

Оригинальная статья

УДК 621.762.2:669.295:538.911:538.951:621.521

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-1(55)-47-58

**УПРАВЛЕНИЕ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРОЙ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ,
ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ ПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ
АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

**© 2026 г. К. С. Осипович, А. В. Чумаевский, Ю. В. Кушнарев, А. О. Панфилов,
Е. А. Колубаев**

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/4)

Аннотация. Формирование образцов на основе титанового сплава ВТ6 методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии сопряжено с образованием крупнозернистой столбчатой структуры, состоящей из первичной β -фазы. Этому сопутствует быстрое затвердевание и высокий температурный градиент. Для предотвращения образования крупных столбчатых зерен в образцах на основе сплава ВТ6 был предложен и реализован метод ультразвукового воздействия в проволочной электронно-лучевой аддитивной 3D-печати. Проведен комплексный анализ результатов получения образцов на основе титанового сплава ВТ6 для определения наиболее оптимального подхода с точки зрения бездефектности и достижения подходящей структуры. Влияние ультразвукового воздействия и погонной энергии на зеренную структуру изучали с помощью металлографических исследований. Проведена оценка размеров структурных характеристик в образцах с ультразвуковым воздействием и без него. Структура образцов на основе титанового сплава ВТ6 характеризуется двухфазным состоянием: плотноупакованной гексагональной α -фазы и объемно-центрированной кубической β -фазы. Наиболее выраженный эффект воздействия наблюдался в уменьшении ширины первичных β -зерен и снижении их среднего размера с 5,2 до 3,1 мм, в то время как длина зерен существенно не изменилась. Ключевым фактором, влияющим на зеренную структуру, является эффект акустической кавитации, возникающий в ванне расплава под ультразвуковым воздействием. По сравнению с образцами без ультразвукового воздействия предел прочности при растяжении, предел текучести и относительное удлинение в образцах на основе титанового сплава ВТ6, напечатанного при подводе к подложке ультразвукового преобразователя, увеличились на 50, 20 МПа и 4 %. Выявлено, что образцы без ультразвукового воздействия, ориентированные горизонтально относительно выращивания, показывают характеристики механических свойств выше, чем образцы с ультразвуковым воздействием, ориентированные вертикально относительно выращивания. Дальнейшее развитие изученной технологии ультразвукового воздействия может позволить настраивать микроструктуру и текстурные характеристики объемных деталей, полученных методом аддитивного производства.

Ключевые слова: проволочная электронно-лучевая аддитивная технология, ультразвуковое воздействие, погонная энергия, сплав ВТ6, зеренная структура, эпитаксиальный рост

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-20142 (<https://rscf.ru/project/25-19-20142/>) и гранта в форме субсидии, выделяемого Департаментом по научно-технологическому развитию и инновационной деятельности Томской области (соглашение № 02/5/2025).

Для цитирования: Осипович К.С., Чумаевский А.В., Кушнарев Ю.В., Панфилов А.О., Колубаев Е.А. Управление зеренной структурой титановых сплавов, получаемых методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии при использовании ультразвукового воздействия. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;1(55):47–58. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1\(55\)-47-58](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-47-58)

Original article

**GRAIN STRUCTURE CONTROL OF TITANIUM ALLOYS PRODUCED
BY WIRE-FEED ELECTRON BEAM ADDITIVE MANUFACTURING USING
ULTRASONIC INDUCTION**

© 2026 K. S. Osipovich, A. V. Chumaevskii, Yu. V. Kushnarev, A. O. Panfilov,
E. A. Kolubaev

Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
(2/4 Akademicheskoy ave., Tomsk, 634055, Russian Federation)

Abstract. The formation of samples based on Ti – 6Al – 4V titanium alloy by wire-feed electron beam additive manufacturing is associated with the formation of a coarse-grained columnar structure consisting of a primary β -phase. This is accompanied by rapid solidification and a high temperature gradient. To prevent the formation of large columnar grains in samples based on Ti – 6Al – 4V alloy, a method of ultrasonic treatment in wire-feed electron beam additive 3D printing was proposed and implemented. A comprehensive analysis of the results of obtaining samples based on Ti – 6Al – 4V titanium alloy was carried out to determine the most optimal approach in terms of defect-free performance and achieving a suitable structure. The effect of ultrasonic treatment and linear energy on the grain structure was studied using metallographic studies. The size of the structural characteristics in the samples with and without ultrasound has been evaluated. The structure of the samples based on Ti – 6Al – 4V titanium alloy is characterized by a two-phase state: a tightly packed hexagonal α -phase and a volume-centered cubic β -phase. It was noticed that large primary β -grains became narrower, and the average grain size decreased from 5.2 to 3.1 mm, the effect on grain length was insignificant. The key factor affecting the grain structure is the acoustic cavitation effect that occurs in the melt bath under ultrasonic action. Compared with samples without ultrasonic treatment, the tensile strength, yield strength and elongation in samples based on Ti – 6Al – 4V titanium alloy printed when an ultrasonic transducer was applied to the substrate increased by 50, 20 MPa and 4 %. It was revealed that samples without ultrasonic treatment, oriented horizontally relative to cultivation, show higher mechanical properties characteristics than samples with ultrasonic treatment, oriented vertically relative to cultivation. Further development of the studied ultrasonic treatment technology may make it possible to adjust the microstructure and textural characteristics of volumetric parts obtained by additive manufacturing.

Keywords: wire-feed electron beam additive manufacturing, ultrasonic treatment, linear energy, Ti – 6Al – 4V, grain structure, epitaxial growth

Funding. The work was supported by the Russian Science Foundation (Project no. 25-19-20142; <https://rscf.ru/project/25-19-20142/>) and a subsidy grant provided by the Department of Scientific, Technological Development and Innovation of Tomsk Region (Agreement no. 02/5/2025).

