

Оригинальная статья

УДК 538.91

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-27-36

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ИОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА, СФОРМИРОВАВШЕГОСЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЕЧАТИ ПРОВОЛОКОЙ ВТ6св

© 2025 г. Ц. Хань¹, Ч. Ли², В. А. Тарбоков¹, Ю. Ф. Иванов³, К. В. Иванов⁴, В. А. Клименов¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 650000, Томск, пр. Ленина, 30)

²Шэньянский политехнический университет (КНР, 110180, провинция Ляонин, г. Шэньян, пр. Наньпинчжон, 6)

³Институт сильноточной электроники СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3)

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

Аннотация. Проведено исследование микроструктуры и свойств титанового сплава, сформировавшегося при электронно-лучевой печати проволокой ВТ6св, после обработки импульсным ионным пучком. Образцы были получены на лабораторной установке электронно-лучевого аддитивного производства, разработанной в ИФПМ СО РАН. Процесс формирования образцов осуществляли путем сплавления титановой сварочной проволоки марки ВТ6св диаметром 1,6 мм в условиях вакуума при давлении 10^{-3} – 10^{-2} Па. Энергетическое воздействие с применением импульсной ионной обработки осуществляли на ускорителе ТЭМП-4М при ускоряющем напряжении 200 кВ, длительности импульса на половине максимума 100 нс и плотности энергии 2 Дж/см². Методами просвечивающей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии и измерениями микротвердости установлено, что воздействие импульсного ионного пучка приводит к существенным изменениям в микроструктуре поверхности: наблюдается трансформация β -фазы в α -фазу, а также образование наночастиц интерметаллического соединения Al_3V . Толщина модифицированного слоя составляет около 5,5 мкм. Выявлено незначительное увеличение микротвердости (с 254,39 до 261,37 НВ) при этом достигается более равномерное распределение значений твердости. Ионно-пучковая обработка может способствовать улучшению биосовместимости титановых имплантатов за счет устранения острых краев, возникающих в процессе механической обработки и снижения шероховатости. В сравнении с традиционными методами термического воздействия ионная обработка демонстрирует высокую степень управляемости и адаптивности, что делает ее перспективной для применения в медико-биологических системах. Полученные результаты открывают новые возможности функционализации поверхности титановых сплавов и обладают высоким прикладным потенциалом.

Ключевые слова: титановый сплав, сварочная проволока, электронно-лучевая печать, импульсный пучок, ионная обработка, структурные превращения, фазовые превращения, просвечивающая микроскопия

Благодарности. Авторы выражают благодарность профессору ИФПМ СО РАН А.В. Чумаевскому за участие в обсуждении полученных результатов. В работе для исследований было использовано оборудование ЦКП НОИЦ НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ПИШ НИР-2024-016. Исследование методом ПЭМ проведено в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема FWRW-2021-0003.

Для цитирования: Хань Ц., Ли Ч., Тарбоков В.А., Иванов Ю.Ф., Иванов К.В., Клименов В.А. Влияние импульсной ионно-пучковой обработки на структуру и свойства сплава, сформировавшегося при электронно-лучевой печати проволокой ВТ6св. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):27–36. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-27-36](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-27-36)

Original article

INFLUENCE OF PULSED ION-BEAM TREATMENT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE ALLOY FORMED BY ELECTRON-BEAM PRINTING WITH VT6SV WIRE

© 2025 Z. Han¹, Zh. Li², V. A. Tarbokov¹, Yu. F. Ivanov³, K.V. Ivanov⁴, V. A. Klimenov¹

¹National Research Tomsk Polytechnic University (30 Lenin Avenue, Tomsk, 650000, Russian Federation)

²Shenyang University of Technology (6 Nanpingzhong Avenue, province Lyaonin, Shenyang, 110180, PRC)

³Institute of High Current Electronics SB RAS (2/3 Academic Avenue, Tomsk, 650000, Russian Federation)

⁴Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS (2/4 Academic Avenue, Tomsk, 650000, Russian Federation)

Abstract. A study of the microstructure and properties of a titanium alloy formed during electron beam printing with VT6cw wire after treatment with a pulsed ion beam has been carried out. The samples were obtained at a laboratory facility for electron beam additive manufacturing developed at IFPM SB RAS. The process of forming the samples was carried out by fusing titanium welding wire of the VT6sv brand with a diameter of 1.6 mm under vacuum conditions at a pressure of $10^{-3} - 10^{-2}$ Pa. The energy effect using pulsed ion treatment was carried out on a TEMP-4M accelerator at an accelerating voltage of 200 kV, a pulse duration at half the maximum of 100 ns and an energy density of 2 J/cm². Transmission electron microscopy, atomic force microscopy, and microhardness measurements have shown that exposure to a pulsed ion beam leads to significant changes in the microstructure of the surface: the transformation of the β -phase into the α -phase is observed, as well as the formation of nanoparticles of the Al₃ v intermetallic compound. The thickness of the modified layer is about 5.5 microns. A slight increase in microhardness was revealed (from 254.39 to 261.37 HV), while a more uniform distribution of hardness values was achieved. Ion beam treatment can help improve the biocompatibility of titanium implants by eliminating sharp edges that occur during machining and reducing roughness. In comparison with traditional methods of thermal treatment, ion treatment demonstrates a high degree of controllability and adaptability, which makes it promising for use in biomedical systems. The results obtained open up new possibilities for the functionalization of the surface of titanium alloys and have high application potential.

