Исследование влияния магнитно-импульсного воздействия на титановый сплав

А. М. Милюкова*, А. Н. Матяс

Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси,
*г. Минск, 220084, Беларусь, *e-mail: milykova@phti.by*

Поступила в редакцию 18.05.2026
После доработки 31.07.2026
Принята к публикации 05.08.2026

Методом автоматизированного анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) проведено исследование влияния импульсного магнитного поля на микроструктуру и фазовый состав двухфазного (α+β) сплава Ti-6Al-4V. Оценка параметров структуры (размер зерен, углы разориентации границ и локальная кривизна решетки по параметру KAM) осуществлялась послойно на глубину до 102 мкм от поверхности. Установлено, что магнитно-импульсная обработка приводит к формированию фрагментированной субструктуры в поверхностном слое и значительному росту геометрической плотности дислокаций. Выявлено более чем двукратное снижение объемной доли β-фазы в результате обработки. Полученные результаты доказывают эффективность магнитно-импульсного воздействия для поверхностного упрочнения титановых сплавов и формирования градиентных структур.

Ключевые слова: титановый сплав, магнитно-импульсная обработка, упрочнение, плотность дислокаций, разориентация границ зерен, размер зерен, прочность

УДК 621.98.044.7
https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.4.66

ВВЕДЕНИЕ

Конструкционная прочность и надежность машин существенным образом зависят от выбора материалов для их изготовления. Наиболее ценными конструкционными материалами являются сплавы, которые объединяют в себе важные эксплуатационные качества: высокую прочность, стойкость к агрессивной среде, достаточную прочность при повышенных температурах и др. Сплавы на основе титана стали одним из важнейших конструкционных материалов. Их применение наиболее целесообразно в тех областях техники, где необходимо сочетание высокой удельной прочности и коррозионной стойкости. Наибольшее применение титан находит в аэрокосмической и химической промышленности, судостроении и т.д. Сдерживает применение титановых сплавов в промышленности низкое сопротивление ползучести при температурах выше 550°С, невысокая устойчивость к вибрациям, взаимодействие с воздушной и газовой средой при повышенных температурах. В узлах трения эти сплавы неработоспособны без упрочняющей поверхностной обработки и покрытий.

В практике повышения свойств поверхностности титановых сплавов известно применение различных технологий модификации компрессионными плазменными потоками, электрохимической обработкой [1, 2]. В Государственном научном учреждении «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (ФТИ НАН Беларуси) накоплен достаточно большой опыт по структурно-фазовым превращениям в титановых сплавах с помощью высокоэнергетических технологий [3]. Общим недостатком является то обстоятельство, что улучшение одной характеристики при какой-либо упрочняющей обработке приводило к существенному снижению других характеристик. Например, повышение твердости ведет к снижению пластичности, увеличение эрозионной стойкости сопровождается снижением предела выносливости и т.д.

Для изделий, разрушение которых начинается с поверхности, применяют большое количество методов поверхностного упрочнения, с их помощью можно добиться повышения эксплуатационных характеристик за счет ускорения структурно-фазовых превращений, модификации структуры поверхностного слоя, релаксации остаточного напряжения и т.д. В этой связи в настоящее время весьма актуальным является применение новых инновационных методов упрочнения.

В ФТИ НАН Беларуси и Пекинском институте авиационных материалов развивается инновационная экологически чистая финишная технология обработки импульсным магнитным полем для улучшения свойств поверхности металлических сплавов [4]. Магнитно-импульсная обработка (МИО) имеет

Таблица 1. Химический состав сплава ВТ6

C	V	Si	N	Ti	Al
до 0,1	3,5–5,3	до 0,1	до 0,05	86,45–90,9	5,3–6,8
Zr	O	H	Fe	Примеси	
до 0,3	до 0,2	до 0,015	до 0,6	0,3	

преимущества высокой скорости и более низкой температуры обработки по сравнению с традиционной термической, индукционной и химико-термической обработкой. МИО позволяет сохранить основные геометрические параметры упрочняемых изделий. Кроме того, МИО характеризуется тем, что на металлическое изделие воздействие оказывают электродинамические силы, создаваемые импульсным магнитным полем без участия промежуточных твердых, жидких или газообразных сред.

Практическое использование энергии импульсных электромагнитных полей открывает исключительные перспективы для создания новой и современной технологии по упрочнению различного рода изделий из сталей и сплавов цветных металлов. В настоящее время одной из основных задач в исследовании МИО является изучение механизмов воздействия импульсного магнитного поля на структуру, механические и эксплуатационные свойства поверхности изделий из сплавов различных металлов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Научно обоснованным решением поставленных задач является использование метода сканирующей электронной микроскопии как автоматизированного анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD). После обработки аналитическим программным обеспечением можно визуализировать и отобразить микроструктуру в микрометровом и нанометровом масштабах. В отличие от других методов, связанных с электронной микроскопией, анализ EBSD позволяет провести исследования размера зерна, характеристик границ зерен, распределения фаз, данных об их ориентации, напряжениях и деформации и т.д.

Для упрочняющей МИО образцов титанового сплава ВТ6 применена экспериментальная технологическая установка МИУ-3, разработанная и изготовленная в лаборатории ФТИ НАН Беларуси. Длительность единичного импульса магнитного поля при воздействии на образцы в установке МИУ-3 находится в интервале от 19 до 220 мкс в зависимости от применяемого индуктора. Максимальное амплитудное значение напряженности магнитного поля составляет $1{,}7\times10^7$ А/м, что соответствует 21 Тл. Оборудование позволяет обрабатывать изделия с частотами в диапазоне 2–10 кГц и энергией до 12 кДж.

