

¹ А.В. ИОНИНА,

канд. техн. наук

² И.А. ПАНЧЕНКО,

канд. техн. наук

¹ Филиал Кузбасского государственного технического
университета имени Т.Ф. Горбачева

² Сибирский государственный индустриальный
университет

г. Новокузнецк, Российская Федерация

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА VT1-0 ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ

В настоящей работе проведено упрочнение поверхности технически чистого титана VT1-0 путём электронно-пучковой обработки, позволяющей многократно повысить усталостную долговечность исследуемого материала. Методами сканирующей и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии исследованы структурно-фазовые состояния и дефектная субструктура титана, подвергнутых многоцикловым усталостным испытаниям. Показано, что поверхностный слой, сформировавшийся в результате облучения электронным пучком, содержит микропоры, расположенные параллельно поверхности образца. Показано, что облучение технически чистого титана марки VT1-0 высокоинтенсивным импульсным электронным пучком в режиме (16 кэВ, 25 Дж/см², 150 мкс, 3 имп, 0,3 с⁻¹). приводит к измельчению зеренной структуры и формированию внутризеренной субструктуры, т.е. к формированию в поверхностном слое дополнительных структурных уровней субмикро- и наноразмерного диапазона.

Ключевые слова: титан, усталость, электронно-пучковая обработка, структура, фазовый состав.

¹ A.V. IONINA,

Cand. of Tech. Sciences

² I.A. PANCHENKO,

Cand. of Tech. Sciences

¹ Branch of Kuzbass State Technical University
named after T.F. Gorbachev

² Siberian State Industrial University
Novokuznetsk, Russian Federation

MODIFICATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE SURFACE OF TITANIUM VT1-0 AFTER ELECTRON BEAM PROCESSING

In this work, the surface of technically pure titanium VT1-0 was strengthened by electron beam processing, which allows to increase the fatigue life of the material under study many times. The structural-phase states and defective substructure of titanium subjected to multi-cycle fatigue tests have been studied by scanning and transmission electron diffraction microscopy. It is shown that the surface layer formed as a result of electron beam irradiation contains micropores located parallel to the sample surface. It is shown that irradiation of technically pure titanium grade VT1-0 with a high-intensity pulsed electron beam in the mode (16 keV, 25 J/cm², 150 microseconds, 3 imp, 0.3 s⁻¹). it leads to the grinding of the grain structure and the formation of an intragrain substructure, i.e. to the formation of additional structural levels of the submicro- and nanoscale range in the surface layer.

Keywords: titanium, fatigue, electron beam processing, structure, phase composition.

Введение

В последние годы получили развитие разработки в области упрочнения поверхности с использованием импульсных плазменных струй. Как и обработка с использованием других видов

концентрированных потоков энергии – лазерного излучения, электронных и ионных пучков, такая обработка позволяет осуществлять нагрев поверхности и ее последующую самозакалку. Выявлены закономерности упрочнения электронно-пучковой обработкой (ЭПО) поверхностных слоев сталей

разных структурных классов, силуминов, титановых сплавов, подвергаемые много- и малоцикловой усталости [1–3]. Однако, роль влияния электронно-пучковой обработки, подвергаемый многоцикловой усталости, не была установлена. Технически чистый титан и его сплавы широко применяются в промышленности благодаря уникальному сочетанию физических и механических характеристик и являются одними из наиболее привлекательных конструкционных материалов. Повышение ресурса работоспособности ответственных изделий является важной научной и производственной задачей.

Целью настоящей работы является выявление закономерностей формирования структурно-фазовых состояний для повышения усталостного ресурса и функциональных свойств поверхностных слоёв технически чистого титана BT1-0 после электронно-пучковой обработки.

Впервые методами оптической, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии проведены комплексные экспериментальные исследования влияния электронно-пучковой обработки на формирование и эволюцию структуры, фазового состава и дефектной субструктуры титана BT1-0, подвергнутого многоцикловому усталостному нагружению до разрушения. Выявлены и проанализированы основные факторы и механизмы, определяющие усталостную долговечность технически чистого титана после электронно-пучковой обработки. Установлено, что увеличение усталостной долговечности титана, подвергнутого энергетическим обработкам, обусловлено формированием субмикро- и наноразмерной структуры приповерхностного слоя.

Полученные экспериментальные данные по влиянию электронно-пучковой обработки на формирование и эволюцию структуры, фазового состава и дефектной субструктуры титана BT1-0 позволяют углубить знания о физических процессах формирования структурно-фазовых состояний при внешних энергетических воздействиях. Практическая значимость работы заключается в существенном увеличении усталостной долговечности титановых деталей, работающих в режимах циклических нагрузок.

Материал и методы исследования

В работе исследование было проведено с образцами из титана BT1-0, которые были изготовлены по ГОСТ 25.502-79 и имели размеры $12 \times 4 \times 130$ мм (рис. 1). Концентратор напряжений создавался надрезом в виде полукруглых вырезов радиусом 20 мм.

Характерной особенностью усталостного разрушения металлов и сплавов является зарождение трещин в поверхностном слое, вследствие чего состояние поверхностного слоя оказывает существенное влияние на усталостную долговечность материала. Наличие высоких внутренних напряжений, большое количество дефектов, сильные упругие искажения кристаллической решетки вблизи границ зерен приводят к быстрой локализации деформации при нагружении и, как следствие, потере пластичности материала. Для снятия напряжений и предотвращения образования трещин титан подвергают отжигу [4].

Для изменения поверхностного слоя в настоящей работе применена электронно-пучковая обработка. Как отмечено ранее, такая обработка характеризуется импульсным и локальным характером воздействия на поверхность, что является значительным экономическим преимуществом ее использования, если сравнить со стационарными методами обработки. Она характеризуется также рядом параметров обработки и их сочетанием, которые приводят к новым структурно-фазовым состояниям формируемых поверхностных слоев материалов с повышенным уровнем свойств.

В связи с вышесказанным в работе образцы были разделены на две группы: первая группа образцов была подвергнута отжигу при температуре 1173 К в течение 90 мин с охлаждением в печи; вторая группа образцов находилась в состоянии поставки. Исследование влияния электронно-пучковой обработки было выполнено с образцами первой группы.

