

## Влияние состава электролита на формирование порошков микрочастиц методом элетроэрозионно-электрохимической обработки

© Б.А. Гоипов, А.А. Зарипов, Х.Б. Ашууров

Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,  
100125 Tashkent, Uzbekistan  
e-mail: zaripov@iplt.uz

Поступило в Редакцию 28 января 2026 г.

В окончательной редакции 22 апреля 2026 г.

Принято к публикации 22 апреля 2026 г.

Проведен анализ влияния состава электролита на формирование микрочастиц порошка сплава Ti-6Al-4V, применяемого в аддитивных технологиях (АТ). Особое внимание уделено процессу получения частиц методом электроэрозионно-электрохимической обработки (ЭЭХО) с использованием электролитов NaOH и KCl. Результаты исследования показали, что применение электролита NaOH обеспечивает формирование порошков с узким распределением частиц: 77.2% частиц находятся в диапазоне 15–55 мкм. Полученные порошки сохраняют стабильные кристаллические фазы Ti, Al и V, а также демонстрируют выраженные Me–O-связи, что подтверждает их структурную стабильность. Благодаря этому такие порошки являются более подходящими для последующей переработки в АТ-процессах и удовлетворяют технологическим требованиям 3D-печати. В противоположность этому, порошки, полученные в электролите KCl, характеризуются полидисперсным распределением, при котором лишь 26% частиц входят в диапазон 15–55 мкм. Выявлено присутствие смешанных кристаллических и аморфных фаз, что снижает структурную стабильность частиц и приводит к их повышенной окисленности. Эти особенности усложняют применение таких порошков в аддитивном производстве. Полученные данные показывают, что правильный выбор электролитной среды в процессе ЭЭХО позволяет эффективно контролировать распределение частиц и повышать качество порошков Ti-6Al-4V для их последующего применения в АТ. Использование NaOH в качестве электролита подтверждается как наиболее перспективное решение для получения порошков с требуемыми характеристиками.

**Ключевые слова:** Ti-6Al-4V, электроэрозионно-электрохимическая обработка, аддитивное производство, распределение размеров частиц, рентгенофазовый анализ.

DOI: 10.61011/JTF.2026.08.63361.15-26

### Введение

Здоровье человека во многом зависит от состояния костной ткани, и при различных заболеваниях нередко возникает необходимость замены поврежденных участков костей имплантатами. Имплантаты подразделяются на ортопедические [1], стоматологические [2] и сердечно-сосудистые (стенды) [3]. Для их изготовления широко применяются титановые сплавы [4], которые отличаются биосовместимостью [5], высокой прочностью [6], коррозионной стойкостью [7]. В производстве имплантатов все большее распространение находят высокоточные технологии аддитивного производства и 3D-печати [8,9]. В процессах 3D-печати используются металлические порошки и порошки металлических сплавов. Существует ряд механических, химических и физических методов получения металлических порошков, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. Например, порошки, полученные механическими методами, обладают неправильной формой частиц, шероховатой поверхностью и широким распределением частиц, однако преимущества таких методов заключают-

ся в их простоте и низкой стоимости [10]. При химических методах возможно получение порошков с узким распределением частиц и минимальным количеством примесей, однако такие порошки часто характеризуются внутренней пористостью, неоднородностью поверхности и оказывают неблагоприятное воздействие на окружающую среду, что ограничивает их применение [11]. Физические методы — газовая атомизация (ГА), плазменная атомизация вращающегося электрода [12] и электродуговая индукционная газовая атомизация (ЭИГА) — позволяют получать высокочистые, сферические и хорошо сыпучие порошки, однако требуют сложного оборудования и значительных финансовых затрат [13].

Учитывая перечисленные ограничения, в последние годы значительно возрос интерес к нетрадиционным методам получения металлических порошков, в частности, к технологиям электроэрозионной обработки (ЭЭО). Применение ЭЭО в обработке материалов имеет историю, уходящую к 1950-м годам, и на сегодняшний день широко используется в различных областях [14]. Важным преимуществом ЭЭО является то, что электропроводность, теплопроводность, прочность и хрупкость

материала не являются препятствием для обработки. Благодаря этому ЭЭО применяется для обработки металлов, сплавов [15], стекла [16,17], керамики [18,19] и других материалов. Для повышения скорости съема материала (англ. Material Removal Rate, MMR) и улучшения качества поверхности в ЭЭО вводят различные присадки в диэлектрическую жидкость: электропроводящие добавки [20], металлические порошки [21] и углеродные нанотрубки [22]. Эти добавки позволяют регулировать вязкость диэлектрика [23], его электрическую [24] теплопроводность [25], а также способствуют переходу к экологически более безопасным диэлектрикам [26]. С учетом вышеизложенного добавление солевых растворов NaOH и KCl в диэлектрик и применение комбинированного процесса электроэрозионно-электрохимической обработки (ЭЭХО) для получения микропорошков представляется весьма перспективным направлением [27].

ЭЭХО является гибридным методом обработки, обеспечивающим высокую эффективность при работе с диэлектрическими материалами [28]. Этот процесс предполагает изучение взаимосвязи между параметрами электролита, напряжением, длительностью импульса, геометрией инструмента и концентрацией раствора, а также их влияния на такие характеристики, как MMR, шероховатость поверхности и точность обработки [29]. Химическая природа применяемого электролита оказывает существенное влияние на качество и эффективность обработки. Установлено, что щелочные электролиты являются наиболее предпочтительными по сравнению с нейтральными и кислотными [30]. Анализ СЭМ и ЭДХ показал, что при использовании КОН и смешанных щелочных растворов износ инструмента и количество повторно затвердевших частиц существенно ниже, чем при применении NaOH и  $\text{NaNO}_3$  [31]. В некоторых исследованиях оптимальные параметры обработки без подачи электролита включают: напряжение 90 В, коэффициент заполнения импульса (duty factor) 75%, концентрация электролита 30% и скорость вращения инструмента 310 rpm [32]. В настоящей работе рассматривается влияние различных смешанных электролитов и добавок на формирование зоны обработки в процессе ЭЭХО [33]. Однако, несмотря на преимущества метода, такие проблемы, как нестабильность искровых разрядов, ограниченная величина MMR и износ инструмента, остаются ключевыми препятствиями [34].

