

УДК 539.211

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-4-82-91

Влияние мощных ионных пучков на топографию поверхности и структуру приповерхностного слоя субмикрорекристаллических титановых сплавов

© 2018 г. **М.В. Жидков, А.Е. Лигачев, Ю.Р. Колобов, Г.В. Потемкин, Г.Е. Ремнев**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет (НИУ «БелГУ»)

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва

Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка

Томский политехнический университет

Статья поступила в редакцию 10.08.18 г., доработана 25.09.18 г., подписана в печать 27.09.18 г.

Исследовано влияние мощных импульсных пучков ионов углерода (энергия ионов 250 кэВ, длительность импульса ~100 нс, плотность тока в импульсе 150–200 А/см², значение поверхностной плотности энергии одиночного импульса $j \sim 3$ Дж/см² при облучении образцов титанового сплава ВТ1-0 и $j \sim 1$ Дж/см² при обработке образцов титанового сплава ВТ6, число импульсов – 1, 5, 10 и 50) на топографию поверхности и структурно-фазовое состояние приповерхностного слоя субмикрорекристаллических титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6. Поверхность образцов перед облучением предварительно подвергали механической шлифовке и полировке. Показано, что после облучения на поверхности сплавов формируются поверхностные дефекты – кратеры различных форм и геометрии диаметром от долей микрометра до 80–100 мкм. При этом зеренная структура в приповерхностном слое становится более однородной по размерам и степени равноосности зерен. Для исходного состояния титанового сплава ВТ1-0 характерна достаточно однородная структура, средний размер зерен ~0,31 мкм, для сплава ВТ6 ~0,9 мкм. После одного импульса облучения в приповерхностном слое сплава ВТ1-0 (при $j \sim 3$ Дж/см²) наблюдается рост зерен в поперечном направлении до 0,54 мкм, а у сплава ВТ6 ($j \sim 1$ Дж/см²) размер зерна уменьшается до ~0,54 мкм. После воздействия 50 импульсов средний размер зерна в приповерхностном слое достигает ~2,2 мкм для сплава ВТ1-0 и ~1,6 мкм для ВТ6. Стоит отметить, что для обоих сплавов уже после воздействия 1 импульса мощного ионного пучка формируется достаточно однородная зеренная структура с равноосными зернами.

Ключевые слова: титановые сплавы, мощные ионные пучки, кратеры.

Жидков М.В. – канд. техн. наук, мл. науч. сотр. Центра наноструктурных материалов и нанотехнологий НИУ «БелГУ» (308034, Белгород, ул. Королева, 2а, к. 6). E-mail: zhidkov@bsu.edu.ru.

Лигачев А.Е. – докт. физ.-мат. наук, проф., вед. науч. сотр. лаборатории электрофизических исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН (119991, Москва, ул. Вавилова, 38). E-mail: carbin@yandex.ru.

Колобов Ю.Р. – докт. физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой наноматериалов и нанотехнологий НИУ «БелГУ» на базе Научного центра РАН в г. Черноголовке, зав. лабораторией Института проблем химической физики РАН (142432, Московская обл., г. Черноголовка, пр. акад. Семенова, 1). E-mail: kolobov@_bsu.edu.ru.

Потемкин Г.В. – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Института физики высоких технологий Томского политехнического университета (634050, г. Томск, ул. Ленина, 2а). E-mail: ep.gvp@yandex.ru.

Ремнев Г.Е. – докт. техн. наук, проф., зав. лабораторией Института физики высоких технологий Томского политехнического университета. E-mail: remnev06@mail.ru.

Для цитирования: Жидков М.В., Лигачев А.Е., Колобов Ю.Р., Потемкин Г.В., Ремнев Г.Е. Влияние мощных ионных пучков на топографию поверхности и структуру приповерхностного слоя субмикрорекристаллических титановых сплавов. *Изв. вузов. Порошковая металлургия и функц. покрытия*. 2018. No. 4. С. 82–91.
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-4-82-91.