Объектом исследований, направленных на изучение влияния импульсных магнитных полей различной интенсивности на структуру поверхности материала, является сплав на основе титана (α+β) – Ti-6Al-4V, известный как Grade-5, ТС4 или ВТ6 (российский аналог). Химический состав сплава ВТ6 представлен в табл. 1.

Механические свойства сплава ВТ6: плотность – 4,51 г/см^3, относительное удлинение – $\delta_5 \geq 6\%$, относительное сужение – $\varphi \geq 20\%$, ударная вязкость – KCU = 30 Дж/см^2, временное сопротивление при растяжении (предел прочности) – $\sigma_b \geq 895$ МПа, условный предел текучести – $\sigma_{0,2} \geq 825$ МПа, рабочая температура – 100–550 °С. Теплопроводность сплава при 20 °С составляет 8,37 Вт/(м·град), для него также характерна низкая магнитная проницаемость $\mu = 1$, так как титан относится к парамагнетикам и имеет слабую проводимость электрического тока.

Для исследования влияния МИО на титановый сплав образцы подготавливались в виде прутка цилиндрической формы диаметром 10 мм и длиной 50 мм. Выбор размера и формы образцов обусловлен требованиями экспериментов и характеристиками оснастки для МИО.

Ориентируясь на возможности оборудования МИУ-3 и оснастки, существующую классификацию методов магнитной обработки и обширный накопленный в институте промышленный и исследовательский опыт применения МИО для изделий из титанового сплава, эксперименты с образцами проводились в цилиндрическом индукторе с диаметром рабочего отверстия 10,5 мм и частотой импульса 6,8 кГц. Основываясь на исследованиях влияния МИО на механические свойства поверхности титановых сплавов, проводившиеся ранее в лаборатории Магнитно-импульсных технологий [5], для МИО образцов определены технологические режимы (энергия и количество импульсов), которые представлены в табл. 2.

Применение цилиндрического индуктора с диаметром рабочего отверстия 10,5 мм и собственной индуктивностью L = 2,5 мкГн обусловлено необходимостью обеспечения минимальной длительности разрядного импульса и максимальной частоты тока. Данные параметры

Таблица 2. Режимы экспериментальной МИО партии образцов сплава ВТ6

Номер образца	Номер режима	Параметры технологических режимов МИО
Т1	1	Энергия воздействия – 5 кДж / Количество импульсов – 2
Т2	2	Энергия воздействия – 5 кДж / Количество импульсов – 3
Т3	3	Энергия воздействия – 5 кДж / Количество импульсов – 4
Т4	4	Энергия воздействия – 5 кДж / Количество импульсов – 5

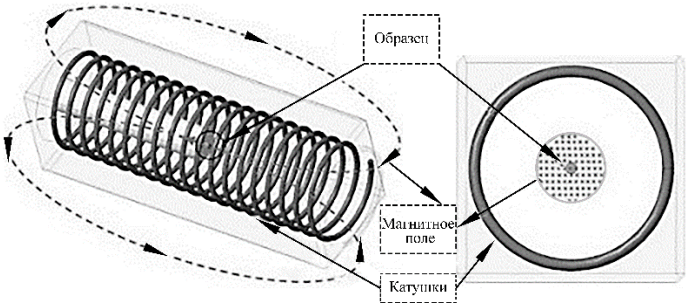


Рис. 1. Схема воздействия импульсного магнитного поля.

электродинамического контура установки МИУ-3 позволили сформировать максимальную напряженность магнитного поля, локализовать магнитный поток и обеспечить наибольшее давление на поверхность обрабатываемых титановых образцов.

Схема воздействия импульсного магнитного поля на образцы приведена на рис. 1. Высокочастотное переменное магнитное поле индуктора создает в поверхностном слое электропроводного титанового сплава интенсивные вихревые токи (токи Фуко). Взаимодействие этих токов с внешним полем порождает мощные пондеромоторные силы (силы Лоренца), создающие импульсное механическое давление на материал, что сопровождается локальным выделением джоулева тепла.

После обработки исследования твердости по Викерсу *проводили на* компьютеризированном микротвердомере Duramina 5 *производства Struers (Дания) при нагрузке 100 гс и времени нагружения 10 с.*

С помощью применения метода автоматизированного анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов с детектором Oxford Symmetry S3, установленным на растровом сканирующем электронном микроскопе TESCAN GAIA 3, проводили исследования фазовых превращений, морфологии и распределения границ зерен по углам разориентации в исследуемых образцах. Метод EBSD позволяет получить необходимую информацию о зеренной структуре: определить размеры зерен, узнать о текстуре и характере границ зерен в структуре материала, собрать данные об их ориентации, напряжениях и деформации. Именно эти характеристики материала во многом определяют уровень физических и механических свойств, механизмы образования текстуры (пластической деформации, фазовых переходов, рекристаллизации и т.д.).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При проведении экспериментальных исследований свойств образцов из титанового сплава ВТ6 при различных режимах МИО получены следующие результаты.

1. Изменение микротвердости поверхности исследуемых образцов представлено в виде диаграммы на рис. 2.