Усталостные испытания проводили по схеме циклического асимметричного консольного изгиба [5–9]. Верхнее значение напряжения цикла нагрузки подбиралось экспериментальным путем таким образом, чтобы образец до разрушения выдерживал не менее 10^5 циклов нагружения, и составляло 20 МПа. Температура испытаний во всех случаях была комнатной (~ 300 К). Частота нагружения образцов изгибом составляла 15 Гц. Во время испытаний определялось число циклов, которые образцы выдерживали до разрушения.

В Институте сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН, г. Томск) разработана вакуумная импульсная электронно-пучковая установка «СОЛО» (рис. 2). Эта установка по совокупности основных параметров (табл. 1) не имеет отечественных и зарубежных аналогов.

Принципиальная новизна установки заключается в том, что импульсный электронный пучок генерируется с помощью электронного источника с плазменным катодом [10]. Это позволило впервые

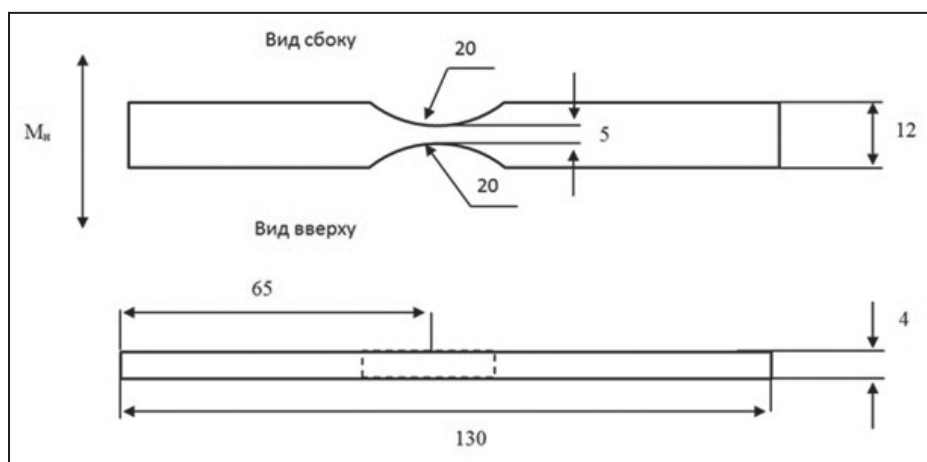


Рис. 1. Вид образца для усталостных испытаний

Таблица 1
Основные параметры вакуумной
импульсной электронно-пучковой установки «СОЛО»

Основные параметры установки	
Диаметр вакуумной камеры, мм	700
Длина вакуумной камеры, мм	500
Рабочее давление, Па	10^{-2}
Диаметр пучка, см	1–3
Ток пучка, А	20–200
Энергия электронов, кэВ	5–15
Длительность импульса, мкс	30–50
Частота следования импульсов, c^{-1}	1–5



Рис. 2. Вакуумная импульсная электронно-пучковая установка «СОЛО»

осуществить независимую плавную регулировку в широких пределах основных параметров в любой комбинации. Параметры электронного пучка и режим обработки задаются и контролируются через компьютер.

Электронно-пучковая установка предназначена для модификации поверхности металлических и металлокерамических изделий импульсным электронным пучком. Главные преимущества электронно-пучковой установки:

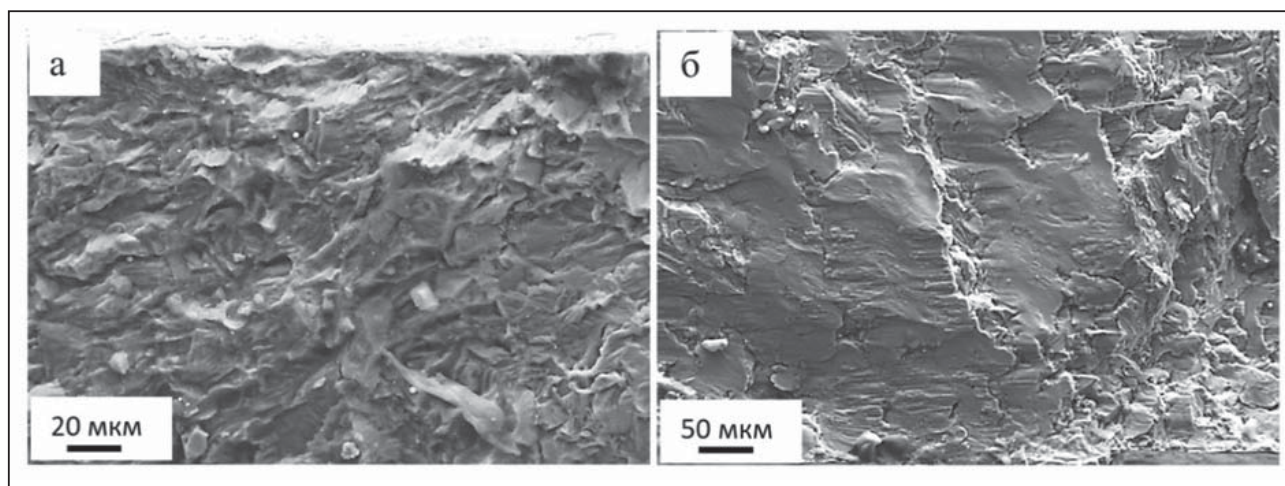


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение поверхности усталостного разрушения титана: а – структура зоны усталостного роста трещины; б – структура зоны долома

1. Независимая плавная регулировка основных параметров в любой комбинации.

2. Полировка и упрочнение металлов, сплавов и карбидных твердых сплавов типа WC-Co без образования микротрещин и микрократеров.

3. Позволяет в 15 раз уменьшить шероховатость поверхности штамповых сталей и твердых карбидных сплавов вплоть до $R_a = 0,05$ мкм. До 2–3 раз увеличить поверхностную микротвердость стальных изделий. Увеличить поверхностную твердость карбидных материалов типа WC-Co до 25–30 ГПа.

4. Возможна обработка изделий сложного профиля (штампы, пресс-формы).

5. Безопасность и экологическая чистота, процесс проводится в вакууме.