Keywords: titanium alloy, welding wire, electron beam printing, pulsed beam, ion treatment, structural transformations, phase transformations, transmission electron microscopy

Acknowledgements. The author expresses his gratitude to Professor A.V. Chumaevskii, IFM SB RAS, for participating in the discussion of the results obtained. In the research work, the equipment of the Central Research Institute of NMNT TPU, used by the project of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 075-15-2021-710, was used.

Financing. The study was carried out with the financial support of the PISH NIR-2024-016 project. The SEM study was conducted within the framework of the state assignment of the IFPM SB RAS, topic FW RW-2021-0003.

For citation: Han Z., Li Zh., Tarbokov V.A., Ivanov Yu.F., Ivanov K.V., Klimenov V.A. Influence of pulsed ion beam treatment on the structure and properties of the alloy formed during electron beam printing with VT6SV wire. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):27–36. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-27-36](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-27-36)

Введение

Хорошо известно, что в процессе аддитивной технологии сплавы приобретают специфические структуру и свойства, отличающиеся от полученных традиционными методами [1; 2]. Связано это с тем, что при печати металлами их плавление происходит при взаимодействии с высокоэнергетическими концентрированными

потоками энергии (плазма, электрическая дуга, лазерный и электронный лучи). Поэтому в образующихся ваннах расплавов развиваются только неравновесные термические и гидродинамические процессы, в ходе которых при последующей кристаллизации формируются гибридные структуры и различные первичные и вторичные фазы.

Химический состав, %, сварочной проволоки VT6sv по ГОСТ 27265 – 87**Table 1. Chemical composition, %, of welding wire VT6sv according to GOST 27265 – 87**

Ti	Al	V	Si	Fe	O	H	N	C	Другие
Основа	3,5 – 4,5	2,5 – 3,5	0,10	0,15	0,12	0,003	0,04	0,50	0,30

Структура сплава при застывании ванны расплава зависит от физико-химических свойств материалов, механизмов кристаллизации (на поверхностях, в объеме или частицах), скорости охлаждения и возможных полиморфных превращений [3]. Наличие в процессе печати перемещения источника энергии от подложки в направлении построения объекта и послойного сканирования обуславливает формирование направленного теплоотвода и многократного нагрева формирующихся слоев, что сказывается на размерах зерен, ориентации кристаллов и образовании столбчатых структур в направлении наибольшего теплоотвода. В результате формируются специфические текстуры [4], структурные неоднородности, которые влияют на получение анизотропии свойств [5 – 8]. Определенный вклад в формирование специфической структуры и фазового состава вносит последовательное ступенчатое и сканирующее тепловое воздействие в результате выращивания объекта печати.

При электронно-лучевой печати проволокой, которая среди методов аддитивного производства характеризуется как высокопроизводительный метод, прочностные свойства сформированных при печати титановых сплавов существенно уступали сплавам, полученным по традиционным технологиям [9; 10]. Разработки различных решений по применению дополнительных упрочняющих обработок [9; 11 – 13] позволяли повысить прочностные характеристики, но при этом за счет снижения пластичности, что требовало поиска наиболее оптимальных подходов. Применение дополнительных обработок сказывалось на трудоемкости процессов печати, а значит на их экономической эффективности. Изучение сформированных при печати сплавов, их свойств и особенностей поведения при различных видах нагружения могут позволить использовать напечатанный материал без дополнительных объемных упрочняющих обработок [14; 15], ограничиваясь в отдельных случаях поверхностным модифицированием [16; 17]. Хотя методы поверхностной обработки, модификации образцов и нанесения покрытий достаточно широко применяются в различных отраслях промышленности и медицине, применение их в аддитивных технологиях начинает только обсуждаться [16 – 18]. Принимая во внимание,

что титановые сплавы активно используются в медицине (получение изделий аддитивными технологиями), в настоящей работе поставлена цель исследовать воздействие ионного пучка в вакууме [19] на поверхность титанового сплава, сформировавшегося при печати электронным лучом в вакууме проволокой марки VT6sv и провести сравнение с воздействием обычной термической обработкой [20]. При изучении поверхностной обработки титановых сплавов, используемых в медицине, обычно обсуждают улучшение износостойкости, коррозионной стойкости и биосовместимости. Если термическое воздействие не может сказаться на биосовместимости, то изменение структуры и состава сплава может влиять на прочностные свойства, а значит и на износостойкость поверхностных слоев.

Материалы и методы исследования

Образцы были получены на лабораторной установке электронно-лучевого аддитивного производства, разработанной в ИФПМ СО РАН [7]. Процесс формирования образцов осуществлялся путем сплавления титановой сварочной проволоки марки VT6sv диаметром 1,6 мм в условиях вакуума при давлении $10^{-3} - 10^{-2}$ Па (табл. 1).

Энергетическое воздействие с применением импульсной ионной обработки осуществляли на ускорителе ТЭМП-4М (рис. 1) при ускоряющем напряжении 200 кВ, длительности импульса на половине максимума 100 нс и плотности энергии 2 Дж/см² (для металлических материалов это режим с плавлением поверхностного слоя).

Плотность энергии была выбрана на основе результатов, полученных в работе [21]. Расстояние от ионного диода до обрабатываемой поверхности составляло 16 см. Состав ионного пучка следующий: до 70 % ионов углерода (C⁺, C⁺⁺), до 30 % протонов. Давление в вакуумной камере не превышало 2×10^{-4} Торр. Для измерения шероховатости поверхности образца использовали атомно-силовую микроскопию (АСМ) на приборе Nt-Mdt Ntegra Prima. Тонкую структуру исследовали в поперечном сечении методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEM 2100 (Jeol) при ускоряющем напряжении 200 кВ. Фазовый состав устанавливали путем анализа электронной дифракции в выбранной области (SAED).