For citation: Osipovich K.S., Chumaevskii A.V., Kushnarev Yu.V., Panfilov A.O., Kolubaev E.A. Grain structure control of titanium alloys produced by wire-feed electron beam additive technology using ultrasonic irradiation. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;1(55):47–58. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1\(55\)-47-58](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-47-58)

Введение

Титановые сплавы высоко ценятся за свои выдающиеся механические и эксплуатационные свойства, в том числе исключительную удельную прочность, пластичность, устойчивость к коррозии и превосходную биосовместимость. Эти качества делают их незаменимыми во многих областях (аэрокосмическая промышленность, биомедицинская инженерия и судостроение) [1]. В нефтегазовой отрасли все чаще используются титановые сплавы, способные выдерживать сложные условия глубоководных и сверхглубоководных месторождений, характеризующиеся экстремальным давлением, высокими температурами и

агрессивными средами [2]. Наиболее актуальными сплавами являются двухфазные ($\alpha + \beta$), которые характеризуется определенным составом легирующих элементов: α -стабилизатор (Al) и β -стабилизатор (V). Сплав ВТ6 широко применяется в аэрокосмической промышленности, в частности, для изготовления таких конструктивных элементов как балки каркаса самолета, лопатки компрессора и турбины, элементы шасси [3]. Это обусловлено его превосходной устойчивостью к высоким температурам, исключительной стойкостью к ползучести, высокой коррозионной стойкостью и хорошими сварочными характеристиками [4]. Традиционные методы производства сплава

Ti – 6Al – 4V, включая литье, ковку и прокатку, как правило, требуют высоких температур или значительного давления, что впоследствии приводит к необходимости механической обработки для достижения желаемой геометрии детали [5]. При применении традиционных методов производства (плавка и формовка) изделий из титановых сплавов сталкиваются с принципиальными ограничениями. Высокая химическая активность металла, его низкая теплопроводность и пластичность при комнатной температуре создают неблагоприятные условия для формирования бездефектной структуры, что выражается в появлении усадочных раковин и трещин. Следовательно, получаемые в результате компоненты часто имеют пониженный модуль упругости и недостаточную жесткость, что требует дополнительной обработки, которая неизбежно приводит к значительным потерям материала и увеличению производственных затрат [6].

Преимущества аддитивных технологий вызвали значительный интерес при изготовлении деталей на основе титанового сплава Ti – 6Al – 4V [7; 8]. Аддитивные технологии (3D-печать) представляют собой метод производства, при котором используются материалы для создания объекта из слоев [8]. Однако высокая скорость нагрева и охлаждения, связанная с повышенными значениями погонной энергии, приводит к значительным температурным градиентам. Такие условия часто приводят к образованию столбчатых зерен и высоких внутренних напряжений, что существенно влияет на механические свойства деталей [9 – 12]. Преимущественный рост дендритов, повторяющий геометрию ванны расплава, также создает сильную кристаллографическую текстуру, параллельную направлению построения [13]. Эти столбчатые, ориентированные в определенном направлении зерна вызывают механическую анизотропию, которая вносит неопределенность в эксплуатационные характеристики деталей, полученных методом аддитивного производства [14]. Для решения проблемы столбчатых кристаллов в сплаве Ti – 6Al – 4V и улучшения механических свойств его компонентов было предложено множество методов улучшения микроструктуры и механических характеристик рассматриваемого материала, а также других металлов, полученных с помощью аддитивных технологий. Эти методы включают в себя модификацию стратегий печати [15; 16], применение методов постобработки [17], использование металлургических методов с добавлением зародышеобразующих веществ [18; 19], а также воздействие внешних энергетических полей [20 – 23].

Ультразвуковое воздействие во время затвердевания – это альтернативный метод модификации микроструктуры, который не требует изменения состава исходного материала. УФ-технология широко применяется при сварке [23; 24] и литье [2; 26] металлических материалов. Кроме того, за последние два десятилетия эта методология стала применяться в области аддитивных технологий [27 – 30]. Результаты показывают, что воздействие высокоинтенсивного ультразвука увеличивает скорость зарождения кристаллов и способствует образованию мелких изометрических кристаллов, что приводит к значительному улучшению механических свойств по сравнению с образцами без УФ-облучения. В некоторых исследованиях ультразвуковые волны подавали в ванну расплава через подложку [30 – 32], то есть ультразвуковые волны воздействовали непосредственно на жидкую ванну расплава. УФ-излучение играет ключевую роль в затвердевании расплава из-за эффектов ультразвуковой кавитации и акустического потока [33; 34]. Основной механизм, с помощью которого кавитация вызывает модификацию микроструктуры, заключается в росте и импловзивном схлопывании изначально небольшой полости в ванне расплава, которая испускает интенсивные ударные волны с высокими температурами и давлением [35]. Эти ударные волны могут разрушать растущие вершины дендритов и служить новыми точками зарождения для равноосного роста. Кроме того, давление может вызывать локальное переохлаждение в ванне расплава, что способствует гетерогенному зарождению. Акустическое течение, при котором профиль потока в ванне расплава изменяется из-за поглощения акустической энергии, может изменять микроструктуру за счет уменьшения локальных температурных градиентов, распределения частиц зарождения по всей ванне расплава и переплавления дендритов, которые затем отламываются и служат новыми частицами зарождения [35].

Электронно-лучевое аддитивное производство с проволоочной подачей (ЭЛАП) – одна из наиболее перспективных технологий, направленных на изготовление промышленных крупногабаритных заготовок, которые не являются сложными или хрупкими [36]. Хотя большинство методов введения ультразвуковых волн в расплавленную ванну через подложку более применимы к порошковым материалам, исследований в области аддитивного производства с использованием металлической проволоки крайне мало. Целью настоящей работы является выявление влияния ультразвукового воздействия при проволоочной

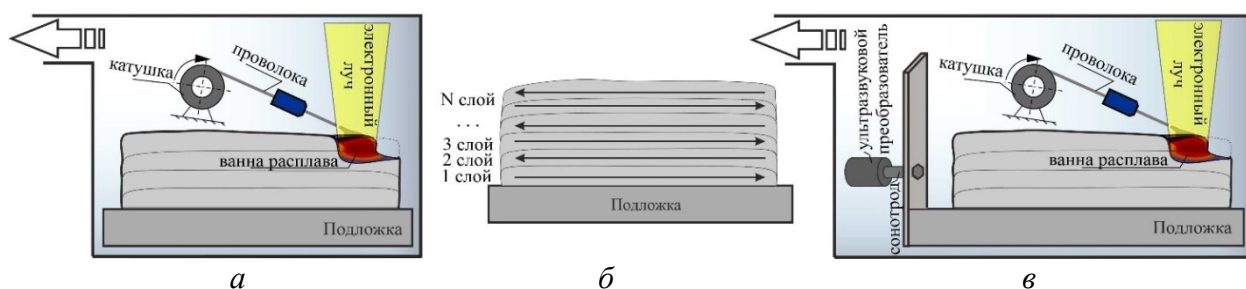


Рис. 1. Схема процесса печати методом проволоочной электронно-лучевой аддитивной технологии без ультразвукового воздействия (образцы ЭЛАП) (а), стратегия сканирования (б) и порядка подведения ультразвукового преобразователя к подложке (образцы ЭЛАП + у/з) (в)

Fig. 1. Schematic diagram of the printing process using wire-feed electron beam additive technology without ultrasonic treatment (EBAM samples) (a), scanning strategy (b) and the order of bringing the ultrasonic transducer to the substrate (EBAM+UT samples) (c)

электронно-лучевой 3D-печати титановыми сплавами на зеренную структуру.