6. Не требуется специальных мер радиационной защиты

7. Энерго- и ресурсосбережение по сравнению с традиционными методами полировки, отсутствие дорогостоящих полировальных абразивных материалов, высокая скорость процесса полировки.

При проведении ЭПО были заданы следующие параметры работы установки «СОЛО»: энергия электронов 16 кэВ, плотность энергии пучков электронов: $E_s = 10; 15; 20; 25; 30$ Дж/см²; длительность импульса $\tau = 150$ мкс; число импульсов $N = 3$ импульса; частота следования импульсов $f = 0,3$ Гц. ЭПО проводилась со стороны концентратора напряжений перед проведением усталостных испытаний. Результаты испытаний на многоцикловую усталость приведены на рисунке 2. В результате выполненных испытаний выявлен режим облучения (16 кэВ, 25 Дж/см², 150 мкс, 3 имп, 0,3 с⁻¹), позволяющий кратно, более чем в 2 раза, увеличить среднюю усталостную долговечность исследуемого материала.

Исследования структуры, элементного и фазового состава, дефектной субструктуры поверхности модифицирования проводили методами:

1. Оптической микроскопии на микроскопе Olympus GX-51, оснащенный цифровой камерой с программным обеспечением SIAMS 700. Этот прибор позволяет получать изображение мелких объектов и их деталей при различных увеличениях вплоть до $\times 1000$.

2. Сканирующей электронной микроскопии на микроскопе SEM-515 Philips.

3. Просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (ПЭМ) тонких фольг (прибор JEM-2100F, JEOL).

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования поверхности усталостного разрушения титана BT1-0, выполненные методами сканирующей электронной микроскопии, выявили формирование тонкого поверхностного слоя, зону усталостного разрушения и зону долома рисунке 3.

Зона усталостного разрушения характеризуется наличием усталостных бороздок, расстояние между которыми 3,0 мкм. Зона усталостного роста трещины имеет структуру преимущественно ямок вязкого разрушения, фасетки квазискола являются основным структурным элементом поверхности разрушения зоны долома.

На рисунке 4 приведены характерные изображения структуры поверхности образца титана BT1-0, формирующейся после облучения интенсивным импульсным электронным пучком. Прежде всего, следует отметить, что облучение образца титана интенсивным импульсным электронным пучком в

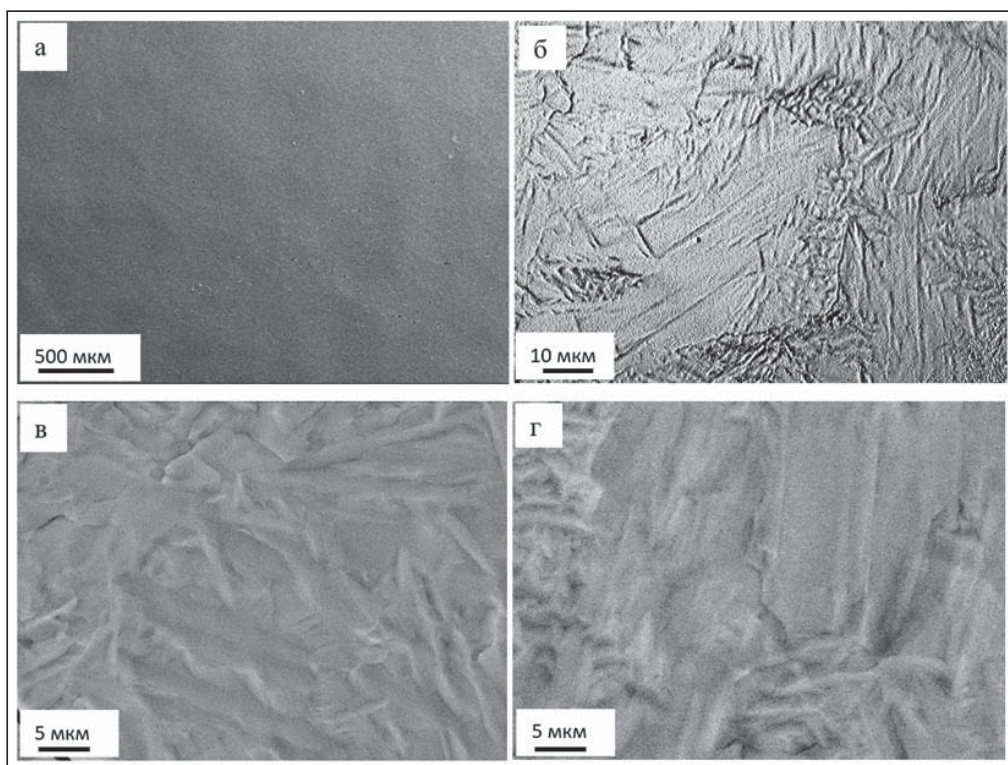


Рис. 4. Структура поверхности облучения титана, формирующаяся в результате ЭПО а, в, г – изображения получены СЭМ методами; б – изображение получено методами оптической микроскопии

режиме плавления поверхностного слоя сопровождается формированием гладкой поверхности, не имеющей микропор и микрократеров (рис. 4, а), как правило, образующихся при ЭПО многофазных материалов [11]. Отчетливо видно, что в результате высокоскоростного охлаждения образца от температуры плавления в поверхностном слое формируется поликристаллическая структура. В объеме зерен поверхностного слоя наблюдается пластинчатая субструктура (рис. 4, б–г).

Более детально структура поверхностного слоя титана, модифицированного интенсивным электронным пучком, исследовалась методами просвечивающей электронной микроскопии. Исследования формирующейся структуры выполнялись в областях, указанных на рисунке 5, принадлежащих различным слоям, т.е. сформированным в различных температурных условиях. Показано, что независимо от области и слоя анализа, исследуемый материал является поликристаллическим агрегатом, субструктура зерен которого, однако, существенным образом зависит от области анализа.

В области 1 (слой № I на рис. 5) в объеме зерен выявляется пластинчатая структура (рис. 6, пластины указаны темными стрелками). Пластины формируются, преимущественно, у границ зерен,

расположены отдельно друг от друга, реже, имеют различные конфигурации.

В слое № II, указанном на рисунке 5, выявлено формирование субзеренной структуры субмикроскопических размеров, характерное изображение которой представлено на рисунке 7, а. Размеры субзерен изменяются в пределах от 1 мкм до 2 мкм.

