 150, 285, 443, 516, 634, 806, 1002 и 1256 $см^{-1}$. Колебания связей Ti – Ои Ti – O – Ti наблюдаются в диапазоне 200–800 $см^{-1}$. Пик при 150 $см^{-1}$ соответствует модам B_{1g} и E_9 фазы анатаза [60], также зафиксированы пики A_{1g} (516 $см^{-1}$) и B_{1g} (634 $см^{-1}$), характерные для анатаза, а также пик E_g (443 $см^{-1}$), относящийся к фазе рутила [61, 62]. Пик при 285 $см^{-1}$ (A_9) [63] и максимум при 1002 $см^{-1}$ соответствуют колебательным модам оксидов V_4O_9 [64]. Полоса при 806 $см^{-1}$ указывает на наличие связей Al – O – Al, характерных для [65].

Рамановский анализ подтверждает присутствие металл-кислородных связей (Me – O) элементов Ti, Al и V. Однако при использовании электролита NaCl в процессе эрозии образующиеся частицы находятся в более окисленном состоянии, что может создавать дополнительные трудности при их последующей обработке методами аддитивного производства.

На рис. 5б представлена рамановская зависимость порошков титанового сплава, полученных в 1%-м растворе $Al(NO_3)_3$. По оси *Y* отложена интенсивность, по оси *X* – рамановский сдвиг ($см^{-1}$). Зафиксированы характерные пики при 150, 254, 405, 450, 641, 817, 938, 992, 1058, 1128, 1255 и 1450 $см^{-1}$.

Пик при 150 $см^{-1}$ отнесен к модам B_1g и E_9 фазы анатаза [60]. Полосы при 450 $см^{-1}$ (внутренняя мода Eg) и 641 $см^{-1}$ (внешняя фононная мода A_1g) соответствуют фазе α – Al_2O_3 [66, 67]. Пик при 405 $см^{-1}$ связан с



(а) (б)

Рис. 6. ИК-Фурье-спектры порошков, полученных в 1%-м растворе: (а) – NaCl; (б) – $Al(NO_3)_3$.

колебательными модами V_2O_5 [68], при 641 $см^{-1}$ – V_3O_5, при 992 $см^{-1}$ – α – V_2O_5 [63], а полоса при 938 $см^{-1}$ соответствует оксиду VO_2 [69].

Для γ – Al_2O_3 характерно наличие полос поглощения в диапазоне 400–1000 $см^{-1}$, которые соответствуют валентным колебаниям связей Al – O – Al в октаэдрических и тетраэдрических координационных положениях кристаллической решетки [70]. Пики в интервале 1058–1450 $см^{-1}$ связаны с валентными и деформационными фононными колебаниями иона NO^{3+} [71, 72].

Рамановский спектроскопический анализ подтверждает наличие связей типа Me – O для элементов Ti, Al и V. Однако при использовании электролита $Al(NO_3)_3$ в процессе эрозии частицы формируются в более окисленном состоянии, что может создавать определенные трудности при их последующей обработке методами аддитивного производства.

С целью определения функциональных групп и исследования особенностей химической структуры образцов был проведен анализ методом ИК-Фурье-спектроскопии (рис. 6).