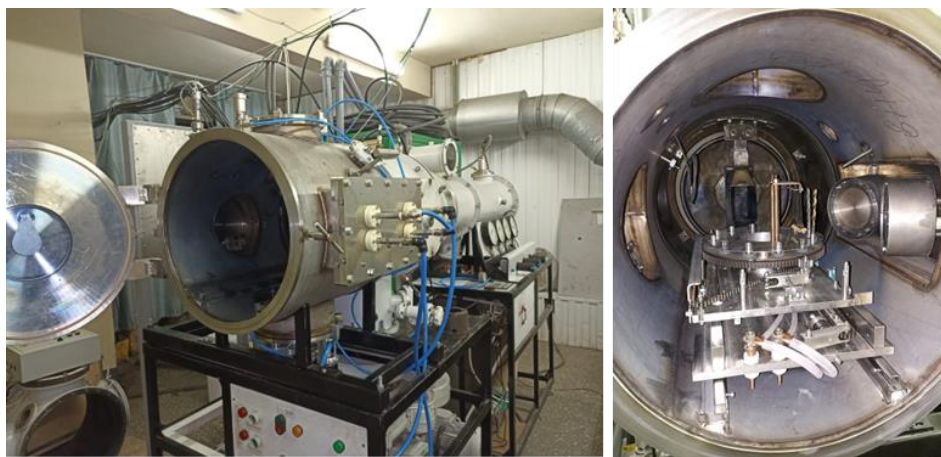


Рис. 1. Импульсный ионный ускоритель ТЭМП-4М:

a и *б* – общий вид и внутренняя камера

Fig. 1. Pulsed ion accelerator TEMP-4M:

a and *б* – general view and internal chamber

Образцы для электронной микроскопии вырезали размером $0,5 \times 1,5 \times 4$ мм с помощью электроэрозионного станка, а затем дополнительно обрабатывали ионной полировкой на установке ЕМ-09100IS (Jeol) при напряжении 7 кВ и угле наклона 4° . Образцы были протестированы на микротвердомере DUH-211S (Shimadzu, Япония), максимальная нагрузка 2000 мН.

Результаты и их обсуждение

Исходная после печати столбчатая структура обусловлена β -зернами вместе с преобладающими внутри параллельным игольчатым α' -мартенситом и α -фазой. В исходном состоянии сплав титана ВТ6св является поликристалли-

ческим агрегатом, в объеме зерен которого наблюдается двухфазная структура, сформированная чередующимися пластинами предположительно α -Ti и β -Ti (рис. 2). Подтверждением этого является микродифракционный анализ структуры сплава (рис. 3).

Ионная обработка сплава сопровождается существенным преобразованием структуры поверхностного слоя толщиной до 5,5 мкм (рис. 3, *a*, *б*). Во-первых, наблюдается существенное изменение средних размеров пластин α -Ti: если в исходном состоянии поперечные размеры пластин изменялись в пределах 7 – 8 мкм, то после облучения они измельчаются до 50 – 70 нм. Во-вторых, облучение сплава сопровождается $\beta \rightarrow \alpha$ -превращением,

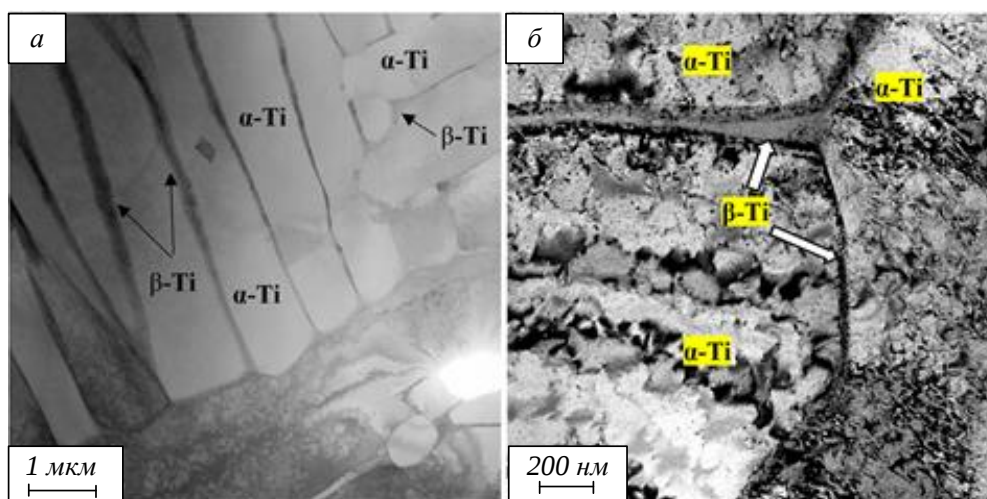


Рис. 2. Двухфазная структура сплава титана ВТ6св в исходном состоянии:

a – пластинчатая структура с чередующимися пластинами α -Ti и β -Ti (получено в сканирующем режиме работы электронного микроскопа); *б* – структура α -Ti зерновой морфологии, по границам зерна располагаются прослойки β -Ti (получено в режиме работы микроскопа на просвет)

Fig. 2. Two-phase structure of titanium alloy VT6sv in the initial state:

a – is a lamellar structure with alternating α -Ti and β -Ti plates (obtained in the scanning mode of operation of an electron microscope); *б* – is an α -Ti structure of grain morphology, with β -Ti interlayers along the grain boundaries (obtained in the lumen microscope mode)