Структура слоя термического влияния (слой № III, рис. 5) существенным образом зависит от расстояния до поверхности облучения электронным пучком. А именно, слой, примыкающий к слою № II (область исследования № 3 на рисунке 3.25), характеризуется пластинчатой структурой (рис. 7, б); слой, располагающийся на глубине ≈ 50 мкм имеет зеренно-субзеренную структуру, характерное изображение которой приведено на рисунке 7, в, г. На глубине (180–200) мкм (предположительно, структура исходного состояния) наблюдается поликристаллическая структура на основе α -Ti. В объеме зерен титана присутствует дислокационная субструктура в виде хаотически распределенных дислокаций (рис. 8, а) или дислокационных клубков (рис. 8, б). Скалярная плотность дислокаций $\approx 1,3 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$. В разрушенном титане средняя скалярная плотность дислокаций в 2 раза больше – $2,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

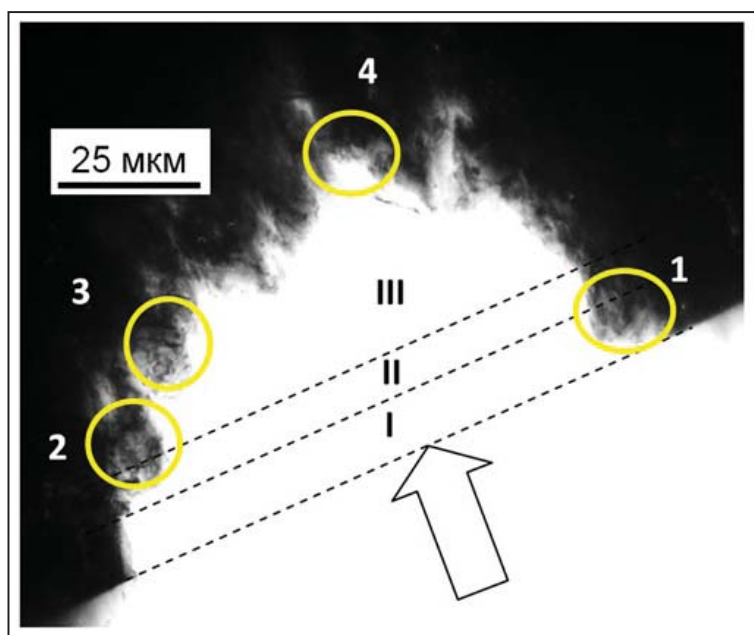
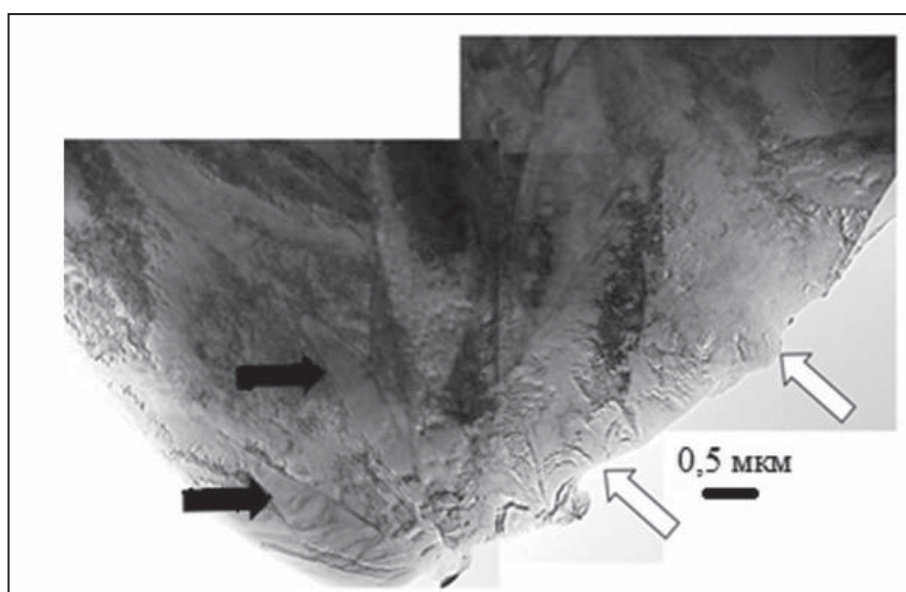


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение фольги технически чистого титана, изготовленной методами ионного утонения: I – однофазный слой (толщина слоя, в соответствии с расчетами температурного поля, 10,4 мкм), II – двухфазный слой (7,7 мкм), III – слой термического влияния. Стрелкой обозначена поверхность облучения образца электронным пучком. Овалами выделены области детального электронно-микроскопического анализа структуры

Рис. 6. Электронно-микроскопическое изображение структуры, формирующейся в слое № I (область I на рис. 5); светлыми стрелками обозначена поверхность облучения; темными стрелками – пластины α -Ti



Таким образом, методами сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии выявлено формирование в поверхностном слое титана BT1-0, облученного низкоэнергетическим интенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия, многослойного состояния, структура которого зависит от расстояния до поверхности облучения.

Облучение поверхности образца титана BT1-0 электронным пучком с $E_s = 25$ Дж/см²; приводит к существенному изменению структуры поверхностного слоя материала. Во-первых, существенно уменьшился средний размер зерен $D = 8,3$ мкм (рис. 9, б, в) (в исходном состоянии технически чистый титан марки BT1-0 является

поликристаллическим материалом, средний размер зерен которого $D = 25$ мкм (рис. 9, а)).

Во-вторых, в объеме зерен выявляется субструктура пластинчатого типа (рис. 9, б–г). Это означает, что облучение титана электронным пучком привело к формированию в поверхностном слое дополнительных структурных уровней субмикро- и наноразмерного диапазона.

Облучение титана интенсивным электронным пучком приводит к формированию поверхностного слоя толщиной ≈ 30 мкм с субструктурой пластинчатой морфологии. Можно предположить, что формирование пластинчатой субструктуры, обусловленное высокоскоростной кристаллизацией поверхностного слоя титана, способствует увеличению усталостной долговечности материала.