Как видно из анализа работ [14–34], в современных исследованиях практически не затрагивается одна из наиболее важных задач для АТ — обеспечение требуемого распределения частиц порошка. Между тем распределение частиц имеет решающее значение в аддитивном производстве [35], поскольку отклонение размеров частиц может отрицательно сказаться на качестве биосовместимых материалов, используемых в имплантатах [36,37], вплоть до полной непригодности конечного изделия [38]. В ряде работ в качестве решения предлагалось комбинирование различных методов получения порошков [39,40], однако это приводит к увеличению

количества технологических циклов и соответственно повышению себестоимости продукции [41], что противоречит основной цели АТ — снижению стоимости и оптимизации производства имплантатов [42]. Dhiman и соавт. предложили механическое измельчение как способ обеспечения требуемого распределения, но этот метод ухудшает форму микрочастиц, что лишь усложняет проблему [43]. Таким образом, обеспечение стабильного распределения частиц порошка остается нерешенной, чрезвычайно актуальной задачей для АТ [35–43].

Исходя из проведенного анализа, обеспечение требуемого распределения порошковых частиц является одним из наиболее важных и нерешенных вопросов современного аддитивного производства. Настоящая работа посвящена практическому решению указанной проблемы.

## 1. Методика экспериментов

Синтез порошка на основе сплава Ti-6Al-4V проводился на экспериментальном стенде для ЭЭХО, принципиальная схема которого приведена на рис. 1. Ключевой особенностью установки является импульсный источник питания, реализованный на высокоскоростных IGBT-ключках IRG4PH50UD и диодах 150EBU04. Данная архитектура управления обеспечивает прецизионную настройку параметров процесса: амплитуду напряжения до 400 В, силу тока до 20 А и частоту модуляции импульсов до 200 kHz. Для генерации стабильного искрового разряда применялась конфигурация с полным погружением анода в электролит, при этом рабочий диапазон заглубления конического катода составлял 1–5 мм. Стабильность физико-химических условий в зоне реакции обеспечивалась системой принудительной циркуляции рабочей жидкости с помощью насоса с расходом 2 л/мин. Это обеспечивало эффективный теплоотвод и оперативное удаление продуктов эрозии из межэлектродного пространства, предотвращая термическую деградацию, повторное переплавление или неконтролируемую коагуляцию наноструктур.

Как следует из представленной схемы, электроды погружены в емкость, заполненную рабочим электролитом.

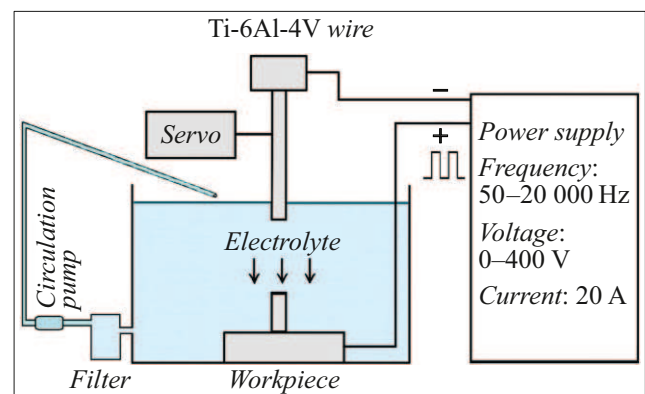


Рис. 1. Схема установки ЭЭХО.

В качестве электродов использовались биосовместимые прутки из сплава Ti-6Al-4V диаметром 4 mm. Межэлектродное расстояние было установлено на уровне 4 mm. Разряды между электродами осуществлялись в водном электролите, приготовленном на основе деионизированной воды с добавлением солей NaOH или KCl при концентрации 0.171 mol/l. Удельная электрическая проводимость электролитов при температуре 25 °C и давлении 101 kPa составила 32 mS/cm для электролита на основе NaOH и 21 mS/cm для электролита на основе KCl. Во время экспериментов на установку подавалось постоянное напряжение до 250 V, при этом система управления формировала прямоугольные импульсы с частотой до 20 kHz, при этом продолжительность импульсов составляла  $T_{on} = 5-25 \mu s$ , а пауза  $T_{off} = 45-25 \mu s$ . В процессе работы поддерживался ток до 0.6 A, что обеспечивало стабильный искровой режим разряда.

В качестве рабочей среды применялись 0.171 mol/l водные растворы NaOH и KCl квалификации ХЧ, приготовленные на дистиллированной воде. Навески реагентов контролировались на аналитических весах с точностью до  $\pm 0.001$  g. Выбор концентрации электролита (0.171 mol/l) обусловлен необходимостью баланса между стабильностью разряда и чистотой процесса. При концентрациях  $< 0.171$  mol/l: наблюдалось повышение пробивного напряжения и нестабильность инициации искры. При концентрациях  $> 0.171$  mol/l: интенсифицировались паразитные электрохимические реакции на поверхности электродов. Реализованный высокочастотный импульсный режим работы позволил сфокусировать энергетическое воздействие непосредственно в канале искрового разряда. Это минимизировало побочные эффекты электролиза и обеспечило преимущественный вклад электроискровых процессов в электролитах в формирование фазового состава наночастиц.

Образующиеся после разрядов частицы выделялись из рабочего раствора с помощью центрифуги Hittech „EVA 20S“ при частоте вращения  $60 s^{-1}$  в течение 5 min. Полученный осадок сушили в сушильной печи FAITHFUL SH-6C при 70 °C в течение 24 h. Для определения распределения размеров частиц использовался лазерный анализатор WJL-602. Данный прибор, работающий на основе He-Ne-лазера ( $\lambda = 632.8$  nm), обеспечивает измерения в диапазоне  $0.1-800 \mu m$  с точностью  $\pm 0.5\%$ . Анализ проводился в дистиллированной воде при концентрации частиц 1.5%–1.7%.

Фазовый состав и кристаллическая структура высушенного порошка определялись методом рентгеновской дифракции на дифрактометре Rigaku SmartLab SE. Измерения выполнялись при напряжении 40 kV, токе 50 mA и  $CuK\alpha$ -излучении ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) в диапазоне углов  $2\theta$  от 20 до 75°, шаге сканирования 0.01° и скорости 5°/min.