В ходе исследования спектры регистрировались в диапазоне 4000–400 $см^{-1}$ при выбранном спектральном разрешении 4 $см^{-1}$. На рис. 6а представлен ИК-Фурье-спектр порошков титанового сплава, полученных методом ЭХРО в 1%-м растворе NaCl. По оси *Y* отложено поглощение, по оси *X* – волновое число ($см^{-1}$). В спектре зафиксированы характерные полосы при 436, 480, 503, 532, 571, 594, 625, 656, 694, 721, 741, 758, 777, 808, 825, 856, 893, 930, 960, 1009, 1100 и 1161 $см^{-1}$. Диапазон 1000–435 $см^{-1}$ соответствует фазе γ – Al_2O_3 и связан с деформационными колебаниями связей Al – O и Al – O – Al. Полосы в интервале 500–750 $см^{-1}$, в частности пик при 594 $см^{-1}$, относятся к координационно различным алюминиевым центрам Al^{6+} и Al^{4+}, что указывает на наличие в фазе γ – Al_2O_3 как тетраэдрически, так и октаэдрически координированных атомов алюминия [73]. Пик при 1100 $см^{-1}$ является характерным для γ – Al_2O_3 и соответствует колебаниям химической связи Al – O [74]. Кроме того, зафиксированы полосы, относящиеся к оксиду V_2O_5, пик при 960 $см^{-1}$ соответствует деформационным колебаниям связи V – O – V, а полоса при 1161 $см^{-1}$ соотносится с валентными колебаниями двойной связи V = O [75]. На рис. 6б представлен ИК-Фурье-спектр порошков титанового сплава, полученных в 1%-м растворе $Al(NO_3)_3$. По оси *Y* отложена абсорбция, по оси *X* – волновое смещение ($см^{-1}$). В спектре зафиксированы полосы поглощения при 445, 467, 490, 538, 559, 582, 612, 629, 675, 702, 729, 748, 777, 806, 850, 866, 889, 910, 943, 976, 993, 1041 и 1080 $см^{-1}$. Широкие полосы поглощения в диапазоне 450–800 $см^{-1}$ соответствуют колебаниям связей Ti – O и Ti – O – Ti [76]. Пики при 467 и 729 $см^{-1}$ характерны для анатазной фазы TiO_2 [77]. Полосы при 538 и 675 $см^{-1}$ соотносятся с колебаниями связи Ti – O в рутильной фазе [78]. Колебания при 445 $см^{-1}$ отнесены к связям Al – O – Al [57]. Пик при 612 $см^{-1}$ соответствует колебаниям V – O – V, характерным для V_2O_5 [79].

В ИК-Фурье-спектрах металлических порошков органические функциональные группы не обнаружены, однако в низкочастотной области зафиксированы колебания, характерные для металл–кислородных связей Ti – O, Al – O – Al и V – O – V, а также поверхностного оксидного слоя. Органические загрязнения не выявлены.

ВЫВОДЫ

Результаты исследований распределения размеров частиц, фазового и химического состава порошков, полученных в процессе электроэрозии в электролитах NaCl и $Al(NO_3)_3$, показали существенные различия в их свойствах. Анализ распределения размеров частиц установил, что 75,71% частиц, полученных в

растворе NaCl, и 79,71% частиц, эродированных в растворе $Al(NO_3)_3$, сосредоточены в диапазоне 10–47 мкм. Это свидетельствует о том, что при смене анионной группы электролита в обоих случаях формируются порошки с узким распределением размеров, а механизм эрозии стабильно обеспечивает образование частиц близких размеров.

Фазовый анализ порошков, полученных в растворе NaCl, показывает, что формируются нестабильные смешанные кристаллические и аморфные фазы элементов Ti, Al и V, указывающие на недостаточную прочность кристаллической структуры и низкую общую термодинамическую стабильность порошка. Напротив, РФА порошков, полученных в растворе $Al(NO_3)_3$, показал образование высокостабильных кристаллических фаз Ti, Al, и V, что свидетельствует о более совершенном формировании оксидов металлов и высокой структурной стабильности частиц.

Рамановская спектроскопия подтвердила наличие связей Ti – O, Al – O и V – O (Me – O) в обоих образцах. Однако установлено, что использование электролита NaCl приводит к значительному увеличению степени окисления. Это вызывает чрезмерное окисление порошковых частиц, что затрудняет их последующую переработку в процессах аддитивного производства, поскольку избыток оксидов дестабилизирует процесс плавления, снижает степень уплотнения и ухудшает механические свойства.

Результаты проведеннооой ИК-Фурье-спектроскопии показали, что в металлических порошках образца не наблюдаются органические функциональные группы и посторонние примеси.

Увеличение концентрации солевых электролитов при ЭХРО приводит к росту остаточного содержания компонентов электролита в порошке, повышению степени окисления частиц и расширению распределения их размеров.