Материалы и методы исследования

3D-печать экспериментальных образцов на основе титанового сплава ВТ6 методом проволоочной электронно-лучевой аддитивной технологии осуществляли на лабораторной экспериментальной установке Института физики прочности и материаловедения СО РАН. Процесс 3D-печати происходит с помощью электронного луча, генерируемого электронной пушкой через магнитную фокусирующую систему, которая формирует развертку в форме «спираль от центра» диаметром 4 мм на поверхности в области печати, образуя ванну расплава. Проволока диаметром 1,6 мм подается через податчик филaments, в результате на подложке формируется образец, состоящий из послойно нанесенного материала (рис. 1, а). Стратегия сканирования заключалась в прямом и обратном проходе вдоль направления нанесения материала оси OX (рис. 1, б). Точка подвода ультразвукового воздействия была локализована на подложке, в качестве которой использовали пластинку титанового сплава ВТ1-0 толщиной 2 мм (рис. 1, в).

С применением такого подхода и технологических параметров (табл. 1) были получены вертикальные стенки с ультразвуковым воздействием и без него.

Для визуализации качества выращенных титановых образцов использовали цифровую камеру Pentax K-3 с фокусным расстоянием объектива 100 мм. Образцы размером 30×30 мм для структурных исследований вырезали с помощью электроэрозионного станка DK7750 в продольном сечении относительно направления слоя (рис. 2). Перед структурными исследованиями проводили шлифовку образцов и полировку алмазной пастой с последующим травлением поверхностей образцов в растворе 12 мл HF + 2 мл HNO_3 + 6 мл HCl + 100 мл H_2O . Микроструктурный анализ выполняли на металлографическом микроскопе Альтами МЕТ-1С. Для оценки прочностных характеристик были испытаны на растяжение образцы в форме двойных лопаток с линейными размерами рабочей части $2,5 \times 2,1 \times 12,0$ мм двух типов: вертикальные и горизонтальные. Механические испытания проводили на универсальной испытательной машине УТС 110М-100 1-У со скоростью 1 мм/мин при комнатной температуре методом одноосного статического растяжения.

Т а б л и ц а 1

Технологические параметры процесса 3D-печати экспериментальных образцов на основе титанового сплава ВТ6

Table 1. Technological parameters of the 3D printing process of experimental samples based on titanium alloy Ti – 6Al – 4V

Образец	Ускоряющее напряжение, кВ	Ток печати, мА	Тип развертки	Скорость печати, мм/мин	Скорость подачи проволоки, мм/мин	Частота, кГц	Мощность, Вт	Ток, мА
ЭЛАП	30	60	спираль, диаметр 4,0 мм	300	1200	–	–	–
ЭЛАП + у/з		70		400	1400	22,6	620	9

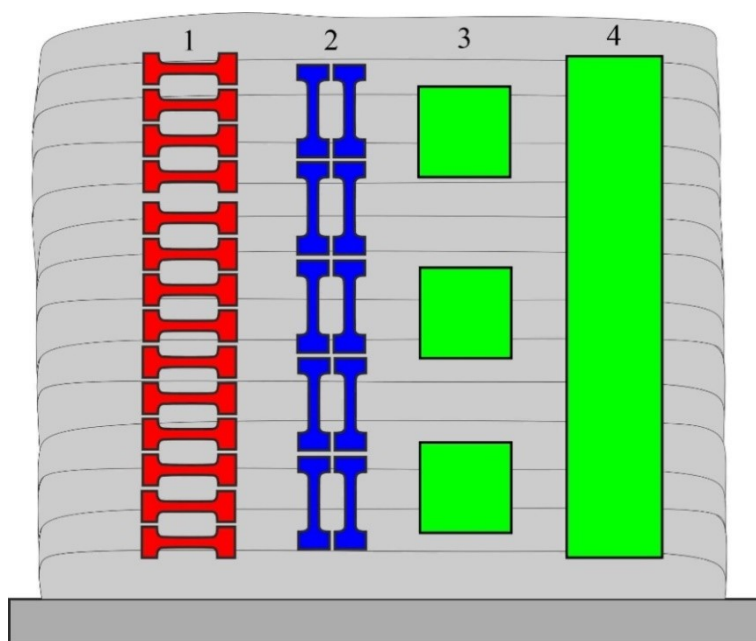


Рис. 2. Схема резки образцов из выращенной вертикальной стенки, изготовленной методом электронно-лучевой проволоочной 3D-печати:

1 и 2 – образцы для механических испытаний, ориентированные горизонтально и вертикально относительно выращивания;
3, 4 – образцы для металлографических исследований

Fig. 2. Scheme of cutting samples from a vertical wall manufactured by wire-feed electron beam 3D printing:

1 and 2 – samples for mechanical testing, oriented horizontally and vertically relative to growth;
3, 4 – samples for metallographic studies

Результаты и их обсуждение

Для титановых образцов характерно отсутствие крупных макродефектов (трещины и несплавления), кроме локальных краевых искажений поверхности. Боковая поверхность стенки при печати методом проволоочной электронно-лучевой аддитивной технологии имеет плоскую поверхность (рис. 3). Однако использование одного источника ультразвука в качестве метода обработки не приводит к полному превращению столбчатых зерен в равноосные.

Структура сильно варьируется по высоте в зависимости от количества нанесенных слоев. Структура характеризуется крупными, вытянутыми в направлении выращивания зернами, проходящими через большое количество слоев нанесенного материала. Средняя длина зерен в образцах без и с ультразвуковым воздействием составляет 5,2 и 8,5 мм. Средняя толщина зерен в образцах без и с ультразвуковым воздействием составляет 3,1 и 7,2 мм. Несмотря на то, что процесс роста