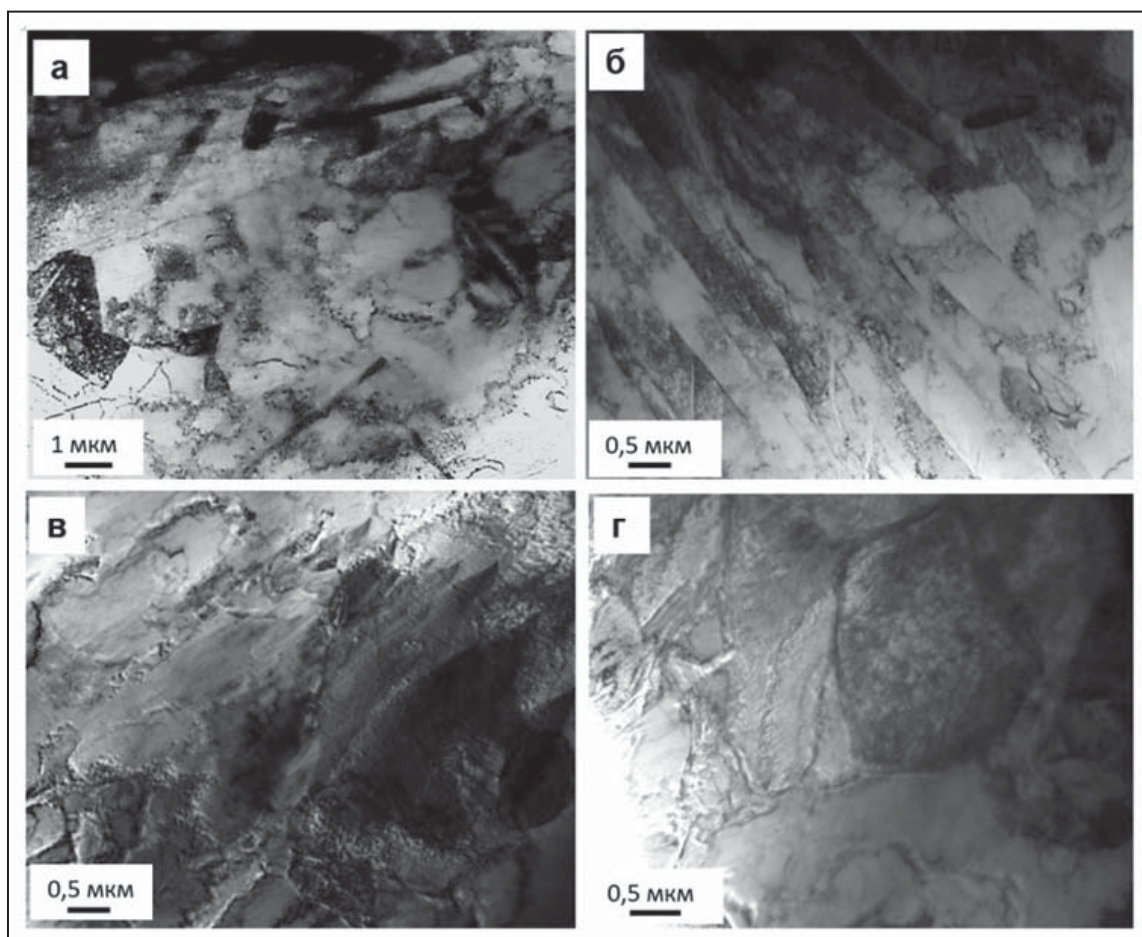


Рис. 7. Электронно-микроскопическое изображение структуры, формирующейся в области 2 (а); области 3 (б) и области 4 (в, г), выделенных на рисунке 5 овалами

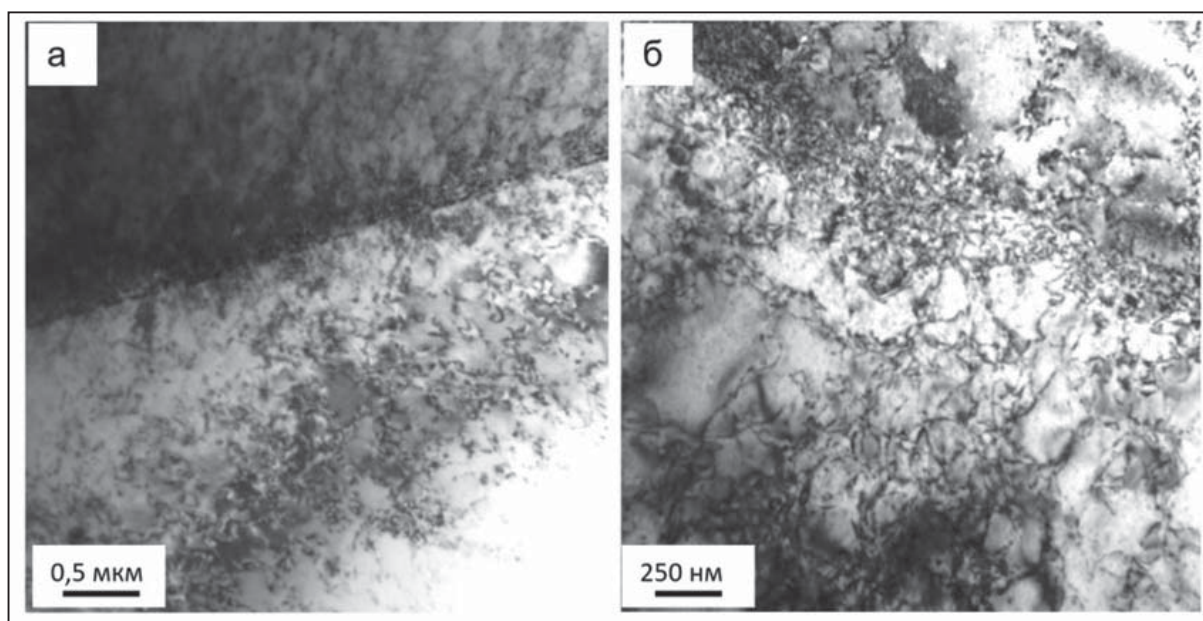


Рис. 8. Электронно-микроскопическое изображение дислокационной субструктуры, выявленной на глубине (180–200) мкм в титане после ЭПО