На следующем этапе химические связи, фазовое состояние и кристаллическая структура частиц анализировались при комнатной температуре с использованием раман-спектрометра Renishaw InVia. Применялся лазер

Cobolt CW DPSS с длиной волны 785 nm и дифракционная решетка 1200 lines/mm. Спектры регистрировались CCD-детектором Renishaw в диапазоне  $0-1500 cm^{-1}$  со спектральным разрешением  $0.5-1 cm^{-1}$ . Полученные данные обрабатывались с помощью программного обеспечения OriginPro 9.1.

## 2. Обсуждение результатов

В процессе разрядов, протекающих в электролите, анод подвергается более интенсивному разрушению под действием электрических импульсов. В результате этого процесса образуются микрочастицы, химический состав которых соответствует исходному составу электролита и материалу электродов. Степень дисперсности получаемых частиц определяется корректным выбором параметров работы разрядного генератора.

После синтеза микрочастиц методом ЭЭХО исходный химический состав электродов был установлен с помощью рентген-флуоресцентного анализа (РФЛА). Установлено, что массовая доля элементов в электроде составила: Ti — 89.3%, Al — 6.51% и V — 3.66% (рис. 2).

Следы рабочей среды, присутствующие в составе микрочастиц, были полностью удалены посредством промывки и центрифугирования, что наглядно подтверждается рентгенофлуоресцентным спектром, приведенным на рис. 2. После установления того, что химический состав полученных микрочастиц полностью сохранен, были проведены исследования распределения частиц по размерам (рис. 3).

На графике красная линия соответствует дифференциальному распределению (DIF, %), а синяя — интегральному распределению (INT, %). По оси абсцисс приведен размер частиц порошка в диапазоне  $0-155 \mu m$  в линейном масштабе. Левая ось ординат показывает процентное содержание частиц максимального размера, а правая ось ординат — суммарное процентное содержание частиц по интегральному распределению (INT).

В диапазоне  $0.1-15 \mu m$  рост DIF составил в среднем 0.76%, а INT — 12.9%. Небольшой рост DIF на малых размерах указывает на низкую долю мелких частиц в

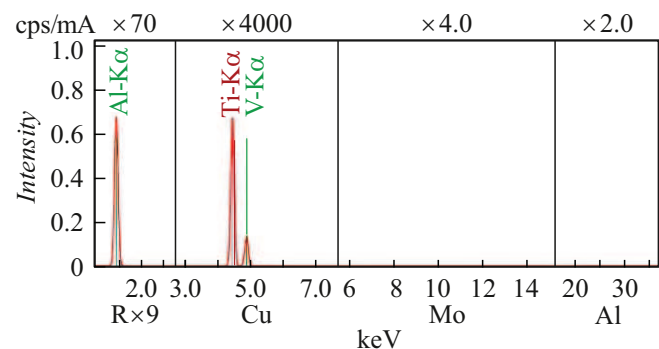
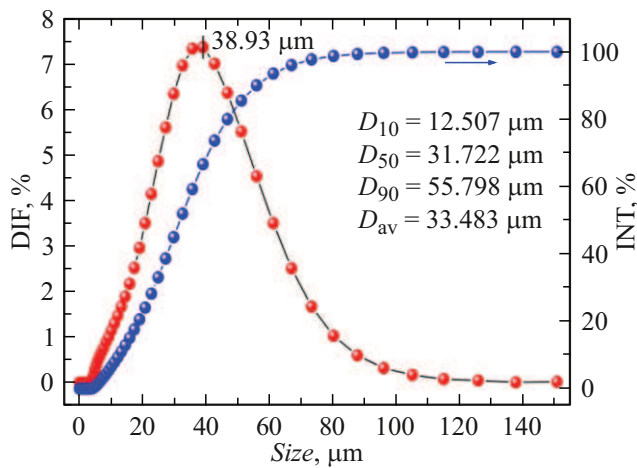


Рис. 2. Рентгенофлуоресцентный спектр сплава.



**Рис. 3.** График распределения частиц порошка Ti-6Al-4V, эродированного в электролите NaOH, по данным лазерного анализатора частиц.

этом диапазоне. В диапазоне 15–55  $\mu\text{m}$  рост DIF увеличился до 7.36%, среднее значение составило 5.14%, а INT достиг 77.2%, что в сумме дало около 90%. В этом участке графика видно относительно симметричное увеличение DIF- и INT-распределений, что указывает на узкую дисперсию частиц. Остальные 10% частиц расположены в диапазоне 55–150  $\mu\text{m}$ , что указывает на невысокую долю крупных частиц.

В правом верхнем углу графика указаны следующие показатели:  $D_{10} = 12.507 \mu\text{m}$  (статистическая характеристика порошковых частиц, т.е. 10% частиц меньше этого размера),  $D_{av} = 33.483 \mu\text{m}$  — средний размер частиц, остальные значения ( $D_{50}$  и  $D_{90}$ ) аналогичны  $D_{10}$ .

Для оценки узкости или ширины распределения частиц широко используется распределение Span (Span distribution). При расчете значения Span используют статистические показатели порошковых частиц  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  и  $D_{90}$ . Значение Span определяется по формуле:

$$\text{Span} = (D_{90} - D_{10})/D_{50}. \quad (1)$$

Таким образом, основная часть частиц образца, эродированного в электролите NaOH, составляет примерно 77.2% с размерами в диапазоне 15–55  $\mu\text{m}$ , что соответствует узкому распределению. Электролит NaOH имеет  $\text{pH} = 13$ , при котором ион  $\text{OH}^-$  окружен 3–4 атомами водорода H, образующими оболочку [44]. Это увеличивает скорость движения ионов, диффузию и электропроводность, а также формирует микрочастицы с относительно узким распределением ( $\text{Span} = 1.3647$ ).