Zhidkov M.V., Ligachev A.E., Kolobov Yu.R., Potemkin G.V., Remnev G.E.

Effect of high-power ion beams on the surface topography and structure of submicrocrystalline titanium alloy subsurface layers

The study covers the topography and structural phase state of VT1-0 and VT6 submicrocrystalline titanium alloy subsurface layers irradiated by high power pulsed carbon ion beams (ion energy is 250 keV, pulse duration is ~100 ns, pulse current density is 150–200 A/cm²; surface energy density of a single pulse is $j \sim 3$ J/cm² when irradiating VT1-0 titanium alloy samples and $j \sim 1$ J/cm² when processing VT6 titanium alloy samples; pulse number is 1, 5, 10, and 50). The surface of samples was subjected

to preliminary mechanical grinding and polishing before irradiation. It was shown that surface defects are formed on the surface of the alloys after irradiation, namely craters of different shapes and geometries with a diameter from fractions of a micron to 80–100 μm . At the same time, the grain structure in the subsurface layer becomes more homogeneous in terms of grain size and equiaxial properties. The initial state of titanium alloys is characterized by a fairly homogeneous structure with an average grain size of $\sim 0,31 \mu\text{m}$ for VT1-0 and $\sim 0,9 \mu\text{m}$ for VT6. After one irradiation pulse, grain growth to $0,54 \mu\text{m}$ in the transverse direction is observed in the subsurface layer of the VT1-0 alloy ($j \sim 3 \text{ J/cm}^2$), while grain size decreases to $\sim 0,54 \mu\text{m}$ in the VT6 alloy ($j \sim 1 \text{ J/cm}^2$). After 50 pulses, the average grain size in the subsurface layer reaches $\sim 2,2 \mu\text{m}$ for the VT1-0 alloy and $\sim 1,6 \mu\text{m}$ for VT6. It should be noted that a rather uniform structure with equiaxed grains is formed as early as after treating with 1 high power ion beam pulse.

Keywords: titanium alloys, high power ion beams, craters.

Zhidkov M.V. – Cand. Sci. (Tech.), junior researcher of the Centre «Nanostructural materials and nanotechnology», Belgorod State National Research University (308034, Russia, Belgorod, Korolev str., 2a, build. 6). E-mail: zhidkov@bsu.edu.ru.

Ligachev A.E. – Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof., leading researcher of the Laboratory of electrophysical investigations, Prokhorov General Physics Institute Russian Academy of Sciences (119991, Russia, Moscow, Vavilov str., 38). E-mail: carbin@yandex.ru.

Kolobov Yu.R. – Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof., head of the Department of the nanomaterials and nanotechnologies of the Belgorod State National Research University on the basis of the Scientific Centre of Russian Academy of Sciences (RAS) in Chernogolovka, head of the Laboratory of the physico-chemical engineering of composite materials of the Institute of Problems of Chemical Physics of RAS (142432, Russia, Moscow region, Chernogolovka, Academican Semenov pr., 1). E-mail: kolobov@bsu.edu.ru.

Potemkin G.V. – Cand. Sci. (Phys.-Math.), senior researcher, Institute of High Physics Technologies of Tomsk Polytechnic University (634050, Russia, Tomsk, Lenin str., 2a). E-mail: ep.gvp@yandex.ru.

Remnev G.E. – Dr. Sci. (Tech.), prof., head of the Laboratory, Institute of High Physics Technologies of Tomsk Polytechnic University. E-mail: remnev06@mail.ru.

Citation: Zhidkov M.V., Ligachev A.E., Kolobov Yu.R., Potemkin G.V., Remnev G.E. Effect of high-power ion beams on the surface topography and structure of submicrocrystalline titanium alloy subsurface layers. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2018. No. 4. P. 82–91 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-4-82-91.