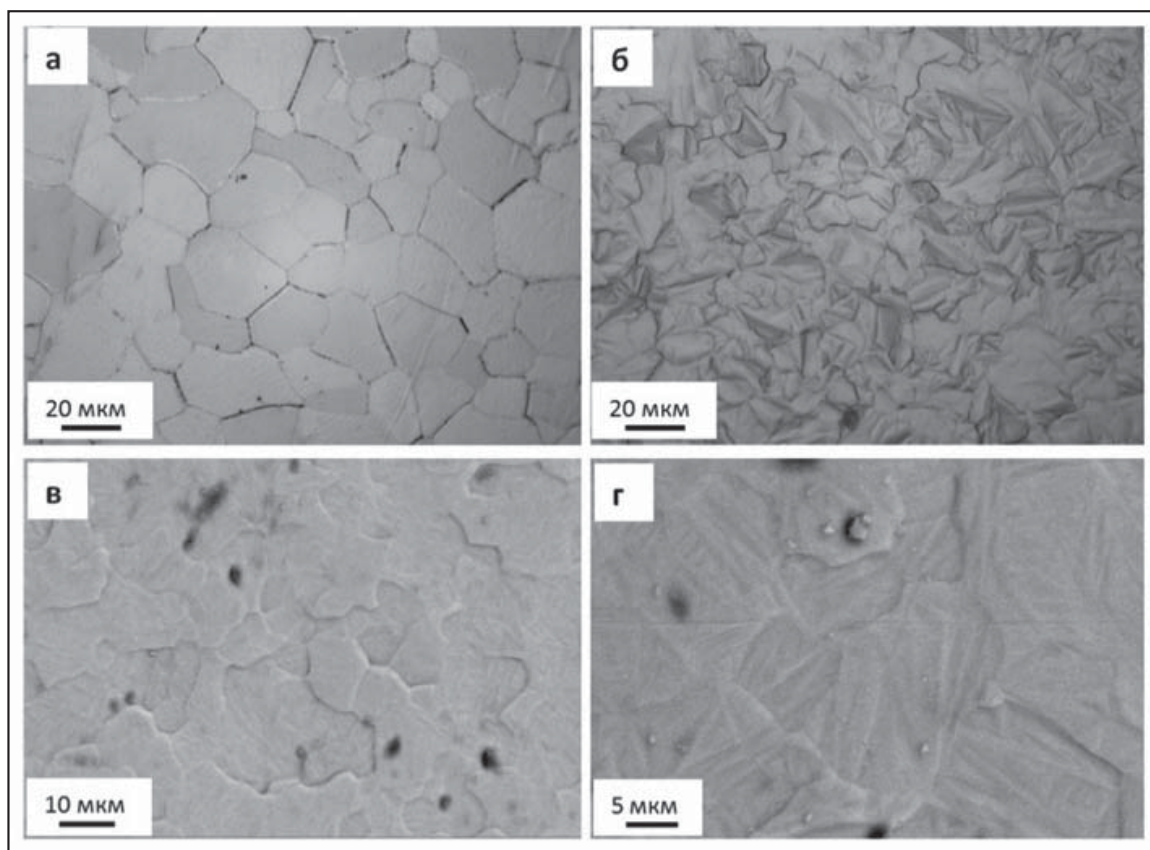


Рис. 9. Структура образца перед облучением (а); б–г – после облучения высокоинтенсивным электронным пучком ($E_s = 25 \text{ Дж/см}^2$)

Закключение

Установлено, что структура титана, разрушенного в результате усталостных испытаний, имеет градиентное строение. Слой, прилегающий к наноструктурному поверхностному слою, является α -титаном и характеризуется наличием большого количества микродвойников. Толщина слоя с пластинчатой структурой (20–25) мкм. По мере удаления от поверхностного наноструктурированного слоя количество микродвойников снижается. На большем удалении от поверхности образца в объеме зерен α -титана основным элементом дефектной субструктуры являются дислокации, расположенные хаотически.

Выполнены исследования методами сканирующей электронной микроскопии структуры поверхности разрушения титана, подвергнутой предварительному облучению интенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия (16 кэВ, 30 Дж/см², 150 мкс, 3 имп, 0,3 с⁻¹). Обнаружено, что облучение сопровождается формированием многослойной структуры. Установлено, что поверхностный слой, сформировавшийся в результате облучения электронным

пучком, содержит микропоры, расположенные параллельно поверхности образца.

Показано, что облучение технически чистого титана марки ВТ1-0 высокоинтенсивным импульсным электронным пучком в режиме (16 кэВ, 25 Дж/см², 150 мкс, 3 имп, 0,3 с⁻¹) приводит к измельчению зеренной структуры и формированию внутриверной субструктуры, т.е. к формированию в поверхностном слое дополнительных структурных уровней субмикро- и наноразмерного диапазона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соскова Н.А., Ващук Е.С., Будовских Е.А. Электронно-пучковая обработка поверхности технически чистого титана ВТ1-0 после электро-взрывного науглероживания совместно с оксидом циркония // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2013. № 1 (58). С. 37–41.
2. Коллингз Е.В. *Физическое металловедение титановых сплавов* / Пер. с англ. / под ред. Веркина Б.И., Москаленко В.А. М.: Металлургия, 1988. 224 с.
3. Зуев Л.Б., Соснин О.В., Громов В.Е., Трусова Г.В. О возможности залечивания усталостных

повреждений // *Металлофизика и новейшие технологии*. 1997. Т. 19. № 8. С. 80–82.