Проведенный комплексный анализ подтверждает, что микрочастицы Ti-6Al-4V, полученные в водном электролите $Al(NO_3)_3$, обладают высокой химической чистотой, фазовой стабильностью и узким распределением размеров. По совокупности данных параметров полученные порошки соответствуют техническим требованиям, предъявляемым к материалам для 3D-печати.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kumar, N., Kumar, M., Kumar, V., and Sharma, A., Microstructural heterogeneity and anisotropy control of additive manufactured Ti-6Al-4V alloy for aircraft components, *JOM*, 2023, vol. 75, p. 1695. https://doi.org/10.1007/s11837-023-05756-z
2. Zhang, W., and Xu, J., Advanced lightweight materials for Automobiles: A review, *Materials & Design*, 2022, vol. 221, art. ID 110994. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110994
3. Vrsalović, L., Gudić, S., Talijančić, A., Jakić, J., et al., Corrosion behavior of Ti and Ti_6Al_4V alloy in brackish water, seawater, and seawater bittern, *Corros. Mater. Degrad*, 2024, vol. 5, p. 641. https://doi.org/10.3390/cmd5040031
4. Younas, M., Khan, M., Jaffery, S.H.I., Khan, Z., and Khan, N. Investigation of tool wear and energy consumption in machining Ti_6Al_4V alloy with uncoated tools, *Int. J. Adv. Manuf. Techno*., 2024, vol. 132, p. 3785. https://doi.org/10.1007/s00170-024-13548-1
5. Festas, A.J., Carvalho, S., and Davim, J.P., Titanium alloys for medical applications-A brief review, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 240, no. 7, p. 1076. https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/14644207251350294
6. Zhang, C., Zou, D., Mazur, M., Mo, J.P., and Ding, S. The state of the art in machining additively manufactured titanium alloy Ti-6Al-4V, *Materials*, 2023, vol. 16, p. 2583. https://doi.org/10.3390/ma16072583
7. Dikici, T., and Sutcu, M., Effects of disc milling parameters on the physical properties and microstructural characteristics of Ti_6Al_4V powders, J. *Alloys and Compd.*, 2017, vol. 723, p. 395. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.06.202
8. Çuvalcı, O., Varol, T., Akçay, S.B., Güler, O., and Çanakçı, A. Effect of ball mill time and wet pre-milling on the fabrication of Ti powders by recycling Ti machining chips by planetary milling, *Powder Techno.*, 2023, vol. 426, art. ID 118637. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118637
9. Kassym, K., and Perveen, A., Atomization processes of metal powders for 3D printing, *Materials today: proceedings*, 2020, vol. 26, p. 1727. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.364
10. Yablokova, G., Speirs, M., Van Humbeeck, J., Kruth, J.P., et al., J. Rheological behavior of β-Ti and NiTi powders produced by atomization for SLM production of open porous orthopedic implants, *Powder Techno.*, 2015, vol. 283, p. 199. http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.05.015
11. Mendez-Lozano, N., Apátiga-Castro, M., Soto, K.M., Manzano-Ramírez, A., et al., Effect of temperature on crystallite size of hydroxyapatite powders obtained by wet precipitation process, *J. Saudi Chem. Society*.,