Из диаграммы видно, что микротвердость всех обработанных образцов увеличилась по сравнению с необработанным исходным образцом. Наиболее эффективным определен экспериментальный режим: 3–4 импульса с энергией воздействия магнитного поля 5 кДж. Образец Т3 по отношению к исходному образцу показал увеличение значения твердости на 18%. Максимальное значение при измерении составило 473,5 HV0,1.

Установлено, что упрочняющий эффект МИО и рост микротвердости распространяются на глубину до 30 мкм. Локализация упрочнения в таком тонком приповерхностном слое обусловлена тепловым и термомеханическим действием высокочастотных вихревых токов высокой плотности. Учитывая кратковременность магнитно-импульсного воздействия (менее 220 мкс), выделение джоулева тепла от вихревых токов носит локализованный характер. В тонком приповерхностном слое реализуется высокоскоростной термический цикл: мгновенный микронагрев за счет экстремальной плотности тока на поверхности с последующим сверхбыстрым охлаждением с проникновением в холодную сердцевину образца. Несмотря на то, что нагрев всего

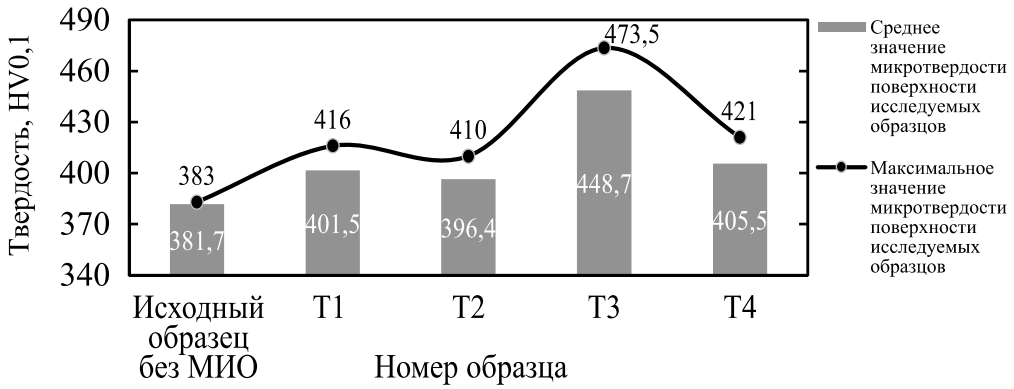


Рис. 2. Диаграмма распределения микротвердости поверхности образцов титанового сплава ВТ6 до и после МИО.

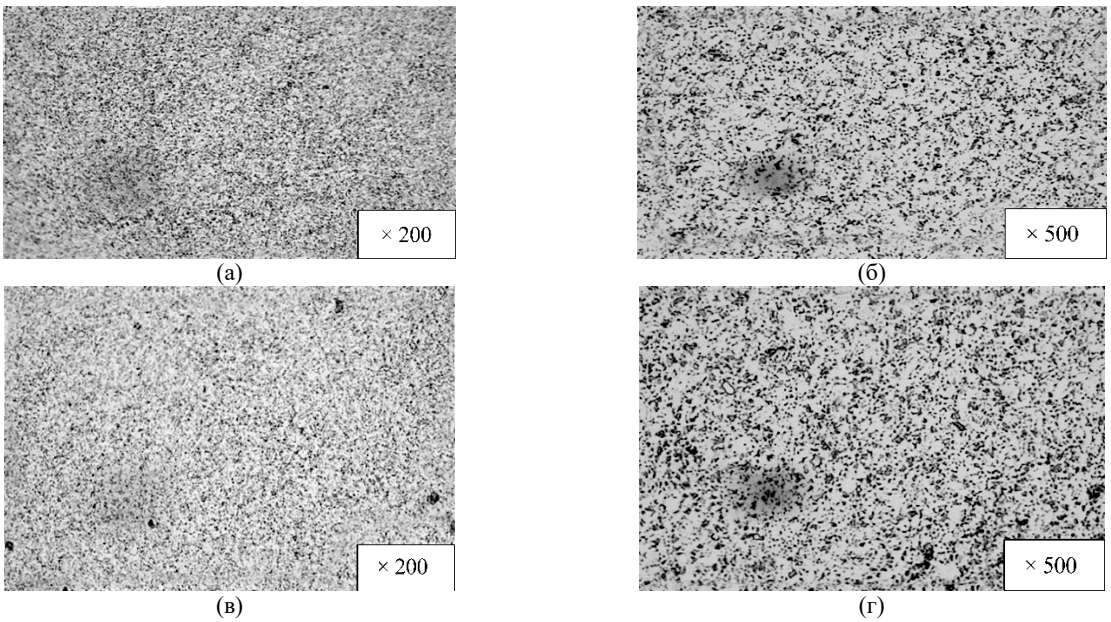


Рис. 3. Металлографические структуры поверхности и сердцевины образца титанового сплава ВТ6: (а), (б) – поверхность образца; (в), (г) – область в середине образца.

образца остается незначительным (до 50 °С), возникающий в поверхностном слое температурный градиент генерирует мощные локальные термомеханические напряжения. В условиях, когда эти напряжения превышают предел текучести сплава ВТ6, активируются процессы множественного дислокационного скольжения и высокоскоростной фрагментации. Последующее быстрое охлаждение с проникновением в глубь материала фиксирует сформировавшиеся высокодефектные неравновесные структурные состояния и субграницы, что обеспечивает рост микротвердости на глубине до 30 мкм, несмотря на то что само магнитное поле проникает на значительно большую глубину скин-слоя (около 8 мм для частоты 6,8 кГц).