4. Борисова Е.А., Бочвар Г.А., Брун М.Я., Глазнов С.Г. и др. *Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов*. М.: Металлургия, 1980. 464 с.
5. Иванов Ю.Ф., Воробьев С.В., Коновалов С.В. и др. *Физические основы повышения усталостной долговечности нержавеющей сталей*. Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2011. 302 с.
6. Конева Н.А., Соснин О.В., Теплякова Л.А. и др. *Эволюция дислокационных субструктур при усталости*. Новокузнецк: СибГИУ, 2001. 105 с.
7. Соснин О.В., Громов В.Е., Козлов Э.В. и др. *Усталость сталей при импульсном токовом воздействии*. Новокузнецк: СибГИУ, 2004. 464 с.
8. *Влияние внешних энергетических воздействий на структуру, фазовый состав и свойства материалов* / под ред. В.Е. Громова. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2012. 320 с.
9. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorobiev S.V. et al. *Fatigue of steels modified by high intensity electron beams*. Cambridge: Cambridge International Science Publishing Ltd, 2015. 272 p.
10. Вакуумная импульсная электронно-пучковая установка «СОЛО». URL: <http://metal.do.am/publ/1-1-0-7>.
11. *Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки* / Под ред. Н.Н. Ковалю, Ю.Ф. Иванова. Томск: Издательство НТЛ, 2016. 298 с.
12. *Влияние внешних энергетических воздействий на структуру и фазовый состав титана при многоциклового усталости* / С.В. Коновалов, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов [и др.]. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2020. 184 с.
13. Influence of Electrical Potential on Mechanical Properties of Commercially Pure Titanium / I.A. Panchenko, K.A. Osintsev, S.V. Konovalov [et al.] // *Ural school for young metal scientists*, 03–07 февраля 2020 года, 2020.
14. Гостевская А.Н., Комиссарова И.А., Громов В.Е. Влияние электровзрывного легирования иттрием и электронно-пучковой обработки на структуру и фазовый состав титана // *Уральская школа молодых металлургов: Сборник материалов XX Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов-молодых ученых, Екатеринбург, 03–07 февраля 2020 года* / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Ключевой Центр превосходства «Материаловедение перспективных металлосодержащих материалов и технологий их обработки». Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2020.
15. Элементный состав покрытий, полученных селективным лазерным плавлением на подложке титанового сплава ВТ20 / К.А. Осинцев, С.В. Коновалов, А.А. Васильева [и др.] // *Проблемы прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий: Сборник трудов Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 02–03 марта 2021 года* / Под редакцией В.Е. Громова. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2021.
16. Изменение структуры титанового сплава ВТ1-0, подвергнутого воздействию токовыми импульсами при многоциклового усталости / К.А. Осинцев, И.А. Комиссарова, Е.Д. Крюкова [и др.] // *Уральская школа молодых металлургов: Сборник материалов XX Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов-молодых ученых, Екатеринбург, 03–07 февраля 2020 года* / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Ключевой Центр превосходства «Материаловедение перспективных металлосодержащих материалов и технологий их обработки». Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2020.
17. Ионина А.В. Повышение свойств стали после электровзрывного легирования и последующей электронно-пучковой обработки // *КоМУ-2022: Материалы XIV Всероссийской школы-конференции молодых учёных с международным участием, Ижевск, 05–09 декабря 2022 года*. Ижевск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук", 2022.
18. Ионина А.В. Электронно-пучковая модификация поверхности углеродистой стали // *Инженерная физика*. 2022. № 12. С. 17–27.
19. Ионина А.В. Модификация поверхности технически чистого титана ВТ1-0 после различных видов обработки // *Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы (современный мир в условиях глобальной турбулентности): Материалы VI Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 08–09 декабря 2022 года* / Отв. редактор

Т.А. Евсина. редколлегия: Ю.А. Кузнецова [и др.]. Кемерово-Новокузнецк: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, филиал КузГТУ в г. Новокузнецке, 2022. С. 56–59.

REFERENCES

1. Soskova N.A., Vashchuk E.S., Budovskikh E.A. Elektronno-puchkovaya obrabotka poverhnosti tekhnicheski chistogo titana VT1-0 posle elektrovzryvnogo nauglerozhivaniya sovmestno s oksidom cirkoniya [Electron-beam treatment of the surface of commercially pure titanium VT1-0 after electroexplosive carburization together with zirconium oxide]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Processing of metals (technology, equipment, tools)]. 2013. No. 1 (58). Pp. 37–41.
2. Collings E.V. *Fizicheskoe metallovedenie titanovykh splavov* [Physical metallurgy of titanium alloys]. Per. from English. Ed. Verkina B.I., Moskalenko V.A. M.: Metallurgy, 1988. 224 p.
3. Zuev L.B., Zuev L.B., Sosnin O.V., Gromov V.E., Trusova G.V. O vozmozhnosti zalechivaniya ustalostnykh povrezhdeniy [On the Possibility of Healing Fatigue Damage]. *Metallofiz. i nov. tekhnologii* [Metal Physics and Latest Technologies]. 1997. Vol. 19. No. 8. Pp. 80–82.
4. Borisova E.A., Bochvar G.A., Brun M.Ya., Glazunov S.G. et al. *Titanovye splavy. Metallografiya titanovykh splavov* [Titanium Alloys. Metallography of titanium alloys]. M.: Metallurgy, 1980. 464 p.
5. Ivanov Yu.F., Vorobyov S.V., Konovalov S.V. et al. *Fizicheskie osnovy povysheniya ustalostnoi dolgovechnosti nerzhavayushchikh stalej* [Physical foundations for increasing the fatigue life of stainless steels]. Novokuznetsk: Inter-Kuzbass, 2011. 302 p.
6. Koneva N.A., Sosnin O.V., Teplyakova L.A. et al. *Evoluciya dislokatsionnykh substruktur pri ustalosti* [Evolution of dislocation substructures under fatigue]. Novokuznetsk: SibGIU, 2001. 105 p.
7. Sosnin O.V., Gromov V.E., Kozlov E.V. et al. *Ustalost' stalej pri impul'snom tokovom vozdeystvii* [Fatigue of Steels under Impulse Current Exposure]. Novokuznetsk: SibGIU, 2004. 464 p.
8. *Vliyanie vneshnih energeticheskikh vozdeystvii na strukturu, fazovyy sostav i svoystva materialov* [Influence of external energy influences on the structure, phase composition and properties of materials] ed. V.E. Gromova. Novokuznetsk: Publishing House of SibGIU, 2012. 320 p.
9. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorobiev S.V. et al. *Fatigue of steels modified by high intensity electron beams*. Cambridge: Cambridge International Science Publishing Ltd, 2015. 272 p.
10. *Vakuumnaya impul'snaya elektronno-puchkovaya ustanovka «SOLO»* [Vacuum pulsed electron-gun installation "Solo"]. URL: <http://metal.do.am/publ/1-1-0-7>.
11. *Evoluciya struktury poverhnostnogo sloya stali, podvergnutoj elektronno-ionno-plazmennym metodam obrabotki* [The evolution of the structure of the surface layer of steel subjected to electron-ion-plasma methods of processing]. Ed. N.N. Koval, Yu.F. Ivanov. Tomsk: NTL Publishing House, 2016. 298 p.
12. *Vliyanie vneshnih energeticheskikh vozdeystvii na strukturu i fazovyy sostav titana pri mnogociklovoj ustalosti* [The influence of external energy influences on the structure and phase composition of the titanium with multi-cycle fatigue]. S.V. Konovalov, V.E. Gromov, Yu. F. Ivanov [et al.]. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2020. 184 p.
13. Influence of Electrical Potential on Mechanical Properties of Commercially Pure Titanium / I.A. Panchenko, K.A. Osintsev, S.V. Konovalov [et al.] // *Ural school for young metal scientists*.
14. Gostevskaya A.N., Komissarova I.A., Gromov V.E. Vliyanie elektrovzryvnogo legirovaniya ittriem i elektronno-puchkovoy obrabotki na strukturu i fazovyy sostav titana [Influence of electroexplosive doping with yttrium and electron-beam processing on the structure and phase composition of titanium]. *Ural'skaya shkola molodykh metallovedov: Sbornik materialov XX Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy Ural'skoj shkoly-seminara metallovedov-molodykh uchenykh, Ekaterinburg, 03–07 fevralya 2020 goda* / Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya Rossijskoj Federacii, Ural'skij federal'nyj universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'cina, Klyuchevoy Centr prevoskhodstva «Materialovedenie perspektivnykh metallsoedyneniy i tekhnologii ih obrabotki» [Ural School of Young Metallurgists: Collection of Materials XX International Scientific and Technical Ural School-Seminar of Metallurgists-Young Scientists, Yekaterinburg, February 03–07, 2020 / Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Key Center of Excellence "Materials Science of Advanced metal-containing materials and technologies for their processing]. Yekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 2020.
15. Osintsev K.A., Konovalov S.V., Vasil'eva A.A. et al. Elementnyy sostav pokrytij, poluchennykh selektivnym lazernym plavleniem na podlozhke titanovogo splava