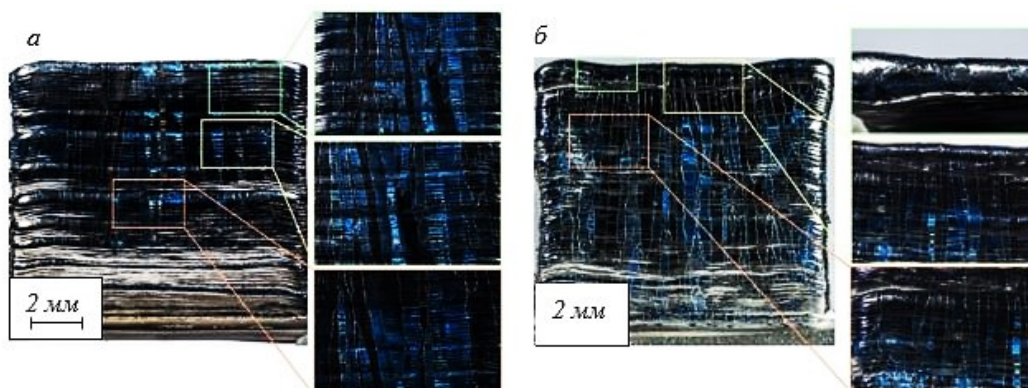


Рис. 3. Внешний вид вертикальных стенок на основе титанового сплава ВТ6, изготовленных методом проволоочной электронно-лучевой аддитивной технологии без (образцы ЭЛАП) (а) и с подводом ультразвукового преобразователя к подложке (образцы ЭЛАП + у/з) (б)

Fig. 3. External appearance of vertical walls based on Ti – 6Al – 4V titanium alloy, manufactured using wire-feed electron beam additive technology without ultrasonic treatment (EBAM samples) (a) and with the supply of an ultrasonic transducer to the substrate (EBAM + UT samples) (b)

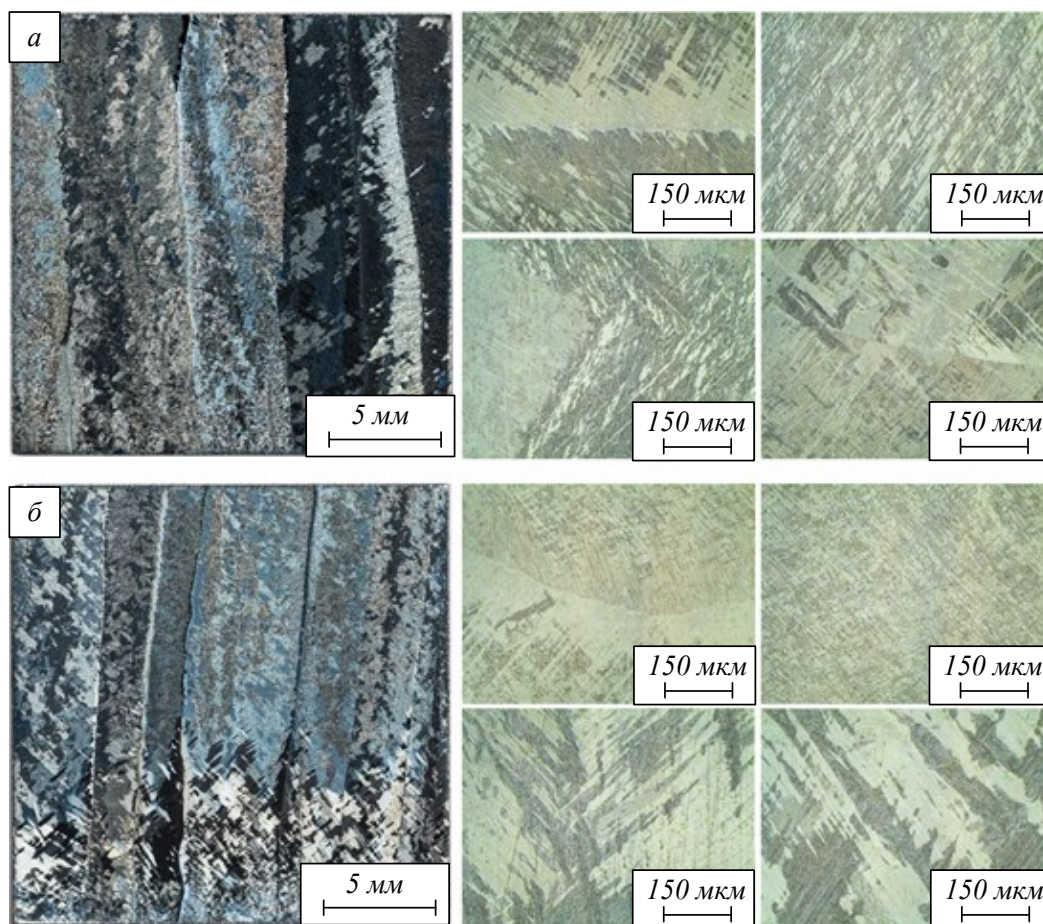


Рис. 4. Металлографические изображения образцов на основе титанового сплава ВТ6, изготовленных методом проволоочной электронно-лучевой аддитивной технологии без (образцы ЭЛАП) (а) и с подводом ультразвукового преобразователя к подложке (образцы ЭЛАП + у/з) (б)

Fig. 4. Metallographic images of samples based on Ti – 6Al – 4V titanium alloy, manufactured by wire-feed electron beam additive technology without ultrasonic treatment (EBAM samples) (a) and with the ultrasonic transducer applied to the substrate (EBAM + UT samples) (b)

вертикальной стенки происходил непрерывно, однородного роста крупных зерен по всей высоте не наблюдали. При нанесении первых слоев титана на подложку формируются равноосные зерна за счет миграции большеугловых границ. Во время вторичной рекристаллизации растут благоприятно ориентированные зерна, за счет этого в материале формируется кристаллографическая текстура. После завершения вторичной рекристаллизации образуются аномально крупные вытянутые зерна. Скорость фронта кристаллизации и температурный градиент являются наиболее важными параметрами, влияющими на структуру затвердевания (рис. 3, а). При изготовлении экспериментальных образцов на основе титанового сплава ВТ6 с ультразвуковым воздействием наблюдается отличительная особенность при формировании последнего слоя вертикальной стенки (рис. 3, б).

Внутри исходных зерен β -фазы находятся пластины α -фазы (рис. 4). Последняя представлена для обоих образцов мартенситом корзиночного переплетения. Образование такого типа

структуры связано с зарождением кристаллитов одновременно из нескольких мест при высокой скорости охлаждения. В дальнейшем зародившиеся кристаллиты пластин α -фазы встречаются, образуя тонкую сетку мартенситных пластин. Кроме этого, вблизи границы зерен β -фазы пластины α -фазы растут параллельно друг другу, создавая колонии.

Преобладание вытянутых зерен может приводить к анизотропии механических свойств титановых образцов. Среднее значение относительного удлинения $\Delta\epsilon$ горизонтальных и вертикальных образцов без ультразвукового воздействия составляет 8 ± 2 и 11 ± 2 % (рис. 5). Предел прочности образцов $\Delta\sigma_B$ без ультразвукового воздействия сохраняется в пределах 784 – 815 МПа, предел текучести $\Delta\sigma_{0.2}$ составляет 653 ± 7 и 638 ± 7 МПа.