Рентгеноструктурный анализ суммарных макронапряжений на поверхности исследуемых образцов до и после МИО показал, что они могут на одних образцах снижаться (релаксировать) до 2,5 раз: например, было 1,8738 ГПа, а после МИО стало 0,7829 ГПа, на других – менять полярность (знак), то есть из растягивающих становиться сжимающими. Такие изменения суммарных макронапряжений на поверхности связаны с преобразованиями в кристаллической решетке материала.

Проведены металлографические исследования отожженного образца титанового сплава ВТ6 в исходном состоянии. На рис. 3 представлены микроструктуры поверхностного слоя и в середине образца при различных увеличениях: в 200 и 500 раз.

Как видно, металлографические структуры поверхности и сердцевины образца схожи, в основном это равноосная α-фаза, в которой кристаллы имеют приблизительно одинаковые размеры во всех направлениях и небольшое количество межзеренной β-фазы.

2. Изменение распределения фаз титанового сплава до и после МИО, полученное с помощью in-situ EBSD, представлено на рис. 4.

Содержание β-фазы в образце ВТ6 после МИО на поверхности снизилось практически в 2 раза в сравнении с исходным образцом.

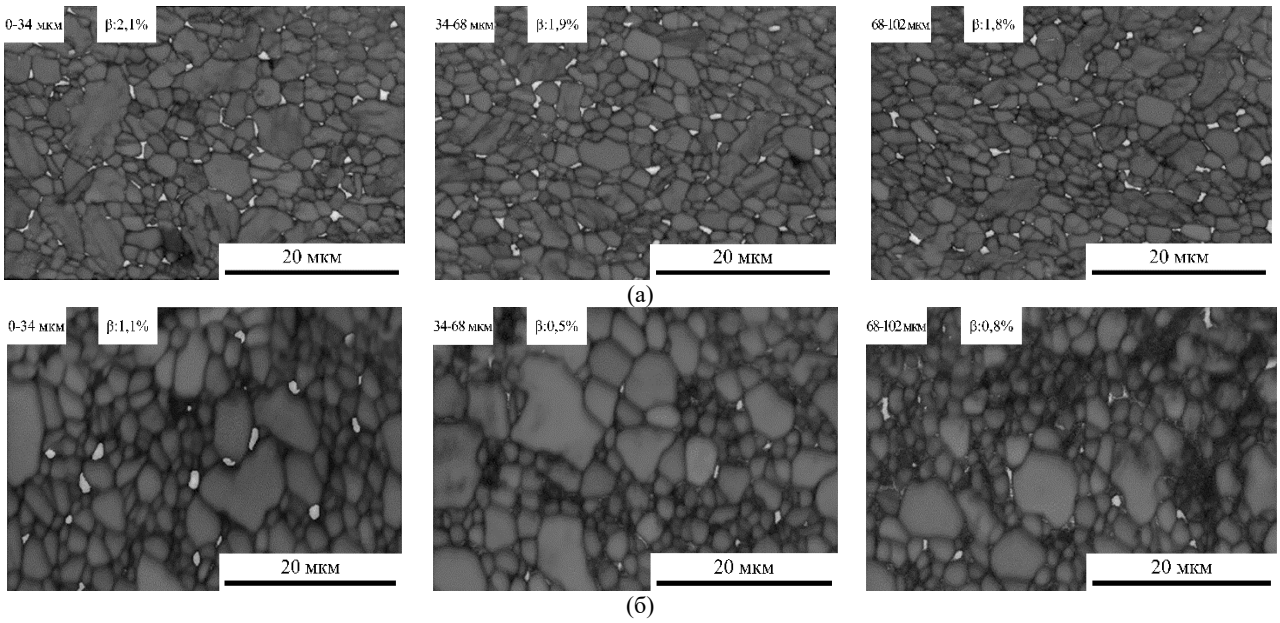


Рис. 4. Распределение фаз титанового сплава ВТ6 до и после МИО на различной глубине: (а) – исходный образец; (б) – образец Т3 после МИО.