2022, vol. 26, art. ID 101513. https://doi.org/10.1016/j.jscs.2022.101513

12. Краснова, Е.В., Моргунов, Ю.А., Саушкин, Б.П., Статистическое исследование шероховатости поверхности изделий из Ti-6Al-4V, построенных методом селективного электронно-лучевого плавления. *Электронная обработка материалов*, 2022, т. 58, № 6, с. 1. https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.6.01
13. Chen, G., Zhao, S.Y., Tan, P., Wang, J., et al., A comparative study of Ti-6Al-4V powders for additive manufacturing by gas atomization, plasma rotating electrode process and plasma atomization, *Powder Techno*., 2018, vol. 333, p. 38. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.013
14. Wu, J., Xia, M., Wang, J., Zhao, B., et al., Effect of electrode induction melting gas atomization on powder quality: satellite formation mechanism and pressure, *Materials*, 2023, vol. 16, art. ID 2499. https://doi.org/10.3390/ma16062499
15. Zhang, Y., Song, M., Li, Y., Li, Y., et al., Effect of preparation process on the microstructure and characteristics of TiAl pre-alloyed powder fabricated by plasma rotating electrode process, *Crystals*, 2024, vol. 14, art. ID 562. https://doi.org/10.3390/cryst14060562
16. Angelo, P.C., Subramanian, R., and Ravisankar, B. *Powder metallurgy: Science, technology and applications.* Second Edition. Delhi: PHI Learning Private Limited, 2023, p. 13.
17. Yang, X.L., Du, X.F., Xu, Z.L., Liang, Z.S., and Xiong, L.L. Progress in processing of porous titanium: a review, *Rare Metals*, 2024, vol. 43, p. 1932. https://doi.org/10.1007/s12598-023-02570-z
18. Zhang, S., Guo, K., Qing, Y., and Liu, C., Research Progress on the Preparation Technology of Spherical Alloy Powders for Laser Additive Manufacturing, *Materials*, 2025, vol. 18, art. ID 3385. https://doi.org/10.3390/ma18143385
19. Болога, М.К, О создателе и выдающемся исследователе метода электроэрозионной обработки материалов. К 110-летию академика Бориса Лазаренко, *Электронная обработка материалов*, 2020, т. 56, № 5, с. 1. https://doi.org/10.5281/zenodo.4047638
20. Wei, T., Duan, X., Yang, X., Li, G., et al,. Bubbles and debris in electrical discharge machining: a review,. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*., 2025, vol. 136, p. 1933. https://doi.org/10.1007/s00170-024-14915-8
21. Thangamani, G., Thangaraj, M., Moiduddin, K., Mian, S.H., et al., Performance analysis of electrochemical micro machining of titanium (Ti-6Al-4V) alloy under different electrolytes concentrations. *Metals*, 2021, vol. 11, art. ID. 247. https://doi.org/10.3390/met11020247
22. Du, J., Tian, B., Duan, L., Ming, W., et al., Traditional and non-traditional machining technology of metallic glass, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*., 2022, vol. 120, p. 2879. https://doi.org/10.1007/s00170-022-08923-9
23. Tang, W., Yao, J., Zhang, J., Zhao, Q., et al., Experimental investigation of the machining characteristics in graphite-powder-mixed electrochemical discharge machining of microholes in glass, *Micromachines*, 2023, vol. 14, art. ID 1810. https://doi.org/10.3390/mi14101810
24. Selvarajan, L., Venkataramanan, K., Senthil-kumar, N., Sasikumar, R., and Aravindhan, A., Investigations and optimization of EDM parameters of conductive ceramic composites: A review, *In: Advances in Modern Machining Processes (AIMTDR* 2021), Springer, Singapore, 2022, p. 185. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7150-1_16
25. Geng, T., and Xu, Zh., Electrochemical discharge machining for fabricating holes in conductive materials: A review, *J. Adv. Manuf. Sci. Technol*., 2021, vol. 1, art. ID 2021006-1. https://doi.org/10.51393/j.jamst.2021006
26. Jeswani, M.L., Electrical discharge machining in distilled water, *Wear*, 1981, vol. 72, p. 81. https://doi.org/10.1016/0043-1648(81)90285-4
27. Uhlmann, E., Polte, J., Bolz, R., Yabroudi, S., et al., Application of additive manufactured tungsten carbide-cobalt electrodes with interior flushing channels in S-EDM. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 95, p. 460. https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.136
28. Khilji, I.A., Saffe, S.N.B.M., Pathak, S., Ţălu, Ş., et al., Titanium alloy particles formation in electrical discharge machining and fractal analysis, *JOM*, 2022, vol. 74, p. 448. https://doi.org/10.1007/s11837-021-05090-2
29. Cabanillas, E.D., TEM observations of particles obtained by electro-erosion in kerosene, *Journal of materials science*, 2007, vol. 42, p. 3155. https://doi.org/10.1007/s10853-006-1388-6
30. Valaki, J.B., Rathod, P.P., and Sankhavara, C.D., Investigations on technical feasibility of Jatropha curcas oil based bio dielectric fluid for sustainable electric discharge machining (EDM). *J. Manuf. Process*., 2016, vol. 22, p. 151. http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.03.004
31. Wang, B., Ji, R., Gong, Z., Zhao, Q., et al., Effect of water in oil emulsion on the surface quality of Inconel 718 alloy during coupling electrical pulse and ultrasonic treatment, *Surf. Coat. Technol.* 2022, vol. 437, art. ID 128355. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128355
32. Joshi, A.Y., and Joshi, A.Y., Multi response optimization of PMEDM of Ti_6Al_4V using Al_2O_3 and SiC powder added de-ionized water as dielectric medium using grey relational analysis, *SN Applied Sciences*, 2021, vol. 3, art. ID 718. https://doi.org/10.1007/s42452-021-04712-3
33. Ishfaq, K., Maqsood, M.A., Anwar, S., Harris, M., Alfaify, A., and Zia, A.W., EDM of Ti_6Al_4V under nano-graphene mixed dielectric: a detailed roughness analysis. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*., 2022, vol. 120, p. 7375. https://doi.org/10.1007/s00170-022-09207-y