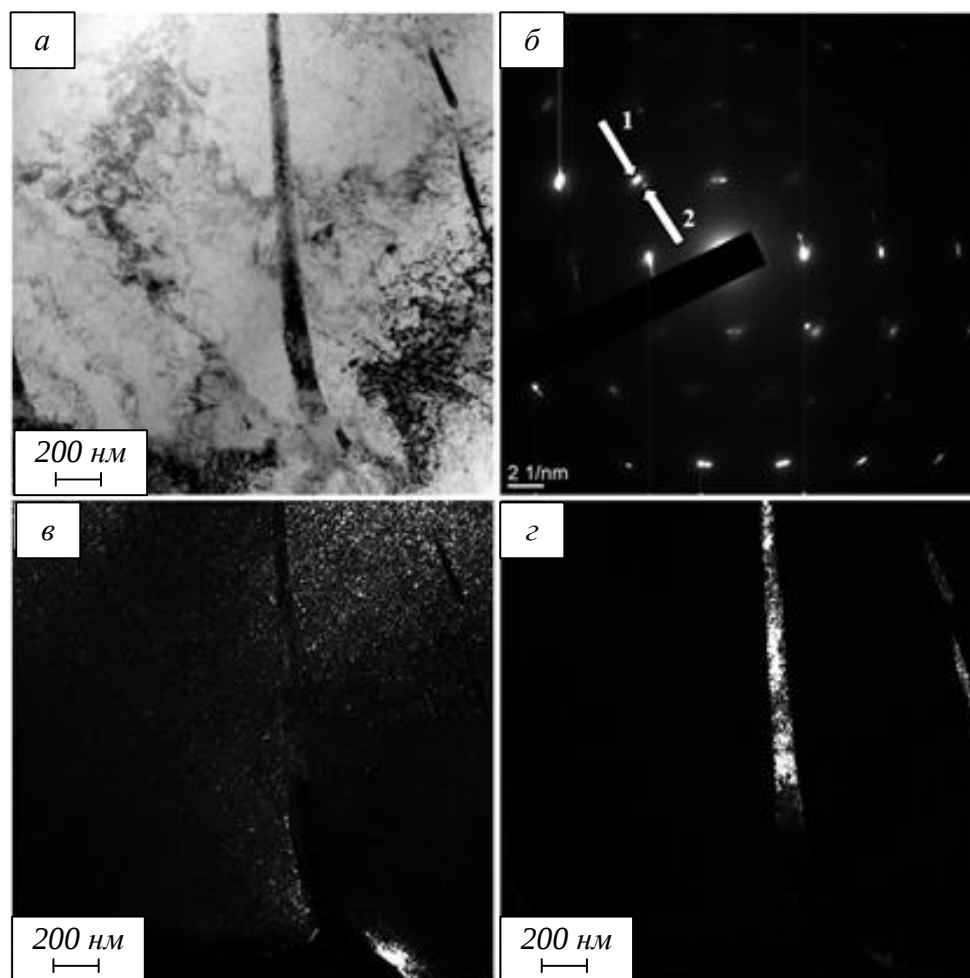


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры сплава титана VT6sv в исходном состоянии: *a* – светлое поле; *б* – микроэлектроннограмма; *в* и *г* – темные поля, полученные в рефлексах [110] α -Ti и [200] β -Ti; стрелками на поз. *б* указаны рефлексы, в которых получены темные поля 1 и 2 для поз. *в* и *г*

Fig. 3. Electron microscopic image of the structure of titanium alloy VT6sv in the initial state: *a* – is the light field; *б* – is the microelectronogram; *c* and *d* are the dark fields obtained in reflexes [110] α -Ti and [200] β -Ti; the arrows in pos. *б* indicate reflexes in which dark fields 1 and 2 are obtained for pos. *в* and *г*

то есть допревращением β -фазы титана. В-третьих, наблюдается формирование наноразмерных частиц алюминидов ванадия Al_3V , расположенных вдоль границ пластин α -Ti (рис. 4, *г*).

Рассматриваемые преобразования структуры и фазового состава поверхностного слоя приведут к повышению прочностных, усталостных и трибологических свойств материала.

На верхней поверхности образца, подвергнутого шлифованию после печати (рис. 5, *а*), наблюдаются выраженные царапины, при этом высота неровностей поверхности *Rt* достигает 1,30 мкм, а средняя шероховатость составляет 0,212 мкм. После обработки материала ионным пучком с плотностью энергии 2 Дж/см² поверхность образца практически не содержит видимых царапин. Установлено, что импульсная ионная обработка приводит к снижению шероховатости до 0,134 мкм, при этом *Rt* уменьшается до 1,060 мкм (табл. 2). Это свидетельствует о том, что импульсная ионная обработка как

сглаживает острые кромки, образовавшиеся при механической обработке поверхности исходного образца, так и способствует уменьшению ее шероховатости. В работе [21] предположили, что такие параметры являются оптимальными для достижения эффективной остеоинтеграции. Морфология обработанной пучком поверхности является типичной для такого рода обработки [19 – 21]. Природа образования специфических кратеров для сплошного пучка диаметром в несколько сантиметров требует специальных исследований.

После ионного облучения твердость оплавленной и закристаллизовавшейся поверхности становится более равномерной, а ее среднее значение несколько возрастает по сравнению с исходной (с 254,39 до 261,37 HV).