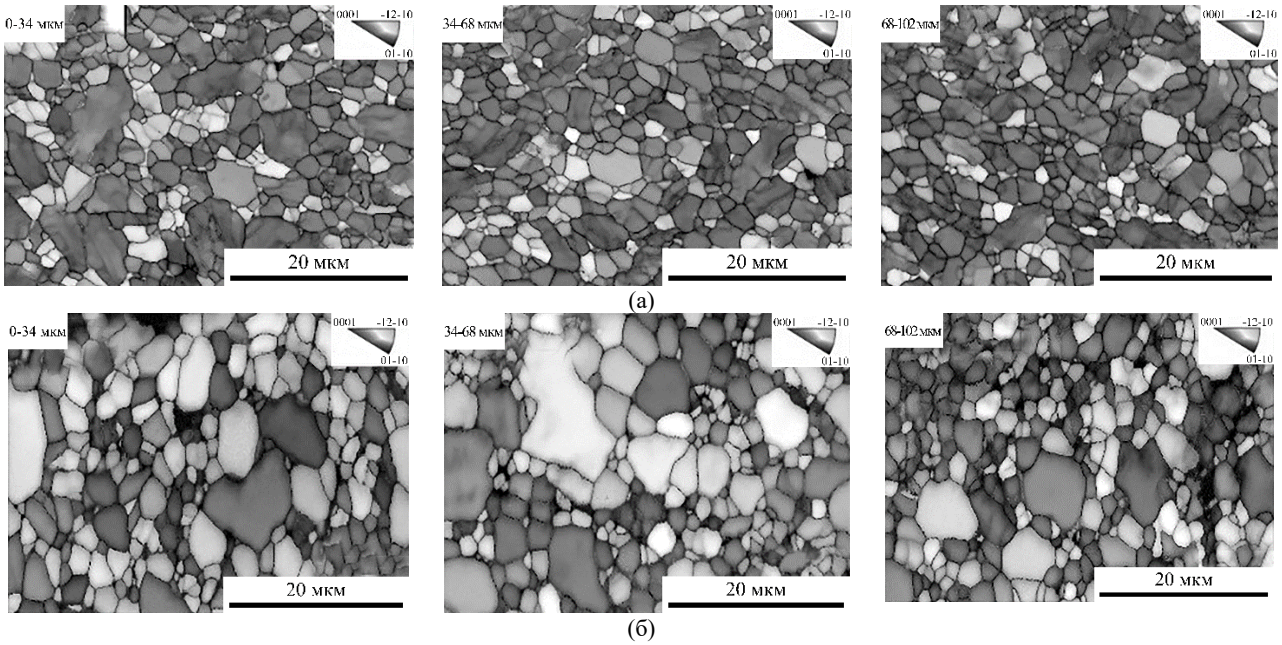


Рис. 5. Распределение ориентации зерен в направлении от поверхности внутрь: (а) – исходный образец без МИО; (б) – образец Т3 после МИО.

Это может быть связано с тем, что наложение импульсного магнитного поля вызывает трансформацию β-фазы в α-фазу (или зерно изменило свое положение и в видимой плоскости β-фаза вышла из поля зрения). Уменьшение количества β-фазы может повлиять на механические свойства α+β-сплава, в частности, на его прочность, пластичность и свариваемость. В нашем случае за счет увеличения количества α-фазы мы можем добиться повышения прочностных свойств. Такие изменения на сегодняшний день очень актуальны при упрочнении деталей газотурбинных двигателей, таких как лопатки, диски, дефлекторы. Это имеет большое значение не только для авиационной промышленности, но и для газодобывающей отрасли, где перспективными материалами для лопаток на таких турбинах могут быть псевдо-α-титановые сплавы, у которых содержание нестабильной β-фазы значительно меньше, чем в двухфазных (α+β)-титановых сплавах, что обеспечивает их более высокую тепло- и износостойкость.

3. Изменение ориентации зерен образцов сплава ВТ6. Проведен сравнительный анализ снимков распределения ориентации зерен образцов сплава ВТ6 на разных глубинах от поверхности до 102 мкм до и после МИО. На рис. 5 представлено распределение карт обратной полюсной фигуры (IPF-z) с высокоугловыми границами зерен в направлении от поверхности внутрь исходного и обработанного образцов сплава.

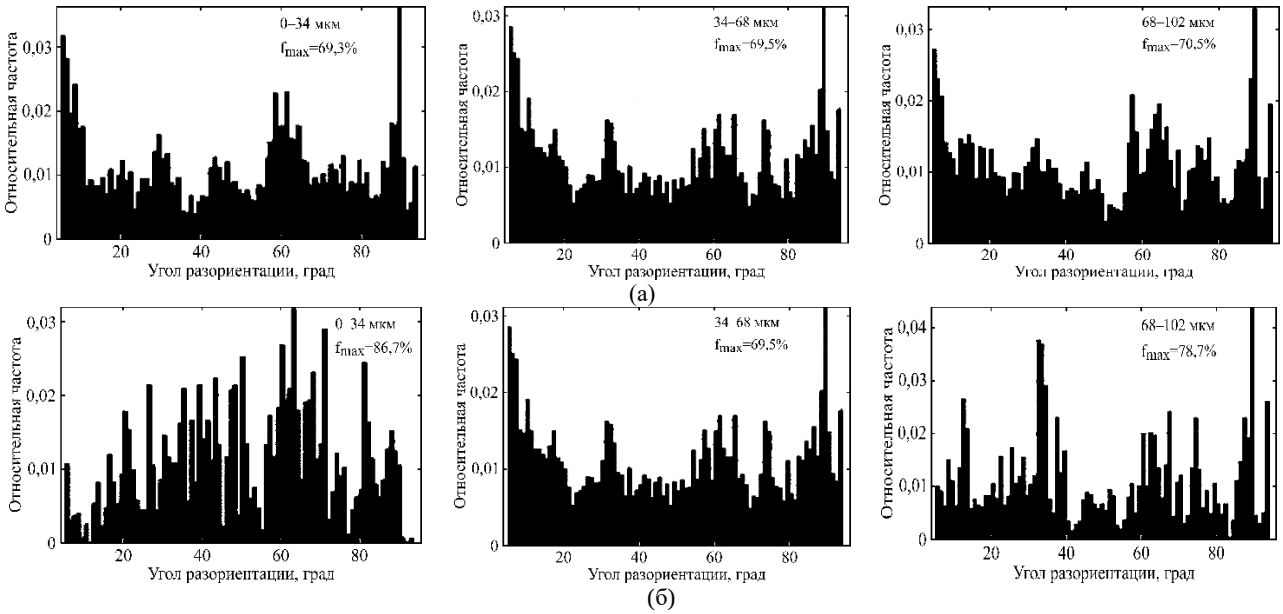


Рис. 6. Распределение угла разориентации границ зерен в направлении от поверхности внутрь: (а) – исходный образец без МИО; (б) – образец после МИО.