34. Ekmekci, N., and Ekmekci, B. Electrical discharge machining of Ti_6Al_4V in hydroxyapatite powder mixed dielectric liquid, *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, vol. 31, p. 1663. https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1090591

35. Zaripov, A.A., and Ashurov, Kh.B., Electrical discharge machining of nonconductive materials, *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 2011. vol. 47, p. 197. https://doi.org/10.3103/S1068375511030021

36. Niu, S., Huang, K., Ming, P., and Wang, S., Jet Electrochemical Micromilling of Ti-6Al-4V Using NaCl–Ethylene Glycol Electrolyte, Micromachines, 2024, vol. 15, art. ID 173. https://doi.org/10.3390/mi15020173

37. Li, H., Gao, C., Wang, G., Qu, N., and Zhu, D., A study of electrochemical machining of Ti-6Al-4V in $NaNO_3$ solution, *Scientific reports*, 2016, vol. 6, art. ID 35013. https://doi.org/10.1038/srep35013

38. Fadhil, S.R., and Aghdeab, S.H., Effect of powder-mixed dielectric on EDM process performance, *Eng. Technol. J.*, 2020, vol. 38, p. 1226. https://doi.org/10.30684/etj.v38i8A.554

39. Van Dong, P., Huu Phan, N., Van Thien, N., Kien, N., et al., Enhancing the machinability of SKD61 die steel in power-mixed EDM process with TGRA-based multi criteria decision making, *J. Mech. Behav. Mater.*, 2022, vol. 31, p. 345. https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0039

40. Chourasiya, M., Mahate, V., and Bisen, A. A review on the effects of powder mixed dielectric medium in electrical discharge machining, *IJSART*, 2022, vol. 8, p. 181.

41. Kumar, D., Pathak, V.K., Singh, R., and Dikshit, M.K., A comprehensive review on powder mixed electrical discharge machining: advances in dielectric enhancement and machining efficiency, *Discov. Appl. Sci*., 2025, vol. 7, art. ID 710. https://doi.org/10.1007/s42452-025-07365-8

42. Pendokhare, D., and Chakraborty, S., A review on multi-objective optimization techniques of wire electrical discharge machining, *Arch. Comput. Method E.*, 2025, vol. 32, p. 1797. https://doi.org/10.1007/s11831-024-10195-3

43. Zaripov, A.A., Khalilov, U.B. and Ashurov, K.B., Synergism of the Initial Stage of Removal of Dielectric Materials during Electrical Erosion Processing in Electrolytes, *Surf. Engin. Appl. Electrochem*, 2023, vol. 59, p. 712. https://doi.org/10.3103/S1068375523060194

44. Singh, G., Samra, P. S., and Kumar, A. Tool electrode considerations in EDM of titanium alloys–A review, *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 56, p. 3117. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.298

45. Ahuir-Torres, J.I., Chadwick, J., West, G., Kotadia, H.R., and Öpöz, T.T., Effect of electrical discharge machining (EDM) bath composition on long-term corrosion of Ti-6Al-4V in simulated body fluid. *Electrochimica Acta*, 2024, vol. 503, art. ID 144865. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.144865