В работе [20] было установлено, что субтрансусная термическая обработка не позволяет изменить морфологию исходного столбчатого β -зерна, приводит к распаду игольчатого α' -мартенсита

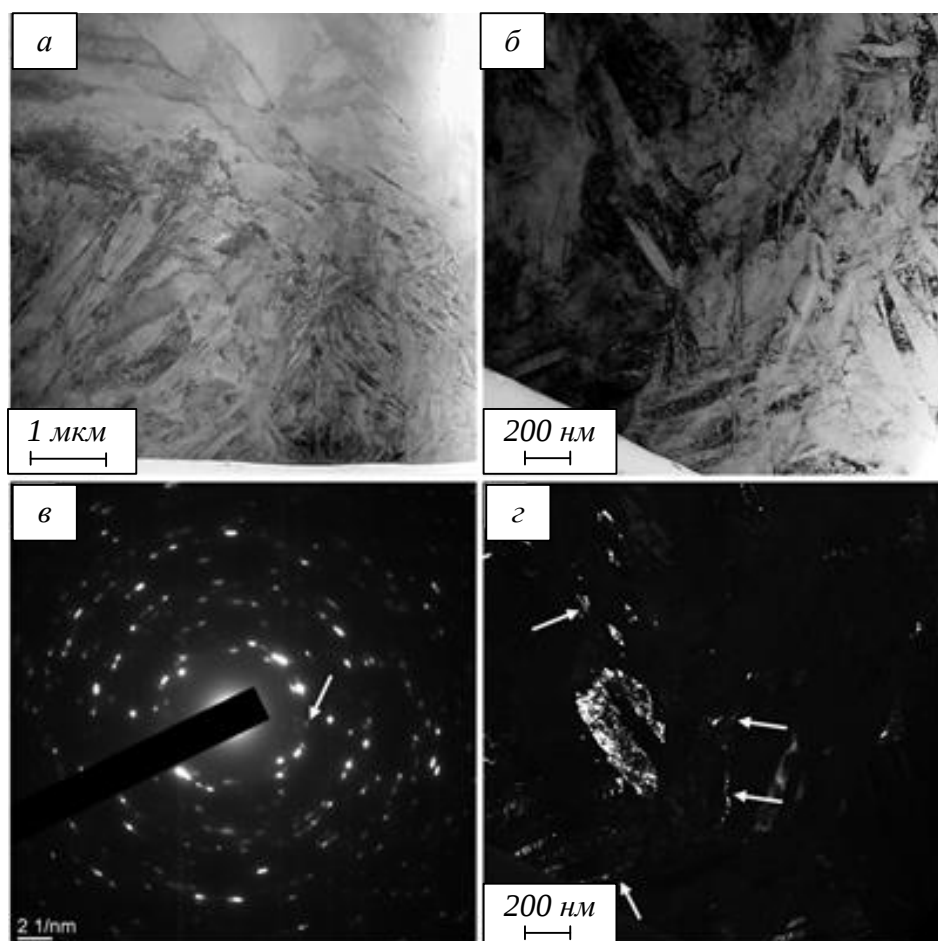


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры сплава титана VT6sv после облучения мощным ионным пучком:
a, б – светлые поля; *в* – микроэлектроннограмма; *г* – темное поле, полученное в рефлексах $[101] \alpha\text{-Ti} + [103] \text{Al}_3\text{V}$;
 стрелками на поз. *г* указан рефлекс, в котором получено темное поле, на поз. *г* – наноразмерные выделения фазы Al_3V
 Fig. 4. Electron microscopic image of the structure of the titanium alloy VT6sv in the state after irradiation
 with a powerful ion beam:

a, б – bright fields; *в* – microelectron diffraction pattern; *г* – dark field obtained in reflections $[101] \alpha\text{-Ti} + [103] \text{Al}_3\text{V}$;
 the arrow in position *в* indicates the reflex in which the dark field is obtained, in position *г* – precipitates
 of the Al_3V phase are indicated

на пластинки в зависимости от температуры нагрева, в то время как термическая обработка за пределами температуры фазового перехода полностью разрушит исходное длинное столбчатое β -зерно, оставив только большое исходное разностное β -зерно, заполненное новым формирующимся игольчатым α' -мартенситом (тип – переплетения) и α -фазой. Полученные характе-

ристики твердости хорошо согласуются с наблюдаемыми структурными особенностями. В работе [22] определен оптимальный режим термической обработки титанового сплава, полученного 3D-печатью плазменной наплавкой проволочного материала: двухступенчатый отжиг, который обеспечивает требуемые физико-

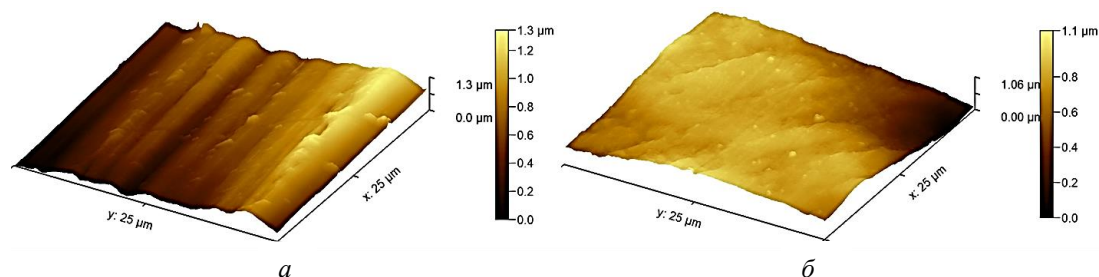


Рис. 5. АСМ-изображение поверхности исходного образца (*a*) и после импульсной ионно-пучковой обработки (*б*)
 Fig. 5. AFM image of the surface of the original sample (*a*) and after pulsed ion beam treatment (*б*)

Результаты измерения микрошероховатости

Table 2. Results of micro roughness measurement

Образец	R_t , μm	S_a , μm
Исходное состояние	1,300	0,212
После обработки	1,060	0,134
Примечание. R_t – это разность высот между пиками и впадинами поверхности; S_a – среднее отклонение высоты поверхности, рассчитанное по 2D-стандартам и распространенное на 3D-стандарты		