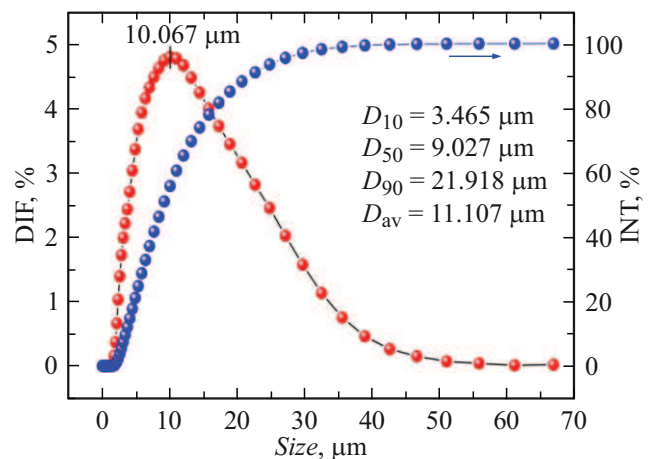
Результаты диспергирования микрочастиц методом искрового разряда в NaOH полностью соответствуют требованиям к распределению по размерам частиц для 3D-печати. Помимо гидроксидов, было изучено протекание искрового разряда в солевом электролите и возможность получения микрочастиц, удовлетворяющих

требованиям АТ. Для наглядности на рис. 4 приведено распределение частиц образца, полученного в водном электролите KCl.

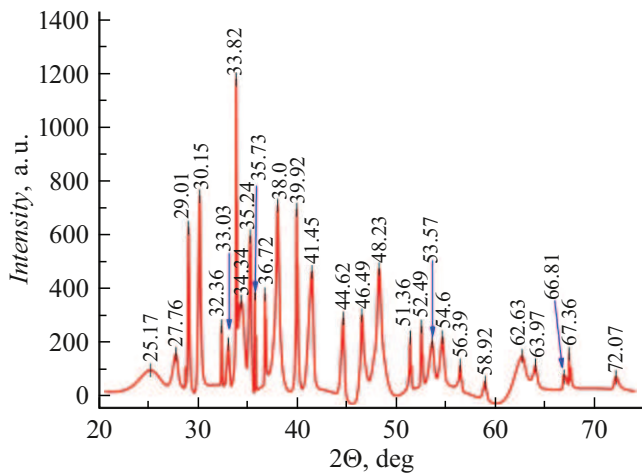
На рис. 4 на графике красная линия соответствует дифференциальному распределению (DIF, %), а синяя линия — интегральному распределению (INT, %). По оси абсцисс приведен размер частиц порошка в линейном масштабе в диапазоне 0–70  $\mu\text{m}$ . По левой оси ординат указана доля наиболее часто встречающихся частиц в процентах, а по правой оси ординат приведена суммарная доля распределения (INT, %) частиц. Распределение частиц в диапазоне 0.1–10.067  $\mu\text{m}$  имеет среднее значение DIF 2.53% и максимальное 4.79%, а INT-распределение увеличивается с 0% до 55.82%. Рост DIF в этом диапазоне свидетельствует о высокой доле мелких частиц. Снижение значения DIF до 0.5% соответствует диапазону частиц 10–40  $\mu\text{m}$  и INT-распределению 99.5% (рост на 43.63%). Остальные 0.55% частиц находятся в диапазоне 40–68  $\mu\text{m}$ , что указывает на малую долю крупных частиц. С правой стороны графика:  $D_{10} = 3.465 \mu\text{m}$  (статистическая характеристика порошковых частиц, т.е. 10% частиц меньше этого размера),  $D_{av} = 11.107 \mu\text{m}$  — средний размер частиц, остальные значения ( $D_{50}$  и  $D_{90}$ ) аналогичны  $D_{10}$ .

Образец, эродированный в электролите KCl, имеет примерно 73.96% частиц в диапазоне 0.1–15  $\mu\text{m}$  — мелкие частицы, тогда как 26% частиц находятся в диапазоне 15–55  $\mu\text{m}$ . Полученные частицы характеризуются полидисперсным распределением, что подтверждается значением  $\text{Span} = 2.0442$ , рассчитанным по формуле (1).

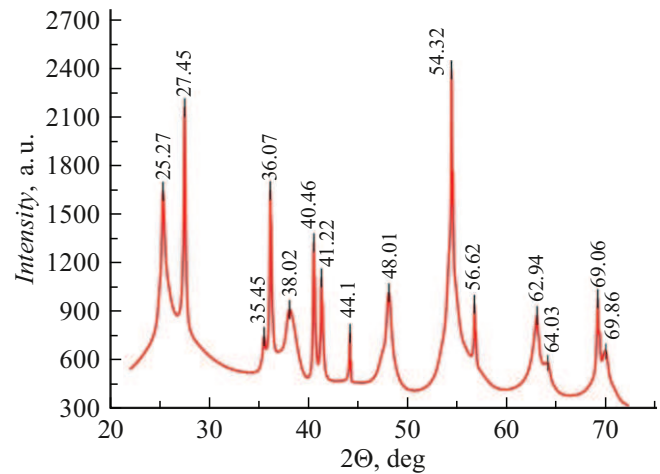
Иными словами, результаты, полученные в водном электролите KCl, не полностью соответствуют требованиям к распределению частиц для 3D-печати. Помимо распределения частиц, фазовый состав и кристаллическая структура порошка также играют важную роль в аддитивных технологиях. Для достижения поставленных



**Рис. 4.** Распределение частиц порошка сплава Ti-6Al-4V, эродированного в электролите KCl, измеренное с помощью лазерного анализатора.



**Рис. 5.** Рентгеновская дифрактограмма порошка сплава Ti-6Al-4V, эрозированного в электролите NaOH.



**Рис. 6.** Рентгеновская дифрактограмма порошка сплава Ti-6Al-4V, эрозированного в электролите.

целей был проведен рентгенофазовый анализ (РФА) порошков, полученных в обоих водных электролитах.

На рис. 5 приведена дифрактограмма РФА порошка сплава Ti-6Al-4V, эрозированного в электролите NaOH. Фазы TiO<sub>2</sub>-анатаза наблюдаются при 25.17°(101), 48.23°(200), 62.63°(204) JCPDS №86-1157 [45], 53.57°(105) [46]; фаза рутил — при 41.45°(111), 54.6°(211), 56.39°(220), 63.97°(310) JCPDS №73-1765 [47], 35.73°(101) [46], 36.72°(012) JCPDS №29-1360 [48], 38°(021), 62.63°(331) [47]. Фаза α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> выявлена при 35.24°(012) [49], 52.49°(024), 66.81°(214) ICDD 00-010-0173 [50], 30.15°(110), 33.03°(104), 44.62°(200) [51]; фаза δ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — при 29.01°(107), 32.36°(222), 33.82°(118) [52]; фаза γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — при 39.92°(222), 46.49°(400), 67.36°(440) JCPDS №00-029-0063 [53]. Тетрагональная фаза V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> наблюдается при 27.76°(240) [49], 34.34°(301) JCPDS №41-1426 [54], 51.36°(020) (JCPDS №77-2418), что соответствует орторомбической поликристаллической решетке [55].