Введение

Титан и его сплавы к настоящему времени являются одними из важнейших конструкционных и функциональных материалов. Широкое распространение титановых сплавов в авиации, судостроении, химической промышленности и медицине обусловлено выгодным сочетанием высоких механических свойств и малого удельного веса, а также высокой коррозионной стойкостью. Тем не менее ответственные сферы применения титановых сплавов требуют дальнейшего повышения их эксплуатационных характеристик. Известно, что эксплуатационные свойства изделий из металлических материалов, в том числе титана и его сплавов, во многом определяются качеством обработки их поверхности и состоянием приповерхностных слоев. Одним из перспективных направлений в области создания новых технологий обработки материалов является поверхностная модификация металлов и сплавов мощными импульсными пучками ускоренных ионов (МИП) [1–3].

Изучение взаимодействия мощных импульсных пучков заряженных частиц с металлическими материалами имеет давнюю историю. Пионерские исследования по обработке инструментальных сплавов мощным импульсным пучком ионов углерода (ускоритель «ТОНУС») были выполнены

в 1981 г. в НИИ ядерной физики при Томском политехническом институте [1, 2]. Тогда в качестве мишени была выбрана инструментальная сталь Р6М9. Далее были начаты эксперименты по облучению как чистых металлов — бериллия, армко-железа, меди электролитической чистоты, титана, монокристаллов алюминия, так и сталей различных марок, а также твердых сплавов [3–6]. Целью этих исследований являлось изучение возможности технологического применения мощных импульсных пучков электронов и ионов для изменения не только структурно-фазового состояния поверхности и приповерхностного слоя, но и физико-механических и физико-химических свойств изделий из металлов и сплавов. В последующих работах как отечественных, так и зарубежных ученых были продолжены эксперименты по исследованию процессов, связанных с перестройкой структуры, физико-химическими превращениями и изменением топографии поверхности и приповерхностных слоев материалов после воздействия МИП, а также показана возможность улучшения комплекса эксплуатационных характеристик различных металлов и сплавов после такой поверхностной обработки [7–14]. Несмотря на продолжающееся активное развитие этого направления,

на сегодняшний день многие фундаментальные вопросы взаимодействия МИП с металлическими материалами остаются недостаточно изученными. В частности, важным вопросом является установление механизма образования микрократеров на поверхности металлических и полупроводниковых материалов, который до сих пор не ясен и детально экспериментально не исследован. Также практически не изучены особенности влияния наносекундных импульсных МИП на поверхностные и приповерхностные слои субмикроструктурных и наноструктурированных металлов и сплавов, которые, как известно, обладают низкой термической стабильностью структуры и свойств.

Целью данной работы являлось исследование особенностей изменения топографии поверхности и структуры приповерхностных слоев титановых субмикроструктурных сплавов после воздействия мощного импульсного ионного пучка.

Материал и методы исследования

Для исследования были выбраны субмикроструктурные (СМК) титановые сплавы ВТ1-0 и ВТ6, полученные сочетанием методов продольной и поперечно-винтовой прокатки. Поверхность образцов перед облучением предварительно подвергали механической шлифовке и полировке до «зеркального блеска» на установке «LaboPol-5» (Struers, Дания) с применением абразивной бумаги и алмазных суспензий.

Облучение мощным импульсным ионным пучком (МИП), состоящим из ионов углерода и примеси ионов водорода, проводили на технологическом ускорителе ТЕМП в фокусирующей геометрии плоского диода (Томский политехнический университет) при следующих режимах: энергия ионов — 250 кэВ, длительность импульса ~100 нс на полувысоте, плотность тока в импульсе — 150÷200 А/см² (плотность тока в рабочей области пучка изменялась сравнительно слабо — в пределах 20 %; на расстоянии >2 см от центра пучка спад плотности тока происходил более резко). Давление остаточных газов внутри камеры находилось в пределах $(3\div4)\cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Значение поверхностной плотности энергии одиночного импульса составляло $j \sim 3$ Дж/см² при облучении образцов титанового сплава ВТ1-0 и $j \sim 1$ Дж/см² при обработке образцов титанового сплава ВТ6. Число импульсов равнялось 1, 5, 10 и 50. Стабильность режимов облучения от импульса к импульсу обуславливается