На рис. 5а слева большинство зерен окрашены в темно-серый (в оригинале – синий) цвет, что указывает на то, что исходное состояние сплава ВТ6 имеет избирательную ориентацию, а направление [01–10] α-фазы параллельно осевому направлению образца. На рис. 5б видно, что количество таких зерен уменьшилось, в то время как количество светло-серых (в оригинале – зеленых) зерен увеличилось. Это показывает, что после обработки импульсным магнитным полем ориентация зерен изменилась. Особенно на глубине в диапазоне 0–68 мкм направление [12–10] части α-фазы параллельно осевому направлению образца.

4. Изменение распределения угла разориентации границ зерен. Границы зерен материалов играют важную роль в управлении макроскопическими физическими свойствами материалов. Увеличение или уменьшение относительного содержания определенных типов межзеренных границ влияет на характеристики конечного материала, в то время как в деформированных материалах угол разориентации соответствует активации определенного механизма деформации. Конкретные типы границ можно определить с помощью дезориентированной гистограммы распределения частот. На рис. 6 представлены гистограммы распределения границ зерен по углам разориентации исследуемых образцов до и после МИО.

После МИО доля высокоугловых границ зерен от поверхности к внутренней части титанового сплава ВТ6 составила 86,7; 84,1; 78,6% соответственно. По сравнению с исходным образцом увеличилось содержание высокоугловых границ зерен в титановом сплаве ВТ6, что способствует повышению однородности его микроструктуры. Увеличение содержания высокоугловых границ зерен может помочь материалу продемонстрировать более высокую устойчивость к деформации и износостойкость в макромасштабе. Кроме того, полученные результаты свидетельствуют о том, что при МИО в поверхностном слое исследуемого образца происходят структурные изменения, для определения которых необходимо исследовать идентификацию с изменением размеров зерна.

5. Изменение размеров зерен исследуемого образца представлено на рис. 7 в виде гистограмм вместе с соответствующей статистикой.

Анализ послойного распределения размеров зерен сплава ВТ6 показал, что магнитно-импульсная обработка не приводит к существенному изменению эквивалентного диаметра зерен α-фазы.

Данный факт свидетельствует о том, что в условиях высокоскоростного микросекундного воздействия МИО и сопутствующего импульсного микронагрева вихревыми токами процессы диффузионной перестройки и миграции границ зерен полностью подавлены. Таким образом, зафиксированное поверхностное упрочнение сплава ВТ6 протекает без изменения макроразмеров зеренной структуры. Вклад зернограничного упрочнения по закону Холла-Петча в данном случае минимален, а доминирующими механизмами роста микротвердости выступают внутризеренный дислокационный наклеп (рост плотности дислокаций – GND) и стресс-индуцированное фазовое превращение β→α.

Дальнейшие исследования заключались в изучении распределения средней разориентации

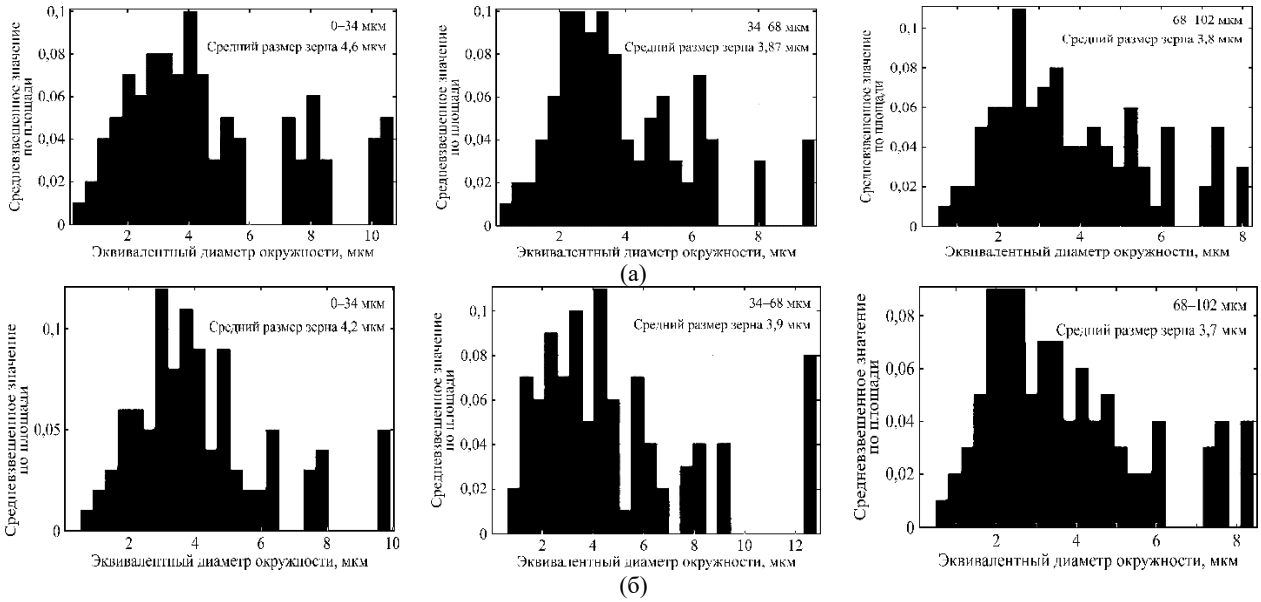


Рис. 7. Распределение размеров зерен сплава ВТ6 в направлении от поверхности вглубь: (а) – исходный образец без МИО; (б) – образец после МИО.