механические свойства получаемого металла. Режимы неполного и высокотемпературного полного отжига не приводят к улучшению прочностных характеристик материала по сравнению с их исходными значениями. Проведение закалки с последующим старением не измельчает первичные β -зерен. При старении закаленного образца происходит распад мартенсита и метастабильной β -фазы с образованием неблагоприятной крупнопластинчатой структуры ($\alpha + \beta$). Такие особенности структуры сплава не обеспечивают требуемых механических свойств, термообработанный сплав имеет достаточно высокие пластические свойства и самый высокий уровень ударной вязкости. Уровень предела прочности оказывается ниже исходных значений. По сравнению с традиционной термической обработкой, ионно-пучковую обработку можно использовать для улучшения характеристик титановых сплавов после печати и имеет широкие перспективы применения.

При изучении структурных особенностей, выявленных при печной термической обработке [9] методами электронной микроскопии получено, что после закалки структура напечатанного образца представляет собой пластинчатые α -Ti и первичный β -Ti. Последний в процессе закалки распадается с образованием α' -Ti, а при последующем низкотемпературном отжиге – на α_d -Ti. В структуре присутствуют два дополнительных компонента, представленные α/β -двойными структурами.

Выводы

Исследовано влияние импульсной ионной обработки на структуру и свойства сплавов, сформированных методом электронно-лучевой аддитивной печати с использованием проволоки марки ВТ6св.

Результаты экспериментов показали, что импульсная ионная обработка значительно улучшает микроструктуру поверхности титанового сплава, формируя модифицированный слой толщиной около 5,5 мкм. Под действием облучения в сплаве происходят фазовое $\beta \rightarrow \alpha$ -превращение и формирование наночастиц состава Al_3V по границам

α -Ti-фазы. Эти структурные преобразования способствуют улучшению твердости материала: микротвердость увеличивается с 254,39 до 261,37 HV, при этом достигается более равномерное распределение твердости.

Импульсная ионная обработка сглаживает острые кромки, возникшие в процессе механической обработки поверхности, что приводит к улучшению шероховатости поверхности. Это способствует повышению биосовместимости медицинских имплантатов.

По сравнению с традиционной термической обработкой, импульсная ионная обработка демонстрирует более высокую эффективность в улучшении свойств титановых сплавов. В дальнейшем целесообразно сосредоточиться на оптимизации взаимосвязи между параметрами обработки и реакцией материала, что будет способствовать расширению применения рассматриваемой технологии в высокотехнологичных отраслях (медицине и аэрокосмической промышленности).

В целом можно констатировать, что импульсная ионная обработка представляет собой перспективное и эффективное решение для функционализации поверхности титановых сплавов, обладающее возможностью «выглаживания» поверхности и повышению ее износостойкости благодаря измельчению структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gaspar B. Microstructural characterization of Ti – 6Al – 4V and its relationship to sample geometry. *Materials Engineering*. 2012;1–22.
2. Ho W.F., Ju C.P., Chern J.H. Structure and properties of cast binary Ti – Mo alloys. *Biomaterials*. 1999;20(22):2115–2122. [https://doi.org/10.1016/s0142-9612\(99\)00114-3](https://doi.org/10.1016/s0142-9612(99)00114-3)
3. Suwas S., Vikram R.J. Texture Evolution in Metallic Materials During Additive Manufacturing. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*. 2021;6:991–1003.
4. Введение в физику кристаллизации металлов / Под. ред. Я.С. Уманского. Москва: Изд-во Мир, 1967:170.