В соответствии с законом Холла-Петча, высокие значения прочности соответствуют более мелким размерам зерен для образцов с подведением ультразвукового преобразователя к подложке во время изготовления. При деформации

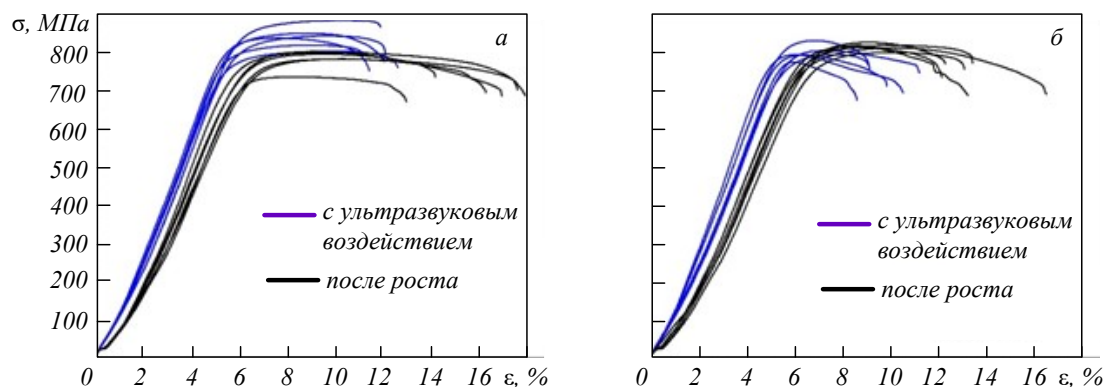


Рис. 5. Кривые напряжение – деформация экспериментальных образцов титанового сплава ВТ6, изготовленных методом проволоочной электронно-лучевой аддитивной технологии:
 а – вертикальное направление относительно выращивания; б – горизонтальное направление относительно выращивания
 Fig. 5. Stress-strain curves of experimental samples of Ti – 6Al – 4V titanium alloy manufactured by wire-feed electron beam additive technology:
 а – vertical direction relative to growth; б – horizontal direction relative to growth

образца в направлении печати барьерный эффект, предположительно, незначителен при сближении дислокаций, тогда как при деформации в направлении роста он оказывает существенное влияние на процессы деформации и разрушения в вертикальных столбчатых зернах. Относительное удлинение горизонтальных и вертикальных образцов с ультразвуковым воздействием составляет 5 ± 2 и 7 ± 2 %. Ультразвуковое воздействие снижает пластичность, вероятно, за счет изменения плотности границ раздела вблизи исходных β -фаз. Предел прочности образцов $\Delta\sigma_B$ с ультразвуковым воздействием сохраняется в пределах 799 – 840 МПа, предел текучести $\Delta\sigma_{0,2}$ составляет 689 – 703 МПа (табл. 2).

Выводы

Применение ультразвукового воздействия в процессе проволоочной электронно-лучевой адди-

тивной технологии титанового сплава ВТ6 позволяет влиять на формирование зеренной структуры. Реализованный метод способствует измельчению первичных β -зерен, их средний размер сократился с 5,2 до 3,1 мкм, при этом ширина зерен уменьшилась заметно, тогда как длина осталась практически неизменной. Ключевым механизмом, обеспечивающим рассматриваемый эффект, является акустическая кавитация в ванне расплава, инициируемая ультразвуковыми колебаниями, что способствует гомогенному зарождению и подавлению направленного столбчатого роста зерен. Вместе с тем, выявлено анизотропное поведение механических характеристик, зависящее от ориентации образцов относительно направления выращивания: горизонтальные образцы продемонстрировали более высокие свойства, чем вертикальные, что указывает на важность учета геометрии и положения детали при проектировании технологического процесса.

Т а б л и ц а 2

Средние значения механических свойств изготовленных титановых образцов

Table 2. Average values of mechanical properties of manufactured titanium samples