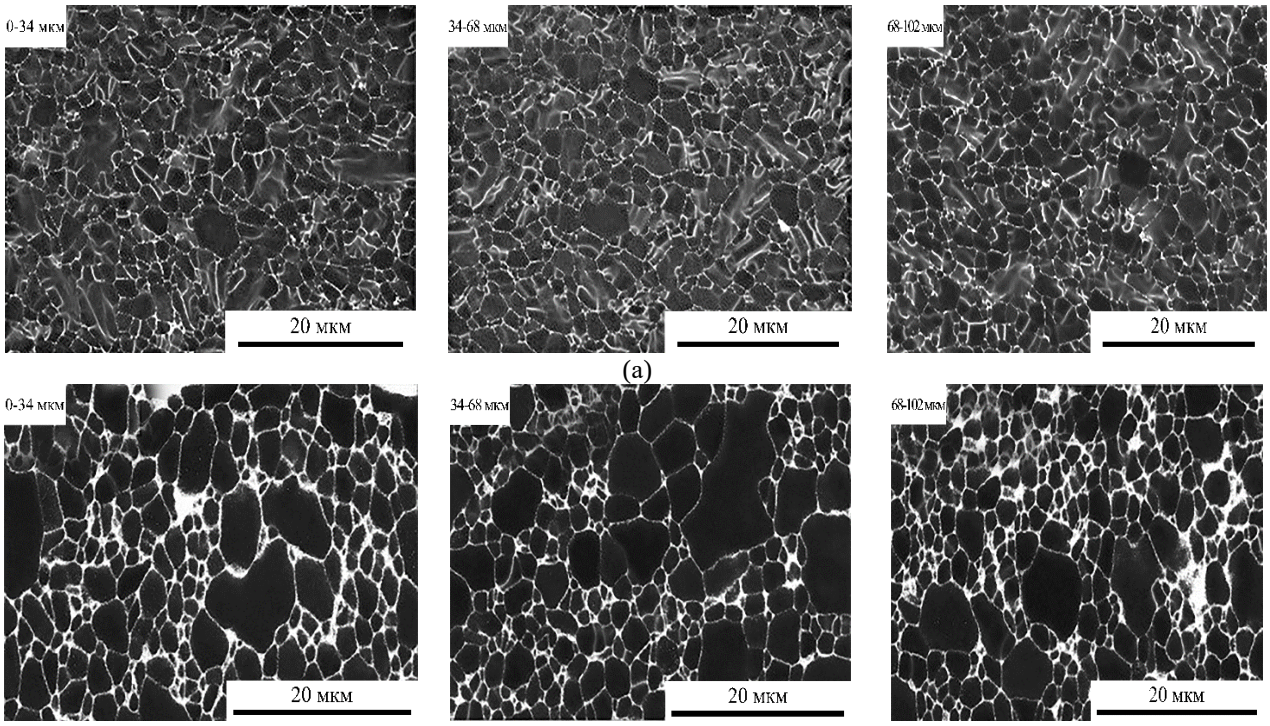


Рис. 8. Диаграммы KAM: (а) – исходный образец без МИО; (б) – образец Т3 после МИО.

ядер зерен (KAM), которое широко используется в картировании методом дифракции EBSD. Значения KAM характеризуют изменения, вызванные геометрически необходимыми дислокациями в локальной разориентации. KAM служит качественным описанием истинного распределения плотности дислокаций посредством количественной оценки локальной кривизны решетки и искажения кристаллических материалов.

На рис. 8 представлены результаты исследования распределения средней разориентации ядер зерен в направлении от поверхности к внутреннему слою для исходного образца и образца Т3 после магнитно-импульсного воздействия.

На диаграммах KAM видна существенная разница. Изучая полученные результаты, можем предположить, что чем больше значения KAM, тем больше степень пластической деформации или больше плотность дефектов.

6. Изменение геометрической плотности дислокаций. На рис. 9 представлены графики изменения геометрической плотности дислокаций GND от поверхностного слоя к внутреннему для исходного образца без МИО и образца Т3 после МИО.

Из графика видно, что средняя геометрическая плотность дислокаций исходного образца составляет около $7{,}38\times10^{14}/м^2$. После обработки импульсным магнитным полем плотность

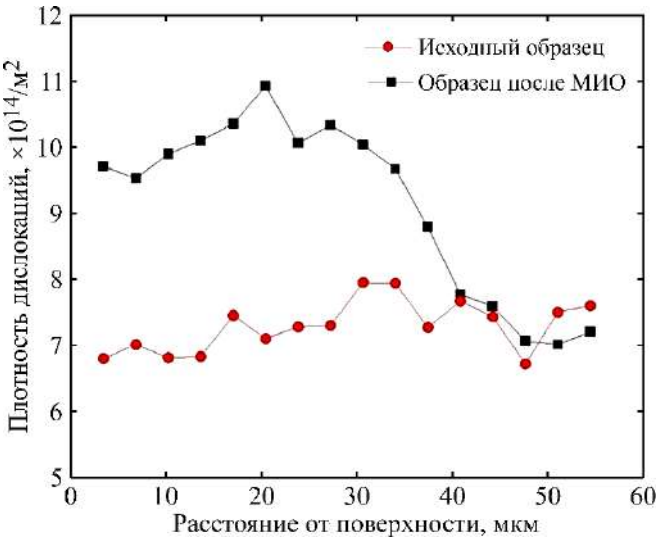


Рис. 9. Плотность геометрически необходимых дислокаций.