46. Краснова, Е.В., Моргунов, Ю.А., Саушкин, Б.П., Слюсарь, И.А., Смеян, С.А., Влияние состава водного электролита на эффективность электрохимической обработки изделий аддитивного производства из сплава Ti-6Al-4V, *Электронная обработка материалов*, 2024, т. 60, № 5, с. 1. https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.5.01

47. Bhargav, K.V.J., Balaji, P.S., Sahu, R.K., and Leblouba, M., Experimental investigation on machining characteristics of titanium processed using electrolyte sonicated μ-ECDM system, *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, art. ID 15540. https://doi.org/10.1038/s41598-022-20001-4

48. Vivekkumar, P., Soundrapandian, E., Tajdeen, A., and Prashanth, T., Experimental Study of Electrochemical Micromachining on Titanium (Ti–6Al–4V) Alloy, In *International Conference on Advances in Materials Research*, December, 2019 p. 301, Singapore: Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8319-3_32

49. Niu, S., Yu, C., Ming, P., Wang, S., et al., Titanium alloy Ti-6Al-4V electrochemical dissolution behavior in $NaNO_3$ and NaCl solutions at low current density, *Materials*, 2024, vol. 17, art. ID. 5026. https://doi.org/10.3390/ma17205026

50. Singh, M., Singh, S., and Kumar, S. Environmental aspects of various electrolytes used in electrochemical discharge machining process, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. and E.*, 2020, vol. 42, art. ID. 395. https://doi.org/10.1007/s40430-020-02492-2

51. Yadav, V., Verma, P., Negi, H., Singh, R.K., and Saini, V.K., Efficient degradation of 4-nitrophenol using VO (TPP) impregnated TiO_2 photocatalyst: Insight into kinetics and mechanism, *J. Mater. Res.*, 2023, vol. 38, p. 237. https://doi.org/10.1557/s43578-022-00856-z

52. Verma, R., Gangwar, J., and Srivastava, A.K., Multiphase TiO_2 nanostructures: A review of efficient synthesis, growth mechanism, probing capabilities, and applications in bio-safety and health, *RSC Advances*, 2017, vol. 7, p. 44199. https://doi.org/10.1039/c7ra06925a

53. Al-Mushaki, M.A.A., Al-Ariki, S.A., and Alnehia, A., Effect of copper oxide (CuO) and vanadium oxide (V_2O_5) addition on the structural, optical and electrical properties of corundum (α-Al_2O_3), *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, art. ID 16100. https://doi.org/10.1038/s41598-023-43309-1

54. Sriharan, N., Senthil, T.S., Kang, M., and Ganesan, N.M. Rutile TiO_2 nanorod arrays incorporated with α-alumina for high efficiency dye sensitized solar cells, *App. Phys. A*, 2019, vol. 125, art. ID 118. https://doi.org/10.1007/s00339-019-2407-1

55. Shokr, E.K., Elkot, S.A., Kamel, M.S., and Ali, H.M., Highly efficient $(V_2O_5)_{0.91}$ $Zn_{0.09}$ powdered

catalyst for water organic pollutant elimination, *Optik*, 2024, vol. 302, art. ID 171718. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2024.171718