в основном разбросом ускоряющего напряжения на диоде и, соответственно, разбросом плотности ионного тока в магнитоизолированном диоде. В совокупности эти и, в меньшей степени, другие факторы определяют стабильность параметров плотности тока от импульса к импульсу в пределах ± 10 %. Следует отметить, что применяемый в работе метод плазмообразования в диоде [1] не приводит к снижению плотности тока и ее разбросу с увеличением числа импульсов после серии тренировочных выстрелов.

Исследование топографии поверхности, структурно-фазового состояния и кристаллографической текстуры приповерхностных слоев титановых сплавов проводили с помощью растрового электронного микроскопа «Quanta 600» (FEI, Нидерланды), в том числе с использованием методики автоматического анализа картин дифракции обратно-рассеянных электронов (ДОРЭ-анализ).

Результаты и их обсуждение

После воздействия 1 импульса МИП на поверхности титановых сплавов формируются поверхностные дефекты типа кратеров различных форм и размеров (рис. 1). Так, на поверхности титанового сплава ВТ1-0 в основном преобладают одиночные одно- (рис. 1, б) и многокольцевые (рис. 1, в) кратеры, имеющие область «наплыва» расплавленного материала в зоне воздействия МИП в виде кольца (выделено штриховой линией). Структура поверхности таких кратеров практически не отличается от структуры поверхности наплыва, при этом в центре кратера после воздействия МИП может образовываться как отверстие округлой формы (глубиной не более 100—200 нм), так и выступ (рис. 1, б—г). Кратеры могут накладываться друг на друга (рис. 1, г), при этом при многочисленном их наложении на поверхности сплава возникают протяженные поверхностные дефекты (рис. 1, д), в центральной области которых обнаруживаются перемычки и частицы застывшей капельной фазы (рис. 1, е). Данные поверхностные дефекты могут располагаться в линию в виде строчек (рис. 2, а). Строчки из кратеров, как правило, совпадают с направлением деформации при получении материала и направлением шлифования и полирования на последней стадии подготовки образцов титановых сплавов перед их облучением МИП.

Для титанового сплава ВТ1-0 после воздействия 1 импульса МИП средний размер кратеров

составляет ~ 50 мкм, а поверхностная плотность кратеров достигает $\sim 2 \cdot 10^4$ см $^{-2}$.

При облучении титанового сплава ВТ6 одним импульсом с плотностью энергии в пучке $j \sim$

~ 1 Дж/см 2 на поверхности образца образуются микрократеры (рис. 2, б) с существенно меньшим средним размером (~ 8 мкм), при этом плотность кратеров на облученной поверхности составляет