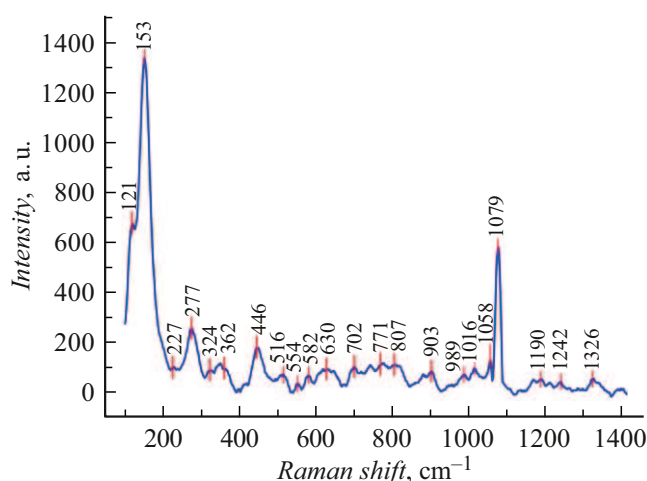
Кроме того, в процессе эрозии группа анионов OH<sup>-</sup> вызывает образование разрядов, ускоряет диффузию и подвижность ионов, а также повышает электропроводность. В результате между анодом и катодом интенсивно формируются пузырьки, которые создают низкотемпературную плазму. Коллапс пузырьков приводит к окислению частиц порошка, однако они формируются в высоко кристаллическом состоянии [56]. Проведенный РФА показывает, что порошок, полученный в растворе NaOH, содержит стабильные кристаллические фазы Ti, Al и V.

На рис. 6 представлена дифрактограмма РФА порошка сплава Ti-6Al-4V, эрозированного в электролите KCl. Основные интенсивные пики наблюдаются при 25.72°, 27.45°, 35.45°, 36.07°, 38.02°, 40.46°, 41.22°, 44.1°, 48.01°, 54.32°, 56.62°, 62.94°, 64.03°, 69.06° и 69.86°. Фазы TiO<sub>2</sub>-анатаза определены при 48.01°(200), 54.32° JCPDS №78-2486 [57], 62.94°(204), 69.86°(301)

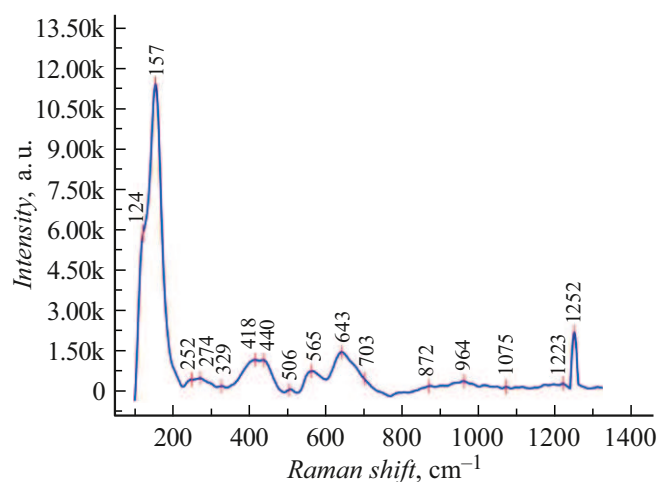
JCPDS №21-1272 [48]. Фаза рутил — при 27.45°(110), 44.1°(210), 54.32°(211), 64.03°(310), 69.06°(310) (JCPDS №89-0555 [58], а также 25.72°(111), 36.07°(102) [59], 38.02°(131), 56.62°(151), относящиеся к орторомбической фазе JCPDS №29-1360 [48]. Фаза α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — при 35.45°(104) [49], δ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — при 40.46°(226) [52], тетрагональная фаза V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — при 41.22°(002) [54].

В растворе KCl плавление частиц под воздействием высоких температур, кавитации и плазменного факела [60] привело к слабой кристаллизации и слабой связи ионов, а их экзотермическое резкое охлаждение вызвало окисление частиц и повышение доли аморфной фазы. Согласно приведенным РФА-результатам, порошок, полученный в растворе KCl, содержит различные кристаллические и аморфные фазы элементов Ti, Al и V. Проведенный РФА показал, что частицы, полученные в электролите KCl, более окисленные и имеют более аморфное состояние по сравнению с частицами, полученными в водном электролите NaOH.

На рис. 7 представлен Раман-спектр порошка сплава Ti, полученного методом искрового разряда в 0.171 mol/l растворе NaOH. Наблюдаются пики при 121, 153, 227, 277, 324, 362, 446, 516, 554, 582, 630, 702, 771, 807, 903, 989, 1016, 1058, 1079, 1179, 1190, 1242 и 1326 cm<sup>-1</sup>. Связи Ti-O и Ti-O-Ti проявляются в диапазоне сдвигов 100–800 cm<sup>-1</sup>. Пик при 153 cm<sup>-1</sup> соответствует модам анатаза B<sub>1g</sub> и E<sub>g</sub>, а пик при 227 cm<sup>-1</sup> — вторичным фононам рутила (Ti-O), модам E<sub>g</sub> и A<sub>1g</sub> [61]. Пики E<sub>g</sub> (446 cm<sup>-1</sup>) и 516 cm<sup>-1</sup> (A<sub>1g</sub> + B<sub>1g</sub>) соответствуют растяжениям Ti-O в рутиле, а пик B<sub>1g</sub> (630 cm<sup>-1</sup>) относится к фазе анатаза [61,62,63]. В диапазоне 400–1000 cm<sup>-1</sup> наблюдаются пики, относящиеся к алюминию: пик при 582 cm<sup>-1</sup> соответствует внешним модам E<sub>g</sub> фазы α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [64], а пик при 807 cm<sup>-1</sup> указывает на Al-O-Al-связи в фазе γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [65]. Пики, связанные с V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, наблюдаются при 277 и 702 cm<sup>-1</sup>, что соответствует



**Рис. 7.** Раман-спектр порошка сплава Ti-6Al-4V, эрозированного в электролите NaOH.



**Рис. 8.** Раман-спектр порошка сплава Ti-6Al-4V, эрозированного в электролите KCl.

растяжению и изгибу связей V-O [66,67]. Пик при  $362\text{ cm}^{-1}$  относится к фазе  $\text{Na}_2\text{Ti}_{16}\text{O}_{13}$  [68].