VT20 [Elemental composition of coatings obtained by selective laser melting on a substrate of titanium alloy VT20]. *Problemy prochnosti i plastichnosti materialov v usloviyah vneshnih energeticheskikh vozdeystviy: Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Novokuzneck, 02–03 marta 2021 goda* [Problems of strength and plasticity of materials under external energy impacts: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Novokuznetsk, March 02–03, 2021]. Edited by V.E. Gromov. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University, 2021.

16. Osintsev K.A., Komissarova I.A., Kryukova E.D. et al. Izmenenie struktury titanovogo splava VT1-0, podvergnutogo vozdeystviyu tokovymi impul'sami pri mnogociklovoj ustalosti [Changing the structure of titanium alloy VT1-0 subjected to current pulses during high-cycle fatigue]. *Ural'skaya shkola molodyh metallovedov: Sbornik materialov XX Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy Ural'skoj shkoly-seminara metallovedov-molodyh uchenykh, Ekaterinburg, 03–07 fevralya 2020 goda* [Ural School of Young Metallurgists: Collection of Materials XX International scientific and technical Ural school-seminar of metallurgists-young scientists, Yekaterinburg, February 03–07, 2020]. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Key Center of Excellence "Materials Science of Advanced Metal-Containing materials and technologies for their processing. – Yekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 2020.
17. Ionin, A.V. Povyshenie svojstv stali posle elektrovzryvnogo legirovaniya i posleduyushchej

elektronno-puchkovoj obrabotki [Improving the properties of steel after electroexplosive alloying and subsequent electron-beam processing]. *KoMU-2022: Materialy XIV Vserossijskoj shkoly-konferencii molodyh uchyonykh s mezhdunarodnym uchastiem, Izhevsk, 05–09 dekabrya 2022 goda* [KomU-2022: Materials of the XIV All-Russian School-Conference of Young Scientists with International Participation, Izhevsk, December 05–09 2022]. Izhevsk: Federal State Budgetary Institution of Science "Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences", 2022.

18. Ionina A.V. Elektronno-puchkovaya modifikaciya poverhnosti uglerodistoj stali [Electronic-button modification of the surface of carbon steel] *Inzhenernaya fizika* [Engineering Physics]. 2022. No. 12. Pp. 17–27.
19. Ionina A.V. Modifikaciya poverhnosti tekhnicheskhi chistogo titana VT1-0 posle razlichnykh vidov obrabotki [Modification of the surface of technically pure titanium VT1-0 after various types of processing]. *Voprosy sovremennoj nauki: problemy, tendencii i perspektivy (sovremennyy mir v usloviyah global'noj turbulentnosti): Materialy VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Novokuzneck, 08–09 dekabrya 2022 goda* [Questions of modern science: problems, trends and prospects (modern world in conditions of global turbulence): materials of the VI International Scientific -Practical conference, Novokuznetsk, December 08–09, 2022]. Otv. Editor T.A. Evsina. editorial board: Yu.A. Kuznetsova [et al.]. -Kemerovo-Novokuznetsk: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbacheva, a branch of KuzSTU in Novokuznetsk, 2022. Pp. 56–59.

Сведения об авторах

Ионина Анна Валерьевна, канд. техн. наук, заведующий кафедрой технических дисциплин и информационных технологий
Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский
государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» в г. Новокузнецке
654006, г. Новокузнецк, Российская Федерация, ул. Орджоникидзе, 7

Панченко Ирина Алексеевна, канд. техн. наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией
электронной микроскопии и обработки изображений
Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
654006, г. Новокузнецк, Российская Федерация, ул. Кирова, 42

Information about author

Ionina Anna V., Cand. of Tech. Sciences, Head of the Department of Technical Disciplines and Information Technology
Branch of Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev in Novokuznetsk
654006, Novokuznetsk, Russian Federation, st. Ordzhonikidze, 7

Panchenko Irina A., Cand. of Tech. Sciences, Head of the Research Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing
Federal State Educational Institution of Higher Education "Siberian State Industrial University"
654006, Novokuznetsk, Russian Federation, st. Kirova, 42