Образец	Направление образца относительно выращивания	$\Delta\sigma_{0,2}$, МПа	$\Delta\sigma_B$, МПа	$\Delta\varepsilon$, %
ЭЛАП	горизонтальные	653 ± 7	815 ± 7	8 ± 2
	вертикальные	638 ± 7	784 ± 7	11 ± 2
ЭЛАП + у/з	горизонтальные	689 ± 7	799 ± 7	5 ± 2
	вертикальные	703 ± 7	840 ± 7	7 ± 2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kotlyarov V.I., Yuzhakova E.A., Beshkarev V.T., Ivanov V.V., Kozlov R.Y. Set of measures for improving the quality of powders based on titanium for additive technology. *Metallurgist*. 2017;61:72–77. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0456-2>
- Tayon W.A., Domack M.S., Hoffman E.K., Hales S.J. Texture Evolution within the Thermo-mechanically Affected Zone of an Al – Li Alloy 2195 Friction Stir Weld. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2013;44:4906–4913. <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1802-z>
- Zhang L., Chen J., Wang Q., Liu Z., Zhang D., Sun J. Microstructure and mechanical properties of Ti – 6Al – 4V alloy fabricated by electron beam freeform fabrication with ultrasonic assistance. *Materials Chemistry and Physics*. 2023;306:127924. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.06.030>
- Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Москва: ВИЛС-МАТИ. 2009:520.
- Wu B., Chao Z., Shao D., Li P., Knott J., Pan Z., Li H. Enhanced corrosion performance in Ti – 6Al – 4V alloy produced via wire-arc directed energy deposition with magnetic arc oscillation. *Additive Manufacturing*. 2023;66:103465. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103465>
- Yuan T., Kou S., Luo Z. Grain refining by ultrasonic stirring of the weld pool. *Acta Materialia*. 2016;106:144–154. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.01.016>
- Okunkova A.A., Shekhtman S.R., Metel A.S., Suhova N.A., Fedorov S.V., Volosova M.A., Grigoriev S.N. On defect minimization caused by oxide phase formation in laser powder bed fusion. *Metals*. 2022;5:760. <https://doi.org/10.3390/met12050760>
- Kazantseva N., Krakhmalev P., Thuvander M., Yadroitsev I., Vinogradova N., Ezhov I. Martensitic Transformations in Ti – 6Al – 4V (ELI) Alloy Manufactured by 3D Printing. *Materials Characterization*. 2018;146:101–112. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.09.042>
- Gu D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*. 2012;57(3):133–164. <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014>
- Abele E., Schraml M., Schiller P., Pfefferkorn F. Deposition of Ti – 6Al – 4V using laser and wire, part I: Microstructural properties of single beads. *Surface and Coatings Technology*. 2011;206(6):1133–1141. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.07.095>
- Dehoff R.R., Kirka M.M., Sames W.J., Bilheux H., Tremsin A.S., Lowe L.E., Babu S.S. Site specific control of crystallographic grain orientation through electron beam additive manufacturing. *Acta Materialia*. 2015;91:144–156. <https://doi.org/10.1179/1743284714Y.00000000734>
- Yang J., Yu H., Yin J., Gao M., Wang Z., Zeng X. Formation and control of martensite in Ti – 6Al – 4V alloy produced by selective laser melting. *Materials & Design*. 2016;108:308–318. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.117>
- Ding L., Sun Z., Liang X., Li J., Xu G., Zhishuai C. Investigation on Ti – 6Al – 4V Microstructure Evolution in Selective Laser Melting. *Metals*. 2019;9:1270. <https://doi.org/10.3390/met9121270>
- Zhang Y., Wang X.-K., Jia Y.-F., Dong B., Wang Z.-M., Yan J.-J., Zhang X.-C., Tu S.-T. Fatigue Life Prediction and Feature Contribution Analysis of Surface-Strengthened Ti – 6Al – 4V Using a Preprocessing Neural Network. *International Journal of Fatigue*. 2025;56:4991–5005. <https://doi.org/10.1007/s11661-025-07952-9>
- Panin A., Martynov S., Kazachenok M., Kazantseva L., Bakulin A., Kulkova S., Perevalova O., Sklyarova E. Effects of water cooling on the microstructure of electron beam additive-manufactured Ti – 6Al – 4V. *Metals*. 2021;11:111742. <https://doi.org/10.3390/met11111742>
- Biswas S., Alavi S.H., Sedai B., Blum F.D., Harimkar S.P. Effect of ultrasonic vibration-assisted laser surface melting and texturing of Ti – 6Al – 4V ELI alloy on surface properties. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35:295–302. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.057>
- Суминов И.В., Хилфи Диаа Х.Ч. Аддитивные технологии в современной промышленности: применение и перспективы на примере титановых сплавов. *Кузнечно-штамповочное производство. обработка материалов давлением*. 2024;3:36–43.
- Kandi R., Sahoo S.K., Sahoo A.K. Ultrasonic vibration-assisted turning of Titanium alloy Ti – 6Al – 4V: numerical and experimental investigations. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020;42:399. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02481-5>
- Zykova A.P., Nikolaeva A.V., Vorontsov A.V., Chumakovskii A.V., Nikonov S.Y., Moskvichev E.N., Gurianov D.A., Savchenko N.L., Kolubaev E.A., Tarasov S.Y. Effect of Copper Content on Grain Structure Evolution in Additively Manufactured Ti – 6Al – 4V Alloy. *Physical Mesomechanics*. 2023;26:107–125. <https://doi.org/10.1134/S1029959923020017>

20. Wang Y., Shi Y., Yang K., Wang H. Microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured Ti – 6Al – 4V with interlayer rolling. *Journal of Materials Science & Technology*. 2020;51:47–56. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3299-1>
21. Panin A.V., Kazachenok M.S., Dmitriev A.I., Nikonov A.Yu., Perevalova O.B., Kazantseva L.A., Sinyakova E.A., Martynov S.A. The effect of ultrasonic impact treatment on deformation and fracture of electron beam additive manufactured Ti – 6Al – 4V under uniaxial tension. *Materials Science and Engineering: A*. 2022;832:142458. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142458>
22. Popov Jr.V., Katz-Demyanetz A., Kovalevsky A., Biletskiy R., Strokin E., Garkun A., Effect of the hatching strategies on mechanical properties and microstructure of sebm manufactured Ti – 6Al – 4V specimens. *Letters on materials*. 2018;8:468–472. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2018-4-468-472>
23. Kartavykh A.V., Asnis E.A., Piskun N.V., Statkevich I.I., Gorshenkov M.V., Tcherdyntsev V.V. anthanum Hexaboride as Advanced Structural Refiner/Getter in TiAl-Based Refractory Intermetallics. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014;588:122–126. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.11.017>
24. Biswas S., Alavi S.H., Sedai B., Blum F.D., Harimkar S.P. Ultrasonic vibration assisted laser metal deposition of Ti – 6Al – 4V: heat transfer and microstructure formation. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35:295–302. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.057>
25. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H., van Duin S., Larkin N. Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2016;39:32–42. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.12.004>
26. Wang F., Williams S., Colegrove P., Antonysamy A.A. Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti – 6Al – 4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2013;44:968–977. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1444-6>
27. Kabir S., Ansary S.R., Kaushik H.C., Zhao B., Kono D., Cong W. Ultrasonic vibration-assisted laser directed energy deposition: effects on material movement in vertical and horizontal direction. *Progress in Additive Manufacturing*. 2026. <https://doi.org/10.1007/s40964-025-01487-6>
28. Gu D., Wang H., Dai D., Chang F., Meiners W., Hagedorn Y.-C., Wissenbach K., Kelbassa I., Poprawe R. Densification behavior, microstructure evolution, and wear property of TiC nanoparticle reinforced AlSi10Mg bulk-form nanocomposites prepared by selective laser melting. *Journal of Laser Applications*. 2015;27:17003. <https://doi.org/10.2351/1.4870877>
29. Peng F.C., Guo C., Fengchun J., Yuan D., Yin H., Sun Q., Zhang H., Dong T., Guo D., Konovalov S. Microstructure evolution and mechanical properties of wire-arc additively manufactured Ti – 6Al – 4V under different heat inputs. *Materials Science and Engineering: A*. 2025;925:147934. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.147934>
30. Deschamps A., Marioara C.D., Clouet E., Marquis E.A., Dorin B., Hutchinson C.R. Precipitation kinetics in metallic alloys: Experiments and modelling. *Progress in Materials Science*. 2021;122:100820. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100820>
31. Mohammadhosseini A., Fraser D., Masood S.H., Jahedi M. Microstructure and mechanical properties of Ti – 6Al – 4V manufactured by electron beam melting process. *Materials Research Innovations*. 2019;17:106–112. <https://doi.org/10.1179/1432891713Z.000000000302>
32. Chen C., Fan C., Cai X., Lin S., Yang C. Ultrasonic irradiation induced the microstructure refinement and texture evolution of Ti – 6Al – 4V TIG weld seam. *Science and technology of welding and joining*. 2018. <https://doi.org/10.1080/13621718.2019.1604476>
33. Gu D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*. 2012;57:133–164. <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014>
34. Gu D., Hagedorn Y.-C., Meiners W., Meng G., Batista A.C., Wissenbach K., Poprawe R. Nanocrystalline TiC reinforced Ti matrix bulk-form nanocomposites by Selective Laser Melting (SLM): Densification, growth mechanism and wear behavior. *Composites Science and Technology*. 2011;71:1612–1620. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.07.010>
35. Yuan D., Shao S., Guo C., Jiang F., Wang J. Grain refining of Ti – 6Al – 4V alloy fabricated by laser and wire additive manufacturing assisted with ultrasonic vibration. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;73:105472. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105472>
36. Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Chumaevsky A.V., Astafurova E.G. Micro-, meso- and macrostructural design of bulk metallic and polymetallic materials by wire-feed electron-beam additive manufacturing. *Physical mesomechanics*. 2022;25:479–491. <https://doi.org/10.1134/S1029959922060017>