Раман-анализ подтвердил наличие Me-O-связей элементов Ti, Al и V. Кроме того, частицы, эрозированные в электролите NaOH, в основном образуются в кристаллическом состоянии, что делает их удобными для использования в АТ.

На рис. 8 представлен Раман-спектр порошка сплава Ti, полученного методом искрового разряда в  $0.171\text{ mol/l}$  растворе KCl. Наблюдаются пики при 124, 157, 252, 274, 329, 418, 440, 506, 565, 643, 703, 872, 964, 1075, 1223 и  $1252\text{ cm}^{-1}$ . Связи Ti-O и Ti-O-Ti проявляются в диапазоне  $100\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ . Пик при  $157\text{ cm}^{-1}$  соответствует модам анатаза  $\text{B}_{1g}$  и  $\text{E}_g$ , а пик при  $418\text{ cm}^{-1}$  — вторичным фоном рутила ( $\text{Ti}_2\text{O}_3$ ), модам  $\text{E}_g$  и  $\text{A}_{1g}$  [61]. Пик при  $440\text{ cm}^{-1}$  относится к внешним модам  $\text{E}_g$  фазы  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  [69]. Пик при  $506\text{ cm}^{-1}$  соответствует растяжению трижды координированных кислородных связей ( $\text{V}_3\text{-O}$ )

и модам  $\text{A}_{1g}$ -симметрии [67]. Пик при  $643\text{ cm}^{-1}$  соответствует вибрационным модам оксидов  $\text{V}_3\text{O}_5$  [70], а пик при  $703\text{ cm}^{-1}$  — растяжению и изгибу связей V-O в  $\text{V}_2\text{O}_5$  [68].

Таким образом, Раман-анализ подтвердил наличие Me-O-связей элементов Ti, Al и V. Слабая координация ионов K и Cl привела к более сильному окислению частиц порошка в процессе эрозии. Повышенное содержание кислорода в частицах затрудняет их последующую обработку методом АТ.

## Выводы

Проведенные исследования показали, что порошки, полученные в электролите NaOH, имеют преимущественно узкое распределение частиц, при этом около 77.2% находятся в диапазоне  $15\text{--}55\text{ }\mu\text{m}$ . В процессе эрозии анион  $\text{OH}^-$  ускоряет формирование микрозарядов, а при воздействии высокой температуры ( $10^4\text{ K}$ ) частично выделяются газы  $\text{O}_2$  и  $\text{H}_2$ , что приводит к частичному окислению и формированию аморфной фазы. РФА подтвердил наличие стабильных кристаллических фаз элементов Ti, Al и V, а Раман-анализ — присутствие Me-O-связей. Частицы, полученные в растворе NaOH, полностью соответствуют требованиям АТ.

С другой стороны, порошки, полученные в электролите KCl, имеют полидисперсное распределение: примерно 74% частиц находятся в диапазоне  $0.1\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$  и 26% — в диапазоне  $15\text{--}55\text{ }\mu\text{m}$ . РФА показал наличие различных кристаллических и аморфных фаз, что указывает на низкую структурную стабильность частиц. Раман-анализ подтвердил более высокое окисление частиц, что затрудняет их дальнейшую обработку методами АТ.

Таким образом, факт сохранения узкого распределения частиц и кристаллической структуры при искровом разряде в  $0.171\text{ mol/l}$  водном растворе NaOH подтверждает их пригодность для использования в АТ при изготовлении имплантов.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] P. Sadhukhan, S. Banerjee, H. Kumar, A.K. Mishra, A. Banerjee, B. Maji, M.M. Ghosh. *J. Mater. Eng. Perform.*, 1–28 (2025). DOI: 10.1007/s11665-025-11992-y
- [2] I. Tsamesidis, A. Christodoulou, E. Stalika, G.K. Pouroutzidou, E. Kontonasaki. *Biotechnol. Prog.*, e70060 (2025). DOI: 10.1002/btpr.70060
- [3] A.B. Kacsó, I. Peter. *J. Funct. Biomater.*, **16** (4), 144 (2025). DOI: 10.3390/jfb16040144
- [4] D. Rabbitt, V.M. Villapún, L.N. Carter, K. Man, M. Lowther, P. O'Kelly, S.C. Cox. *Adv. Healthcare Mater.*, **14** (4), 2403129 (2025). DOI: 10.1002/adhm.202403129