5. Klimenov V., Kolubaev E., Chumaevskii A., Ustinov A., Strelkova I., Rubtsov V., Gurianov D., Han Z., Nikonov S., Batranin A., Khimich M. Influence of the Coarse Grain Structure of a Titanium Alloy Ti – 4Al – 3V Formed by Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing on Strain Inhomogeneities and Fracture. *Materials*. 2023;16(11):3901. <https://doi.org/10.3390/ma16113901>
6. Klimenov V.A., Kolubaev E.A., Han Z. Chumaevskii A.V., Klopotov A.A., Ustinov A.M., Kovalevskaya Z.G., Moskvichev E. Pan M. Influence of anisotropy properties and structural inhomogeneity on elasticity and fracture of titanium alloys produced by electron-beam melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024;135:5575–5594.
7. Osipovich K., Kalashnikov K., Chumaevskii A., Gurianov D., Kalashnikova T., Vorontsov A., Zykova A., Utyaganova V., Panfilov A., Nikolaeva A., Dobrovolskii A., Rubtsov V., Kolubaev E. Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing: A Review. *Metals*. 2023;13(2):279. <https://doi.org/10.3390/met13020279>
8. Zhang T., Liu C.T. Design of titanium alloys by additive manufacturing: A critical review. *Advanced Powder Materials*. 2021;1(1):1–11. <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2021.11.001>
9. Chumaevskii A., Tarasov S., Gurianov D., Moskvichev E., Rubtsov V., Savchenko N., Panfilov A., Korsunsky A., Kolubaev E. Analysis of the Structure and Properties of As-Built and Heat-Treated Wire-Feed Electron Beam Additively Manufactured (WEBAM) Ti – 4Al – 3V Spherical Pressure Vessel. *Metals*. 2024;14(12):1379. <https://doi.org/10.3390/met14121379>
10. Tekdir H., Yetim A.F. Additive manufacturing of multiple layered materials (Ti6Al4V/316L) and improving their tribological properties with glow discharge surface modification. *Vacuum*. 2021;184:109893.
11. Vanmeensel K., Lietaert K., Vrancken B., Dadbakhsh S., Li X., Kruth J.P., Krakhmalev P., Yadroitsev I., Humbeeck J.V. 8-Additively manufactured metals for medical applications. *Additive manufacturing Materials, Processes, Quantifications and Applications*. 2018:261–309.
12. Lu Y., Turner R., Brooks J., Basoalto H. Microstructural characteristics and computational investigation on electron beam welded Ti – 6Al – 4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021;288:116837. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116837>
13. Popovich A.A., Sufiiarov V.S., Borisov E.V., Polozov I.A., Masaylo D.V. Grigoriev A.V. Anisotropy of mechanical properties of products manufactured using selective laser melting of powdered materials. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2017;58:389–395.
14. Xie B., Gao K. Research progress of surface treatment technologies on titanium alloys: a mini review. *Coatings*. 2023;13(9):1486. <https://doi.org/10.3390/coatings13091486>
15. Wang M., Li H.Q., Guo H., Feng L., Liu Sh.-Y., Fang X.-Y. Evolution of microstructure and intervariant boundaries of α phase in electron beam melted and heat-treated Ti – 6Al – 4V alloy. *Rare Metals*. 2021;40:2118–2126.
16. Slobodyan M., Pesterev E., Markov A. A review of high-energy processing techniques applied for additive manufacturing and surface engineering of cemented carbides and cermets. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023;105(2):124–186. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.09.030>
17. Guehennec L.L., Soueidan A., Layrolle P., Amouriq Y. Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration. *Dental Materials*. 2007;23(7):844–854. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2006.06.025>
18. Panin A., Kazachenok M., Perevalova O., Martynov S., Panina A., Sklyarova E. Continuous Electron Beam Post-Treatment of EBF³-Fabricated Ti – 6Al – 4V Parts. *Metals*. 2019;9(6):699. <https://doi.org/10.3390/met9060699>
19. Remnev G.E., Isakov I.F., Opekounov M.S., Matvienko V.M., Ryzhkov V.A., Struts V.K., Grushin I.I., Zakoutayev A.N., Potyomkin A.V., Tarbokov V.A., Pushkaryov A.N., Kutuzov V.L., Ovsyannikov Yu.M. High intensity pulsed ion beam sources and their industrial applications. *Surface and Coatings Technology*. 1999;114(2-3):206–212. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00058-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00058-4)
20. Klimenov V., Kolubaev E., Chumaevskii A., Tarbokov V., Han Z. Prospective Surface Treatment Technologies for Ti Alloys Obtained by Additive Manufacturing. *Abstracts at 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2024)*. Tomsk, 2024:296.
21. Tarbokov V.A., Pavlov S.K., Remnev G.E., Nochovnaya N.A., Eshkulov U.É. Titanium Alloy Surface Complex Modification. *Metallurgist*. 2019; 62:1187–1193. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00772-4>
22. Кривоносова Е.А., Акулова С.Н., Мышкина А.В. Исследование влияния различных видов термической обработки на физико-механические свойства титанового сплава. *Химия. Экология. Урбанистика*. 2021;1:354–358.