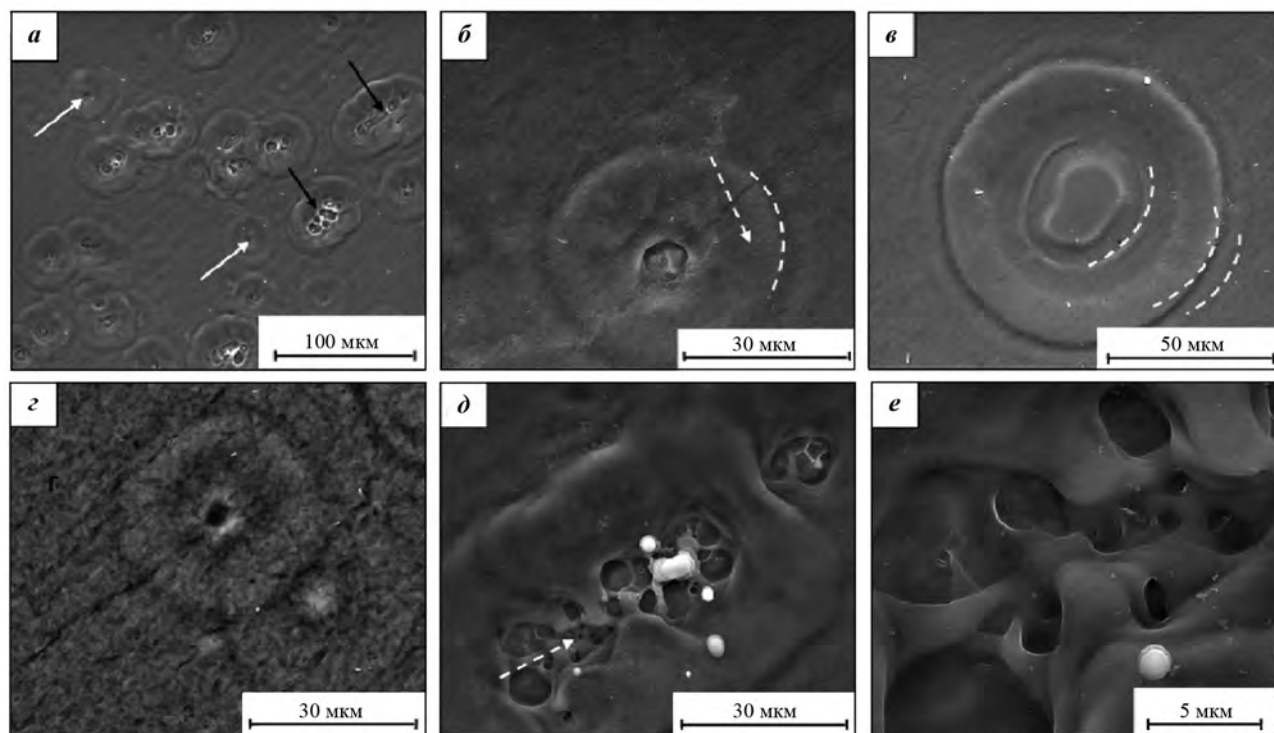


Рис. 1. Полученные с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) изображения кратеров, формирующихся на поверхности титанового сплава ВТ1-0 после воздействия 1 импульса МИП ($j \sim 3$ Дж/см 2)

a — белыми стрелками показаны одиночные кратеры, черными — поверхностные дефекты, состоящие из нескольких кратеров; *б* — белой штриховой стрелкой отмечена зона «напльва»; *в*, *г* — белой штриховой линией выделены кольца кратеров; *д* — белой штриховой стрелкой показана центральная область протяженного дефекта, состоящего из кратеров