REFERENCES

1. Kotlyarov V.I., Yuzhakova E.A., Beshkarev V.T., Ivanov V.V., Kozlov R.Y. Set of measures for improving the quality of powders based on titanium

- for additive technology. *Metallurgist*. 2017;61:72–77. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0456-2>
2. Tayon W.A., Domack M.S., Hoffman E.K., Hales S.J. Texture Evolution within the Thermo-mechanically Affected Zone of an Al – Li Alloy 2195 Friction Stir Weld. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2013;44:4906–4913. <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1802-z>
 3. Zhang L., Chen J., Wang Q., Liu Z., Zhang D., Sun J. Microstructure and mechanical properties of Ti – 6Al – 4V alloy fabricated by electron beam freeform fabrication with ultrasonic assistance. *Materials Chemistry and Physics*. 2023;306:127924. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.06.030>
 4. Il'in A.A., Kolachev B.A., Pol'kin I.S. *Titanium alloys. Composition, structure, properties*. Moscow: VILS-MATI. 2009:520. (In Russ.).
 5. Wu B., Chao Z., Shao D., Li P., Knott J., Pan Z., Li H. Enhanced corrosion performance in Ti – 6Al – 4V alloy produced via wire-arc directed energy deposition with magnetic arc oscillation. *Additive Manufacturing*. 2023;66:103465. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103465>
 6. Yuan T., Kou S., Luo Z. Grain refining by ultrasonic stirring of the weld pool. *Acta Materialia*. 2016;106:144–154. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.01.016>
 7. Okunkova A.A., Shekhtman S.R., Metel A.S., Suhova N.A., Fedorov S.V., Volosova M.A., Grigoriev S.N. On defect minimization caused by oxide phase formation in laser powder bed fusion. *Metals*. 2022;5:760. <https://doi.org/10.3390/met12050760>
 8. Kazantseva N., Krakhmalev P., Thuvander M., Yadroitsev I., Vinogradova N., Ezhov I. Martensitic Transformations in Ti – 6Al – 4V (ELI) Alloy Manufactured by 3D Printing. *Materials Characterization*. 2018;146:101–112. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.09.042>
 9. Gu D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*. 2012;57(3):133–164. <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014>
 10. Abele E., Schraml M., Schiller P., Pfefferkorn F. Deposition of Ti – 6Al – 4V using laser and wire, part I: Microstructural properties of single beads. *Surface and Coatings Technology*. 2011;206(6):1133–1141. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.07.095>
 11. Dehoff R.R., Kirka M.M., Sames W.J., Bilheux H., Tremsin A.S., Lowe L.E., Babu S.S. Site specific control of crystallographic grain orientation through electron beam additive manufacturing. *Acta Materialia*. 2015;91:144–156. <https://doi.org/10.1179/1743284714Y.00000000734>
 12. Yang J., Yu H., Yin J., Gao M., Wang Z., Zeng X. Formation and control of martensite in Ti – 6Al – 4V alloy produced by selective laser melting. *Materials & Design*. 2016;108:308–318. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.117>
 13. Ding L., Sun Z., Liang X., Li J., Xu G., Zhishuai C. Investigation on Ti – 6Al – 4V Microstructure Evolution in Selective Laser Melting. *Metals*. 2019;9:1270. <https://doi.org/10.3390/met9121270>
 14. Zhang Y., Wang X.-K., Jia Y.-F., Dong B., Wang Z.-M., Yan J.-J., Zhang X.-C., Tu S.-T. Fatigue Life Prediction and Feature Contribution Analysis of Surface-Strengthened Ti – 6Al – 4V Using a Preprocessing Neural Network. *International Journal of Fatigue*. 2025;56:4991–5005. <https://doi.org/10.1007/s11661-025-07952-9>
 15. Panin A., Martynov S., Kazachenok M., Kazantseva L., Bakulin A., Kulkova S., Perevalova O., Sklyarova E. Effects of water cooling on the microstructure of electron beam additive-manufactured Ti – 6Al – 4V. *Metals*. 2021;11:111742. <https://doi.org/10.3390/met11111742>
 16. Biswas S., Alavi S.H., Sedai B., Blum F.D., Harimkar S.P. Effect of ultrasonic vibration-assisted laser surface melting and texturing of Ti – 6Al – 4V ELI alloy on surface properties. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35:295–302. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.057>
 17. Suminov I.V., Khilfi Daa Kh.Ch. Additive technologies in modern industry: application and prospects on the example of titanium alloys. *Kuznechno-shtampovoechnoe proizvodstvo. obrabotka materialov davleniem*. 2024;3:36–43. (In Russ.).
 18. Kandi R., Sahoo S.K., Sahoo A.K. Ultrasonic vibration-assisted turning of Titanium alloy Ti – 6Al – 4V: numerical and experimental investigations. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020;42:399. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02481-5>
 19. Zykova A.P., Nikolaeva A.V., Vorontsov A.V., Chumaevskii A.V., Nikonov S.Y., Moskvichev E.N., Gurianov D.A., Savchenko N.L., Kolubaev E.A., Tarasov S.Y. Effect of Copper Content on Grain Structure Evolution in Additively Manufactured Ti – 6Al – 4V Alloy. *Physical Mesomechanics*. 2023;26:107–125. <https://doi.org/10.1134/S1029959923020017>
 20. Wang Y., Shi Y., Yang K., Wang H. Microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured Ti – 6Al – 4V with interlayer rolling. *Journal of Materials Science & Technology*. 2020;51:47–56. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3299-1>