REFERENCES

1. Gaspar B. Microstructural characterization of Ti – 6Al – 4V and its relationship to sample geometry. *Materials Engineering*. 2012;22.
2. Ho W.F., Ju C.P., Chern J.H. Structure and properties of cast binary Ti – Mo alloys. *Biomaterials*. 1999; 20(22):2115–2122. [https://doi.org/10.1016/s0142-9612\(99\)00114-3](https://doi.org/10.1016/s0142-9612(99)00114-3)
3. Suwas S., Vikram R.J. Texture Evolution in Metallic Materials During Additive Manufacturing. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*. 2021;6:991–1003.
4. Umansky Ya.S. ed. *Introduction to the Physics of Metal Crystallization*. Moscow: Izd-vo Mir. 1967:170. (In Russ.).
5. Klimenov V., Kolubaev E., Chumaevskii A., Ustinov A., Strelkova I., Rubtsov V., Gurianov D., Han Z., Nikonov S., Batranin A., Khimich M. Influence of the Coarse Grain Structure of a Titanium Alloy Ti – 4Al – 3V Formed by Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing on Strain Inhomogeneities and Fracture. *Materials*. 2023;16(11):3901. <https://doi.org/10.3390/ma16113901>
6. Klimenov V.A., Kolubaev E.A., Han Z. Chumaevskii A.V., Klopotov A.A., Ustinov A.M., Kovalevskaya Z.G., Moskvichev E. Pan M. Influence of anisotropy properties and structural inhomogeneity on elasticity and fracture of titanium alloys produced by electron-beam melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024; 135:5575–5594.
7. Osipovich K., Kalashnikov K., Chumaevskii A., Gurianov D., Kalashnikova T., Vorontsov A., Zytkova A., Utyaganova V., Panfilov A., Nikolaeva A., Dobrovolskii A., Rubtsov V., Kolubaev E. Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing: A Review. *Metals*. 2023;13(2):279. <https://doi.org/10.3390/met13020279>
8. Zhang T., Liu C.T. Design of titanium alloys by additive manufacturing: A critical review. *Advanced Powder Materials*. 2021;1(1):1–11. <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2021.11.001>
9. Chumaevskii A., Tarasov S., Gurianov D., Moskvichev E., Rubtsov V., Savchenko N., Panfilov A., Korsunsky A., Kolubaev E. Analysis of the Structure and Properties of As-Built and Heat-Treated Wire-Feed Electron Beam Additively Manufactured (WEBAM) Ti – 4Al – 3V Spherical Pressure Vessel. *Metals*. 2024;14(12):1379. <https://doi.org/10.3390/met14121379>
10. Tekdir H., Yetim A.F. Additive manufacturing of multiple layered materials (Ti6Al4V/316L) and improving their tribological properties with glow discharge surface modification. *Vacuum*. 2021;184:109893.
11. Vanmeensel K., Lietaert K., Vrancken B., Dadbakhsh S., Li X., Kruth J.P., Krakhmalev P., Yadroitsev I., Humbeeck J.V. 8-Additively manufactured metals for medical applications. *Additive manufacturing Materials, Processes, Quantifications and Applications*. 2018:261–309.
12. Lu Y., Turner R., Brooks J., Basalto H. Microstructural characteristics and computational investigation on electron beam welded Ti – 6Al – 4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021;288:116837. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116837>
13. Popovich A.A., Sufiariy V.S., Borisov E.V., Polozov I.A., Masaylo D.V. Grigoriev A.V. Anisotropy of mechanical properties of products manufactured using selective laser melting of powdered materials. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2017;58:389–395.
14. Xie B., Gao K. Research progress of surface treatment technologies on titanium alloys: a mini review. *Coatings*. 2023;13(9):1486. <https://doi.org/10.3390/coatings13091486>
15. Wang M., Li H.Q., Guo H., Feng L., Liu Sh.-Y., Fang X.-Y. Evolution of microstructure and intervariant boundaries of α phase in electron beam melted and heat-treated Ti – 6Al – 4V alloy. *Rare Metals*. 2021;40:2118–2126.
16. Slobodyan M., Pesterev E., Markov A. A review of high-energy processing techniques applied for additive manufacturing and surface engineering of cemented carbides and cermets. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023;105(2):124–186. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.09.030>
17. Guehennec L.L., Soueidan A., Layrolle P., Amouriq Y. Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration. *Dental Materials*. 2007;23(7):844–854. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2006.06.025>
18. Panin A., Kazachenok M., Perevalova O., Martynov S., Panina A., Sklyarova E. Continuous Electron Beam Post-Treatment of EBF³-Fabricated Ti – 6Al – 4V Parts. *Metals*. 2019;9(6):699. <https://doi.org/10.3390/met9060699>
19. Remnev G.E., Isakov I.F., Opekounov M.S., Matvienko V.M., Ryzhkov V.A., Struts V.K., Grushin I.I., Zakoutayev A.N., Potyomkin A.V., Tarbokov V.A., Pushkaryov A.N., Kutuzov V.L., Ovsyannikov Yu.M. High intensity pulsed ion beam sources and their industrial applications. *Surface and Coatings Technology*. 1999;114(2-3):206–212. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00058-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00058-4)
20. Klimenov V., Kolubaev E., Chumaevskii A., Tarbokov V., Han Z. Prospective Surface Treatment Technologies for Ti Alloys Obtained by Additive Manufacturing. *Abstracts at 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2024)*. Tomsk, 2024:296 – 296.
21. Tarbokov V.A., Pavlov S.K., Remnev G.E., Nochovnaya N.A., Eshkulov U.É. Titanium Alloy Surface Complex Modification. *Metallurgist*. 2019; 62:1187–1193. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00772-4>
22. Krivonosova E.A., Akulova S.N., Myshkina A.V. Study of the influence of different types of heat

treatment on the physical and mechanical properties of titanium alloy. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika*. 2021;1:354–358. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Цзэли Хань, аспирант, инженер, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: hanzelizy@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6502-6541

SPIN-код: 3444-2695

Чжэньюань Ли, д.т.н., доцент, Шэньянский политехнический университет

E-mail: zhengyuan-li@syu.edu.cn

ORCID: 0000-0002-1515-4008

Владислав Александрович Тарбоков, к.т.н., ведущий инженер, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: tarbokovv@tpu.ru

ORCID: 0000-0001-9366-5965

SPIN-код: 6043-8895

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН

E-mail: yufi55@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8022-7958

SPIN-код: 7576-4810

Константин Вениаминович Иванов, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: ikv@ispms.tsc.ru

ORCID: 0000-0002-8003-271X

SPIN-код: 4432-8819

Василий Александрович Клименов, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: klimenov@tpu.ru

ORCID: 0000-0001-7583-0170

SPIN-код: 9036-3306

Information about the authors:

Zeli Han, postgraduate student, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University

E-mail: hanzelizy@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6502-6541

SPIN-код: 3444-2695

Zhengyuan Li, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Shenyang Polytechnic University.

E-mail: zhengyuan-li@syu.edu.cn

ORCID: 0000-0002-1515-4008

Vladislav A. Tarbokov, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engi, National Research Tomsk Polytechnic University

E-mail: tarbokovv@tpu.ru

ORCID: 0000-0001-9366-5965

SPIN-код: 6043-8895

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher, Institute of High-Current Electronics SB RAS

E-mail: yufi55@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8022-7958

SPIN-код: 7576-4810

Konstantin V. Ivanov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher, Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS

E-mail: ikv@ispms.tsc.ru

ORCID: 0000-0002-8003-271X

SPIN-код: 4432-8819

Vasilii A. Klimenov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, National Research Tomsk Polytechnic University

E-mail: klimenov@tpu.ru

ORCID: 0000-0001-7583-0170

SPIN-код: 9036-3306

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 27.04.2025

После доработки 15.05.2025

Принята к публикации 22.05.2025

Received 27.04.2025

Revised 15.05.2025

Accepted 22.05.2025