56. Assayehegn, E., Solaiappan, A., Gidey, A.T., Gebreegziabher, G.G., et al., In Situ Driven Formation of Anatase/Brookite/Rutile Heterojunction N/TiO_2 Nanocrystals as Sustainable Visible-Light Catalysts, *Global Challenges*, 2024, vol. 8, art. ID 2400174. https://doi.org/10.1002/gch2.202400174
57. Mahmoud, S.A., Elsisi, M.E., and Mansour, A.F., Synthesis and electrochemical performance of α-Al_2O_3 and M-Al_2O_4 spinel nanocomposites in hybrid quantum dot-sensitized solar cells, *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, art. ID 17009. https://doi.org/10.1038/s41598-022-21186-4
58. Gharbi, A.H., Laouini, S.E., Hemmami, H., Bouafia, A., et al., Eco-friendly synthesis of Al_2O_3 nanoparticles: comprehensive characterization properties, mechanics, and photocatalytic dye adsorption study, *Coatings*, 2024, vol. 14, art. ID. 848. https://doi.org/10.3390/coatings14070848
59. Jain, V.M., Shah, D.V., Patel, K.K., and Shah, M.S., Surfactant free synthesis and study of vanadium pentoxide nanostructure, *J. Nano- and Electron. Phys.*, 2020, vol. 12, no.2, art. ID 02017. https://doi.org/10.21272/jnep.12(2).02017
60. Wadge, M.D., Carrington, M.J., Constantin, H., Orange, K., Greaves, J., et al., Characterization of potential nanoporous sodium titanate film formation on Ti_6Al_4V and TiO_2 microspherical substrates via wet-chemical alkaline conversion, *Mater. Charact.*, 2022, vol. 185, art. ID 111760. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.111760
61. Hardcastle, F.D., Raman spectroscopy of titania (TiO_2) nanotubular water-splitting catalysts, *J. Ark. Acad. Sci.*, 2011, vol. 65, p. 43. https://doi.org/10.54119/jaas.2011.6504
62. Fathi-Hafshejani, P., Johnson, H., Ahmadi, Z., Roach, M., et al., Phase-selective and localized TiO_2 coating on additive and wrought titanium by a direct laser surface modification approach, *ACS Omega*, 2020, vol. 5, p. 16744
. https://dx.doi.org/10.1021/acsomega.0c01671
63. Shvets, P., Dikaya, O., Maksimova, K., and Goikhman, A., A review of Raman spectroscopy of vanadium oxides, *J. Raman spectrosc.*, 2019, vol. 50, p. 1226. https://doi.org/10.1002/jrs.5616
64. Bouzidi, A., Benramdane, N., Bresson, S., Mathieu, C., Desfeux, R., and El Marssi, M. X-ray and Raman study of spray pyrolysed vanadium oxide thin films, *Vibr. Spectrosc.*, 2011, vol. 57, p. 182. https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2011.07.003
65. Redonnet, J., Simsek-Franci, G., and Colomban, P., Non-Invasive Rayleigh, Raman, and Chromium-Fluorescence Study of Phase Transitions: β-Alumina ИНТо γ-Alumina 'Single'Crystal and Then to α-Alumina, *Materials*, 2025, vol. 18, art. ID 4682. https://doi.org/10.3390/ma18204682
66. Vural, S., and Sari, Ö. Synthesis and characterization of SDS assistant α-alumina structures and investigation of the effect of the calcination time on the morphology, *Colloid Polym. Sci*., 2019, vol. 297, p. 107. https://doi.org/10.1007/s00396-018-4442-4
67. Delbé, K., De Sousa, C., Grizet, F., Paris, J.Y., and Yahiaoui, M., Determination of the pressure dependence of Raman mode for an alumina–glass pair in Hertzian contact, *Materials*, 2022, vol. 15, art. ID 8645. https://doi.org/10.3390/ma15238645
68. Zhang, C., Yang, Q., Koughia, C., Ye, F., Wen, S.J., and Kasap, S., Characterization of vanadium oxide thin films with different stoichiometry using Raman spectroscopy, *Thin Solid Films*, 2016, vol. 620, p. 64. http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2016.07.082
69. Hou, J., Zhang, J., Wang, Z., Zhang, Z., and Ding, Z., Structural transition of VO_2 (A) nanorods studied by vibrational spectroscopies, *RSC Adv.*, 2014, vol. 4, p. 18055. https://doi.org/10.1039/c4ra00585f
70. Nuryanto, R., Lusiana, R.A., Suyati, L., Siahaan, G.M., et al., Synthesis of alumina using the hydrothermal method with stearic acid as a template and its application as a methylene blue adsorbent, *Cognizance Journal of Multidisciplinary Studies*. 2025. vol. 5. p. 37. DIO: 10.47760/cognizance.2025.v05i06.003
71. Kloprogge, J. T., and Frost, R. L., Raman microscopy study of basic aluminium nitrate, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 1998, vol. 55, p. 163. https://doi.org/10.1016/S1386-1425(98)00178-4
72. Zhang, Q., Liu, Q., Zhu, H., Liang, X., et al., Quantification of nitrate in simulated high-level liquid waste by Raman spectroscopy, *Anal. Sci.*, 2025, vol. 41, p. 1501. https://doi.org/10.1007/s44211-025-00812-x
73. Renuka, N.K., Shijina, A.V., and Praveen, A.K., Mesoporous γ-alumina nanoparticles: synthesis, characterization and dye removal efficiency, *Materials letters*, 2012, vol. 82, p. 42. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.05.043
74. Romero Toledo, R., Ruíz Santoyo, V., Moncada Sánchez, D., and Martínez Rosales, M. Effect of aluminum precursor on physicochemical properties of Al_2O_3 by hydrolysis/precipitation method, *Nova scientia*, 2018, vol. 10, p. 83. https://doi.org/10.21640/ns.v10i20.1217
75. Sutrave, S., Konda, S., Velpula, D., Volety, S. A., et al., A simple solution combustion method for the synthesis of V_2O_5 nanostructures for supercapacitor applications, *Appl. Surf. Sci. Adv.*, 2022, vol. 12, art. ID. 100331 https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2022.100331
76. Arunmetha, S., Dhineshbabu, N.R., Kumar, A., and Jayavel, R., Preparation of sulfur doped TiO_2 nanoparticles from rutile sand and their performance testing in hybrid solar cells, *J. Mater. Sci.-Mater. Electron.*, 2021, vol. 32, p. 28382. https://doi.org/10.1007/s10854-021-07218-1