- [5] N. Masahashi, Y. Mori, H. Inoue. *Int. Mater. Rev.*, **70** (6), 465 (2025). DOI: 10.1177/09506608251345899
- [6] J.V. Calazans Neto, C.A. Celles, C.S. de Andrade, C.R. Afonso, B.E. Nagay, V.A. Barão. *ACS Biomater. Sci. Eng.*, **10** (10), 6029 (2024). DOI: 10.1021/acsbomaterials.4c00963
- [7] M. Jiang, Y. Li, H. Zhang. *Coatings*, **15** (10), 1180 (2025). DOI: 10.3390/coatings15101180
- [8] М.Ю. Грязнов, С.В. Шотин, В.Н. Чувильдеев, А.В. Семенычева, А.Н. Сысоев, А.В. Пискунов. *ЖТФ*, **94** (2), 240 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.02.57078.220-23 [M.Y. Gryaznov, S.V. Shotin, V.N. Chuvil'deev, A.V. Semenycheva, A.N. Sysoev, A.V. Piskunov. *Tech. Phys.*, **69** (2) (2024). DOI: 10.1134/s106378422402008x]
- [9] Y. Li, D. Jiang, R. Zhu, C. Yang, L. Wang, L.C. Zhang. *Int. J. Extrem. Manuf.*, **7** (2), 022002 (2024). DOI: 10.1088/2631-7990/ad92cc
- [10] Y. Jisen, W. Minghui, Z. Tingan, X. Fang, Z. Xi, Z. Ke, C. Chu. *Nanotechnol. Rev.*, **13** (1), 20240016 (2024). DOI: 10.1515/ntrev-2024-0016
- [11] N.D. Paramonova, E.A. Danilov, M.A. Vartanyan. *Glass Ceram.*, **81** (1), 78 (2024). DOI: 10.1007/s10717-024-00663-4
- [12] S. Zhang, K. Guo, Y. Qing, C. Liu. *Materials*, **18** (14), 3385 (2025). DOI: 10.3390/ma18143385
- [13] C. Spreafico. *J. Clean. Prod.*, **468**, 143104 (2024). DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143104
- [14] T. Wei, X. Duan, X. Yang, G. Li, F. Han, Y. Feng, S. Ding. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **136** (5), 1933 (2025). DOI: 10.1007/s00170-024-14915-8
- [15] G. Thangamani, M. Thangaraj, K. Moiduddin, S.H. Mian, H. Alkhalefah, U. Umer. *Metals*, **11** (2), 247 (2021). DOI: 10.3390/met11020247
- [16] W. Tang, J. Yao, J. Zhang, Q. Zhao, L. Fan, C. Mao, S. Chen. *Micromachines*, **14** (10), 1810 (2023). DOI: 10.3390/mi14101810
- [17] А.А. Зарипов, Х.Б. Ашууров. *Письма в ЖТФ*, **48** (3), 32 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.06.52345.19106-22 [A.A. Zaripov, K.B. Ashurov. *Tech. Phys. Lett.*, **48** (3), 153–155 (2022). DOI: 10.1134/S1063785022040162]
- [18] G.E.N. G. Tianyu, X.U. Zhengyang. *J. Adv. Manuf. Sci. Technol.*, **1** (3), 2021006 (2021). DOI: 10.51393/j.jamst.2021006
- [19] N. Jain, J.K. Jain, P.P. Harane, D.R. Unune. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, **45** (7), 379 (2023). DOI: 10.1007/s40430-023-04302-x
- [20] J. Modi, J. Vora, K. Abhishek, M. Jagdale, S. Kumari, R. Chaudhari. In: *Recent Advances in Mechanical Infrastructure* (Singapore, Springer, 2025), p. 523–532. DOI: 10.1007/978-981-95-0063-5\_40
- [21] R.C. Pradhan, D. Das, B.P. Sahoo, A.K. Chaubey. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C: J. Mech. Eng. Sci.*, **236** (23), 11304 (2022). DOI: 10.1177/09544062221110394
- [22] A. Abdudeen, J.E. Abu Qudeiri, A. Kareem, T. Ahammed, A. Ziout. *Micromachines*, **11** (8), 754 (2020). DOI: 10.3390/mi11080754
- [23] A. Kumar, A. Mandal, A.R. Dixit, D.K. Mandal. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **107** (7), 3065 (2020). DOI: 10.1007/s00170-020-05189-x
- [24] U. Arif, I.A. Khan, F. Hasan. *Mech. Adv. Mater. Struct.*, **31** (23), 5906 (2024). DOI: 10.1080/15376494.2023.2222295
- [25] N. Vincent, F.R. John. *World J. Eng.*, **22** (1), 1 (2025). DOI: 10.1108/WJE-01-2024-0012
- [26] V.K. Jain, D.S. Patel, J. Ramkumar, B. Bhattacharyya, B. Doloi, B.R. Sarkar, A.D. Jayal. *J. Micromanuf.*, **5** (1), 46 (2022). DOI: 10.1177/25165984211045244
- [27] V.N. Najm, T.F. Abbas, S.H. Aghdeab. *Manag. Syst. Prod. Eng.*, **32** (4), (2024). DOI: 10.2478/mspe-2024-0054
- [28] Y. Walia, P. Singh, R. Varshney. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E: J. Process Mech. Eng.*, 09544089251342618 (2025). DOI: 10.1177/09544089251342618
- [29] D. Soni, B.D. Gidwani, R. Shringi. In: *Advances in Manufacturing Engineering* (Singapore, Springer, 2022), p. 41–53. DOI: 10.1007/978-981-19-4208-2\_4
- [30] N. Sabahi, M.R. Razfar. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **95** (1), 643 (2018). DOI: 10.1007/s00170-017-1210-4
- [31] M.R. Dhanvijay, V.A. Kulkarni, A. Doke. *J. Inst. Eng. India Ser. C*, **100** (5), 763 (2019). DOI: 10.1007/s40032-019-00524-y
- [32] A. Prakash, A. Kumar, R. Ballav. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L: J. Mater. Des. Appl.*, **238** (2), 282 (2024). DOI: 10.1177/14644207231218386
- [33] Y. Walia, P. Singh. *J. Micromanuf.*, 25165984251369298 (2025). DOI: 10.1177/25165984251369298
- [34] M. Xue, X. Chen, X. Ji, X. Xie, Q. Chao, G. Fan. *Metals*, **13** (3), 604 (2023). DOI: 10.3390/met13030604
- [35] Z. Zhou, W. Sun, W. Lu, S. Zhang, J. Wang. *Adv. Eng. Mater.*, **27** (16), 2500270 (2025). DOI: 10.1002/adem.202500270
- [36] S. Yim, K. Minowa, K. Yamanaka, A. Chiba. *J. Mater. Res. Technol.*, (2025). DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.06.136
- [37] J. Elambasseril, T. Song, S. Mendis, E. Lui, M. Leary, M. Brandt, M. Qian. *Prog. Addit. Manuf.*, 1–22 (2025). DOI: 10.1007/s40964-025-01046-z
- [38] B. Meier, F. Warchomicka, J. Petrusa, P. Angerer, J. Wosik, R. Kaindl, C. Sommitsch. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **123** (5), 1577 (2022). DOI: 10.1007/s00170-022-10250-y
- [39] N. Nkhasi, W. du Preez, H. Bissett. *Metals*, **11** (11), 1763 (2021). DOI: 10.3390/met11111763
- [40] M.S. Dennison, K. Jebabalan, A.M. Milon. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 1–32 (2025). DOI: 10.1007/s00170-025-16765-4
- [41] A. Hussain, N. Abbas, Y.S. Kwon, D. Kim. *Prog. Addit. Manuf.*, **10** (8), 4349 (2025). DOI: 10.1007/s40964-024-00871-y
- [42] S. Dhiman, R.S. Joshi, S. Singh, S.S. Gill, H. Singh, R. Kumar, V. Kumar. *J. Clean. Prod.*, **348**, 131342 (2022). DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131342
- [43] M. Schalenbach, A.R. Zeradhanin, O. Kasian, S. Cherevko, K.J. Mayrhofer. *Int. J. Electrochem. Sci.*, **13** (2), 1173 (2018). DOI: 10.20964/2018.02.26
- [44] D.A. Rivani, I. Retnosari, T.E. Saraswati. In: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, **509** (1), 012034 (2019). DOI: 10.1088/1757-899X/509/1/012034
- [45] W. Li, R. Liang, A. Hu, Z. Huang, Y.N. Zhou. *RSC Adv.*, **4** (70), 36959 (2014). DOI: 10.1039/c4ra04768k
- [46] R. Verma, J. Gangwar, A.K. Srivastava. *RSC Adv.*, **7** (70), 44199 (2017). DOI: 10.1039/c7ra06925a
- [47] S.M. Qaid, H.M. Ghaithan, H.S. Bawazir, A.F. Bin Ajaj, K.K. AlHarbi, A.S. Aldwayyan. *Nanomaterials*, **13** (5), 928 (2023). DOI: 10.3390/nano13050928
- [48] M.A.A. Al-Mushaki, S.A. Al-Ariki, A. Alneha. *Sci. Rep.*, **13** (1), 16100 (2023). DOI: 10.1038/s41598-023-43309-1
- [49] A.A. Mohammed, Z.T. Khodair, A.A. Khadom. *Chem. Data Collect.*, **29**, 100531 (2020). DOI: 10.1016/j.cdc.2020.100531
- [50] Z.S. Sadeq, Z.F. Mahdi, A.M. Hamza. *Mater. Lett.*, **254**, 120 (2019). DOI: 10.1016/j.matlet.2019.07.050