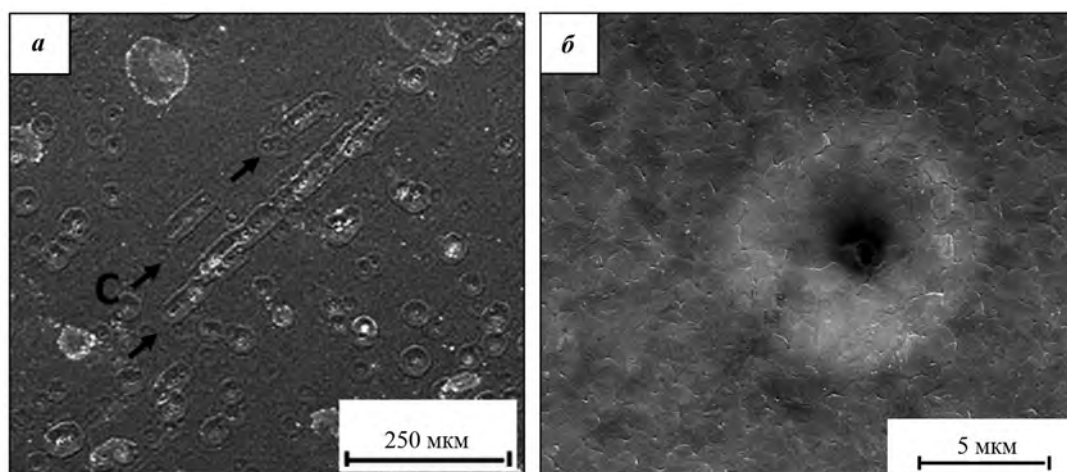


Рис. 2. Поверхность сплава ВТ1-0 после воздействия ($j \sim 3$ Дж/см 2) 1 импульса МИП (*a*) и РЭМ-изображение характерного микрократера, образовавшегося на поверхности титанового сплава ВТ6 после воздействия ($j \sim 1$ Дж/см 2) 1 импульса МИП (*б*)

a — черными стрелками показана строчечность в расположении кратеров

$\sim 5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$. С увеличением числа импульсов до 5 и 10 средний размер кратеров и их поверхностная плотность возрастают (рис. 3, а, б), однако в случае 50 импульсов наблюдаемая поверхностная плотность кратеров существенно снижается (рис. 3, в) (до значения $\sim 10^3 \text{ см}^{-2}$).

У титанового сплава ВТ1-0, напротив, происходит уменьшение поверхностной плотности кратеров, а после воздействия 50 импульсов явные кратеры на поверхности не наблюдаются (рис. 3, г–е).

К настоящему времени существуют различные предположения о природе и механизмах образования кратеров. Согласно [15], вероятным механизмом их возникновения может являться наличие неоднородностей плотности пучка ионов в импульсе, в том числе в результате его расслоения или филаментации. Вследствие этого могут происходить локальное плавление, вскипание и испарение приповерхностного слоя материала. С увеличением плотности тока неоднородность плотности пучка ионов в импульсе повышается, что в свою очередь обуславливает рост плотности кратеров и их размеров [16–18]. Когда на облучаемую поверхность действует импульс заряженных частиц с плотностью мощности на поверхности выше 104 Вт/см^2 , то в зависимости от теплофизи-

ческих свойств облучаемой мишени в месте облучения возможно образование расплава. Его характерное время существования сопоставимо с длительностью импульса излучения (для импульсов длительностью менее 1 мс), т.е. много меньше времени формирования кратеров. А когда облучение осуществляется серией последовательных импульсов, то на поверхности происходит «смывание» (частичное или полное) кратеров, появившихся под воздействием предыдущего импульса, за счет воздействия последующего импульса поcoolения (рис. 3, г–е).

Также образование кратеров может быть связано с присутствием газовых примесей в материале и выходом на расплавленную поверхность пузырьков газа [19, 20]. Но в нашем случае в исследованных образцах наличие крупной и мелкой пористости, заполненной газами, установлено не было и такой механизм формирования кратеров маловероятен, но в принципе возможен. Авторы работы [21] рассматривают также возможность влияния на процесс образования кратеров импульса отдачи, возникающего при локальном плавлении и испарении мишени. Такой механизм нельзя исключить, но строгим экспериментом он пока не подтвержден.