77. Praveen, P., Viruthagiri, G., Mugundan, S., and Shanmugam, N. Structural, optical and morphological analyses of pristine titanium di-oxide nanoparticles–Synthesized via sol–gel route, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2014, vol. 117, p. 622. http://dx.doi.org/10.1016/j.saa.2013.09.037

78. Johnson, M.S., Ates, M., Arslan, Z., Farah, I.O., and Bogatu, C., Assessment of crystal morphology on uptake, particle dissolution, and toxicity of nanoscale titanium dioxide on Artemia salina, *JNN*, 2017, vol. 2, p. 11. https://doi.org/10.4018/JNN.2017010102

79. Thejaswini, M., Pramila, S., Lakshmi Ranganatha V., Jameel Al-Tamimi, et al., Facile and green-assisted synthesis of V_2O_5 Nps and investigated their multifunctional activities, *Ionics*, 2024, vol. 30, p. 8687. https://doi.org/10.1007/s11581-024-05862-1

Summary

This study aims at reducing the cost of Ti–6Al–4V alloy powder used in 3D printing technologies. A comprehensive investigation of the particle size distribution, phase composition, and chemical properties of Ti–6Al–4V powders produced by electrochemical discharge processing in NaCl and $Al(NO_3)_3$ electrolytes was carried out. A particle size analysis showed that 75.71% of the particles obtained in NaCl and 79.71% of those produced in $Al(NO_3)_3$ were within the 10–47 μm range. Those results indicate the stability of the discharge process and the formation of a narrow particle size distribution regardless of electrolyte anion composition. An X-ray diffraction analysis revealed mixed crystalline and partially amorphous phases in powders obtained in NaCl, whereas $Al(NO_3)_3$ promoted the formation of more stable crystalline phases. Raman spectroscopy identified Ti–O, Al–O, and V–O bonds, while powders produced in NaCl exhibited a higher oxidation degree. A Fourier transform infrared spectroscopy confirmed the presence of metal–oxygen bonds and a surface oxide layer while no organic contaminants were detected. The results demonstrate that the chemical purity, phase stability, and granulometric characteristics of Ti–6Al–4V micropowders meet the requirements for 3D printing materials.

Keywords: Ti-6Al-4V powder, electrochemical discharge machining, additive manufacturing, electroerosion, particle size distribution, phase analysis, oxidation, electrolyte, anionic group