21. Panin A.V., Kazachenok M.S., Dmitriev A.I., Nikonov A.Yu., Perevalova O.B., Kazantseva L.A., Sinyakova E.A., Martynov S.A. The effect of ultrasonic impact treatment on deformation and fracture of electron beam additive manufactured Ti – 6Al – 4V under uniaxial tension. *Materials Science and Engineering: A*. 2022;832:142458. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142458>
22. Popov Jr.V., Katz-Demyanetz A., Kovalevsky A., Biletskiy R., Strokin E., Garkun A. Effect of the hatching strategies on mechanical properties and microstructure of sebm manufactured Ti – 6Al – 4V specimens. *Letters on materials*. 2018;8:468–472. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2018-4-468-472>
23. Kartavykh A.V., Asnis E.A., Piskun N.V., Statkevich I.I., Gorshenkov M.V., Tcherdyntsev V.V. anthanum Hexaboride as Advanced Structural Refiner/Getter in TiAl-Based Refractory Intermetallics. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014;588:122–126. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.11.017>
24. Biswas S., Alavi S.H., Sedai B., Blum F.D., Harimkar S.P. Ultrasonic vibration assisted laser metal deposition of Ti – 6Al – 4V: heat transfer and microstructure formation. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35:295–302. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.057>
25. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H., van Duin S., Larkin N. Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2016;39:32–42. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.12.004>
26. Wang F., Williams S., Colegrove P., Antonysamy A.A. Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti – 6Al – 4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2013;44:968–977. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1444-6>
27. Kabir S., Ansary S.R., Kaushik H.C., Zhao B., Kono D., Cong W. Ultrasonic vibration-assisted laser directed energy deposition: effects on material movement in vertical and horizontal direction. *Progress in Additive Manufacturing*. 2026. <https://doi.org/10.1007/s40964-025-01487-6>
28. Gu D., Wang H., Dai D., Chang F., Meiners W., Hagedorn Y.-C., Wissenbach K., Kelbassa I., Poprawe R. Densification behavior, microstructure evolution, and wear property of TiC nanoparticle reinforced AlSi10Mg bulk-form nanocomposites prepared by selective laser melting. *Journal of Laser Applications*. 2015;27:17003. <https://doi.org/10.2351/1.4870877>
29. Peng F.C., Guo C., Fengchun J., Yuan D., Yin H., Sun Q., Zhang H., Dong T., Guo D., Konovalov S. Microstructure evolution and mechanical properties of wire-arc additively manufactured Ti – 6Al – 4V under different heat inputs. *Materials Science and Engineering: A*. 2025;925:147934. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.147934>
30. Deschamps A., Marioara C.D., Clouet E., Marquis E.A., Dorin B., Hutchinson C.R. Precipitation kinetics in metallic alloys: Experiments and modelling. *Progress in Materials Science*. 2021;122:100820. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100820>
31. Mohammadhosseini A., Fraser D., Masood S.H., Jahedi M. Microstructure and mechanical properties of Ti – 6Al – 4V manufactured by electron beam melting process. *Materials Research Innovations*. 2019;17:106–112. <https://doi.org/10.1179/1432891713Z.000000000302>
32. Chen C., Fan C., Cai X., Lin S., Yang C. Ultrasonic irradiation induced the microstructure refinement and texture evolution of Ti – 6Al – 4V TIG weld seam. *Science and technology of welding and joining*. 2018. <https://doi.org/10.1080/13621718.2019.1604476>
33. Gu D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*. 2012;57:133–164. <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014>
34. Gu D., Hagedorn Y.-C., Meiners W., Meng G., Batista A.C., Wissenbach K., Poprawe R. Nanocrystalline TiC reinforced Ti matrix bulk-form nanocomposites by Selective Laser Melting (SLM): Densification, growth mechanism and wear behavior. *Composites Science and Technology*. 2011;71:1612–1620. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.07.010>
35. Yuan D., Shao S., Guo C., Jiang F., Wang J. Grain refining of Ti – 6Al – 4V alloy fabricated by laser and wire additive manufacturing assisted with ultrasonic vibration. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;73:105472. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105472>
36. Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Chumaevsky A.V., Astafurova E.G. Micro-, meso- and macrostructural design of bulk metallic and polycrystalline materials by wire-feed electron-beam additive manufacturing. *Physical mesomechanics*. 2022;25:479–491. <https://doi.org/10.1134/S1029959922060017>

Сведения об авторах:

Ксения Сергеевна Осипович, научный сотрудник лаборатории локальной металлургии аддитивных технологий, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: osipovich_k@ispms.ru

ORCID: 0000-0001-9534-775X

SPIN-код: 8071-6575

Андрей Валерьевич Чумаевский, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории локальной металлургии в аддитивных технологиях, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: tch7av@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1983-4385

Юрий Владимирович Кушнарёв, инженер лаборатории локальной металлургии аддитивных технологий, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: yury.kushnaryov@mail.ru
ORCID: 0009-0002-5708-6098
SPIN-код: 5631-0218

Александр Олегович Панфилов, младший научный сотрудник лаборатории структурного дизайна перспективных материалов, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: alexpl@ispms.ru
ORCID: 0000-0001-8648-0743
SPIN-код: 7100-8529

Евгений Александрович Колубаев, д.т.н., заведующий лабораторией локальной металлургии в аддитивных технологиях, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: eak@ispms.tsc.ru
ORCID: 0000-0001-7288-3656
SPIN-код: 6575-1950

Information about the authors:

Kseniya Sergeevna Osipovich, research fellow at the Laboratory of Local Metallurgy of Additive Technologies, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: osipovich_k@ispms.ru
ORCID: 0000-0001-9534-775X
SPIN-код: 8071-6575

Andrei Valer'evich Chumaevskii, Doctor of Engineering Sciences, Leading Researcher at the Laboratory of Local

Metallurgy in Additive Technologies, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: tch7av@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1983-4385

Yurii Vladimirovich Kushnarev, Engineer of the Laboratory of Local Metallurgy of Additive Technologies, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: yury.kushnaryov@mail.ru
ORCID: 0009-0002-5708-6098
SPIN-код: 5631-0218

Aleksandr Olegovich Panfilov, Junior Researcher at the Laboratory of Structural Design of Advanced Materials, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: alexpl@ispms.ru
ORCID: 0000-0001-8648-0743
SPIN-код: 7100-8529

Evgenii Aleksandrovich Kolubaev, Doctor of Engineering Sciences, Head of the Laboratory of Local Metallurgy in Additive Technologies, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: eak@ispms.tsc.ru
ORCID: 0000-0001-7288-3656
SPIN-код: 6575-1950

*Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 11.12.2025
После доработки 28.01.2026
Принята к публикации 05.02.2026

Received 11.12.2025
Revised 28.01.2026
Accepted 05.02.2026