- [51] A.H. Gharbi, S.E. Laouini, H. Hemmami, A. Bouafia, M.T. Gherbi, I. Ben Amor, J.A.A. Abdullah. *Coatings*, **14** (7), 848 (2024). DOI: 10.3390/coatings14070848
- [52] A.F. Alamouti, M. Nadafan, Z. Dehghani, M.M. Ara, A.V. Noghreiyani. *J. Asian Ceram. Soc.*, **9** (1), 366 (2021). DOI: 10.1080/21870764.2020.1869881
- [53] M. Thejaswini, S. Pramila, L.V. Ranganatha, J. Al-Tamimi, A.-B. Al-Odayni, V.H.B. Patil, C. Mallikarjunaswamy. *Ionics*, **30** (12), 8687 (2024). DOI: 10.1007/s11581-024-05862-1
- [54] E.K. Shokr, S.A. Elkot, M.S. Kamel, H.M. Ali. *Optik*, **302**, 171718 (2024). DOI: 10.1016/j.jileo.2024.171718
- [55] R.K. Upadhyay. *J. Electrochem. Sci. Eng.*, **15** (5), (2025). DOI: 10.5599/jese.2796
- [56] A.K. John, S. Palaty, S.S. Sharma. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **31** (23), 20868 (2020). DOI: 10.1007/s10854-020-04602-1
- [57] N. Sriharan, T.S. Senthil, M. Kang, N.M. Ganesan. *Appl. Phys. A*, **125** (2), 118 (2019). DOI: 10.1007/s00339-019-2407-1
- [58] T.T. H. Tran, T.T.H. Bui, T.L. Nguyen, H.N. Man, T.K. C. Tran. *J. Electron. Mater.*, **48** (12), 7846 (2019). DOI: 10.1007/s11664-019-07602-y
- [59] А.А. Зарипов, У.Б. Халилов, Х.Б. Ашуров. *ЭОМ*, **59** (6), 26 (2023). [A.A. Zaripov, U.B. Khalilov, K.B. Ashurov. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, **59** (6), 712 (2023). DOI: 10.3103/S1068375523060194]
- [60] M.D. Wadge, M.J. Carrington, H. Constantin, K. Orange, J. Greaves, M.T. Islam, D.M. Grant. *Mater. Charact.*, **185**, 111760 (2022). DOI: 10.1016/j.matchar.2022.111760
- [61] P. Fathi-Hafshejani, H. Johnson, Z. Ahmadi, M. Roach, N. Shamsaei, M. Mahjouri-Samani. *ACS Omega*, **5** (27), 16744 (2020). DOI: 10.1021/acsomega.0c01671
- [62] F.D. Hardcastle. *J. Arkansas Acad. Sci.*, **65** (1), 4 (2011).
- [63] М.Н. Мартышов, А.В. Павликов, Е.В. Кытина, О.В. Пинчук, Т.П. Савчук, Е.А. Константинова, П.К. Кашкаров. *ЖТФ*, **93** (2), 249 (2023). DOI: 10.21883/ЖТФ.2023.02.54500.221-22n [M.N. Martyshev, A.V. Pavlikov, E.V. Kytina, O.V. Pinchuk, T.P. Savchuk, E.A. Konstantinova, P.K. Kashkarov. *Tech. Phys.*, **68** (2), (2023).]
- [64] S. Vural, Ö. Sari. *Colloid Polym. Sci.*, **297** (1), 107 (2019). DOI: 10.1007/s00396-018-4442-4
- [65] J. Redonnet, G. Simsek-Franci, P. Colombari. *Materials*, **18** (20), 4682 (2025). DOI: 10.3390/ma18204682
- [66] A. Baltakesmez, C. Aykaç, B. Güzeldir. *Appl. Phys. A*, **125** (6), 441 (2019). DOI: 10.1007/s00339-019-2736-0
- [67] D. Surya Bhaskaram, R. Cheruku, G. Govindaraj. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **27** (10), 10855 (2016). DOI: 10.1007/s10854-016-5194-x
- [68] S.M. Chaar, J.P. Da Silva, F.X. Nobre, J. Passos, L. Aguilera, J.H.L. Silva, Y. Leyet. *Mater. Res.*, **24**, e20210011 (2021). DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2021-0011
- [69] P.G. Li, M. Lei, W.H. Tang. *Mater. Lett.*, **64** (2), 161 (2010). DOI: 10.1016/j.matlet.2009.10.032
- [70] J. Hou, J. Zhang, Z. Wang, Z. Zhang, Z. Ding. *RSC Adv.*, **4** (35), 18055 (2014).