дислокаций поверхностного слоя сплава ВТ6 увеличивается, а средняя плотность дислокаций в диапазоне 0–34 мкм составляет $9{,}92\times10^{14}/м^2$. В пределах 20 мкм от поверхности плотность дислокаций образца сплава после обработки импульсным магнитным полем повышается с увеличением глубины. На глубине 20–54 мкм плотность дислокаций резко уменьшается и достигает плотности дислокаций матрицы.

Физический механизм наблюдаемых изменений обусловлен тем, что наложение внешнего высокочастотного импульсного магнитного поля индуцирует в поверхностном слое титанового сплава интенсивные вихревые токи. Взаимодействие этих токов с импульсным полем индуктора, согласно закону Ампера, приводит к возникновению мощных пондеромоторных (электродинамических) сил и локального магнитного давления.

Распространение порождаемой импульсом давления упругопластической волны в глубь образца вызывает появление локальных механических перенапряжений в реальной дефектной структуре сплава. В зонах, где эти перенапряжения превышают локальный предел упругости (преимущественно на границах раздела фаз и стыках зерен), активируются термофлуктуационные механизмы разрыва межатомных связей. Это приводит к формированию локализованных очагов пластической деформации, в которых интенсивно протекают процессы размножения, скольжения и перестройки дислокаций, обеспечивающие субструктурный наклеп и внутризеренную фрагментацию (полигонизацию) без изменения макроскопических размеров исходных зерен.

ВЫВОДЫ

Методом сканирующей электронной микроскопии, в частности автоматизированным анализом картин дифракции обратно рассеянных электронов, проведены исследования микроструктуры (распределение ориентации зерен, размеров зерен, угла разориентации границ зерен, плотности дислокаций) образца титанового сплава ВТ6 до и после магнитно-импульсной обработки. Установлено, что воздействие импульсным магнитным полем вызвало определенные структурные изменения в поверхностном слое сплава. В нем сформировалась фрагментированная субструктура. Обнаружено, что содержание β-фазы в исследованном образце уменьшилось практически в 2 раза, что указывает на определенную трансформацию с наложением импульсного магнитного поля на α-фазу. Под действием импульсного магнитного поля удалось повысить плотность дислокаций GND на глубину до 40 мкм, а также изменить долю высокоугловых границ зерен на глубину до 102 мкм от поверхности к внутренней части исследованного образца титанового сплава, что положительно сказывается на его эксплуатационных характеристиках (устойчивость к деформации и износостойкость). При исследовании установили, что микротвердость поверхности образцов, обработанных импульсным магнитным полем с энергией воздействия 5 кДж различной длительности, повысилась до 18%. Исследования влияния импульсного магнитного поля различной длительности на структурно-фазовый состав, особенности границ зерен, плотность дислокаций являются актуальными и своевременными. Они позволили увеличить теоретическую и экспериментальную базу результатов воздействия упрочняющей МИО на титановый сплав ВТ6.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асташинский, В.М., Углов, В.В., Черенда, Н.Н., Шиманский, В.И., *Модификация титана при воздействии компрессионными плазменными потоками*, Минск: Беларуская навука, 2016, 178 с.
2. Bahayeu, S.I., Parshuto, A.A., and Smyaglikov, I.P., Surface modification of titanium and aluminum alloys by electrolyte plasma treatment, *J. High Temperature Material Processes*, 2015, vol. 19, ISS. 1, p. 93.
3. Алифанов, А.В., Гордиенко, А.И., Ульяшин, А.Г., *Высокоэнергетическая обработка функциональных и конструкционных материалов*, Минск: Беларуская навука, 2005, 213 с.
4. Алифанов, А.В., Милюкова, А.М., Матяс, А.Н., Лях, А.А., и др., Магнитно-импульсная упрочняющая обработка материалов, *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов*. В 2 кн. Кн. 1. Новые технологии и материалы. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2021, с. 127.
5. Милюкова, А.М., Матяс, А.Н., Лях, А.А., Горчанин, А.И., и др., Исследование физико-механических свойств титанового сплава после магнитно-импульсной обработки, *Вестник БарГУ, Сер. Технические науки*, 2021, вып. 1(9), с. 18.

Summary

Using the automated analysis of the backscattered electron diffraction patterns (EBSD), the effect of a pulsed magnetic field on the microstructure and phase composition of a two-phase (α+β) Ti-6Al-4V alloy was studied. The structure parameters (a grain size, boundary misorientation angles, and a local lattice curvature based on the KAM parameter) were evaluated layer by layer up to a depth of 102 μm from the surface. It has been established that magnetic pulse treatment leads to the formation of a fragmented substructure in the surface layer and a significant increase in the geometric density of dislocations. The treatment resulted in a more than two-fold decrease in the volume fraction of the β-phase. Those results demonstrate the effectiveness of magnetic pulse treatment for surface hardening of titanium alloys and the formation of gradient structures.

Keywords: titanium alloy, magnetic pulse treatment, strengthening, dislocation density, grain boundary misorientation, grain size, strength