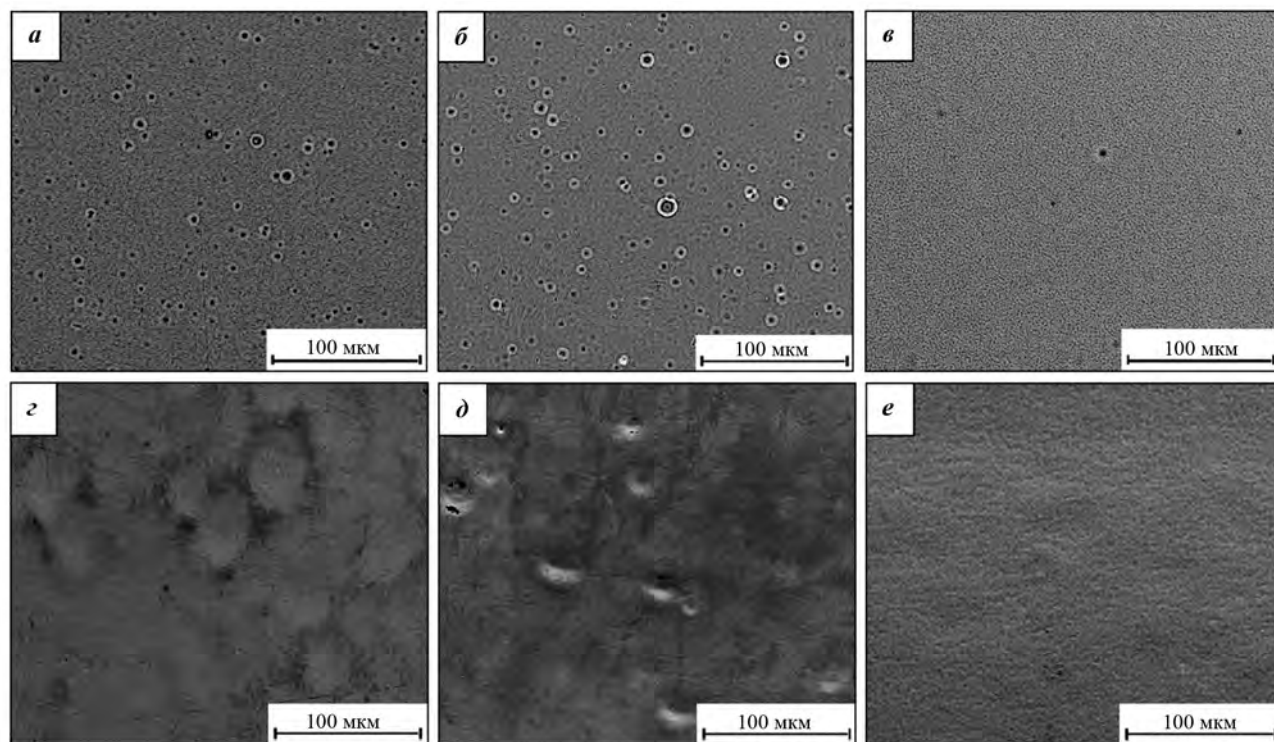


Рис. 3. РЭМ-изображения топографии поверхности титановых сплавов ВТ6 (а–в) и ВТ1-0 (г–е) после воздействия 5, 10 и 50 импульсов соответственно

В работе [18] для МИП предложена модель, в которой с использованием теоретических расчетов показано, что при плотности мощности в импульсе $>10^{11}$ Вт/м² кратеры могут формироваться за счет образования плазменного факела с последующим возникновением гравитационных волн и неустойчивости Рихтмайера—Мешкова границы «плазма—расплав». Такой механизм образования кратеров, несомненно, также имеет право на существование.

Авторы [22] провели экспериментальное исследование внутренней структуры кратера на поверхности стали с использованием метода приготовления тонких фольг ионным пучком (известная методика *cross-section*) и их изучением методами аналитической просвечивающей электронной микроскопии. Показано, что приповерхностный слой кратера представлен вытянутыми по направлению к поверхности столбчатыми зёрнами со средним размером (длиной) ~ 2 мкм, при этом коэффициент неравноосности зёрен ($K_{\text{нз}}$) снижается по мере смещения от периферийного кольца кра-

тера к его центральной части. Характер сформированной структуры определенно свидетельствует о протекании процессов плавления и сверхбыстрой кристаллизации в тонком поверхностном слое облучаемого МИП материала в процессе образования кратера.

Кроме изменения топографии поверхности для титановых сплавов выявлено изменение структурного состояния приповерхностных слоев за счет облучения МИП. Для исходного субмикрокристаллического (СМК) состояния титанового сплава ВТ1-0 (рис. 4, а) характерна достаточно однородная структура с $K_{\text{нз}} \sim 2$, средний поперечный размер зёрен составляет $\sim 0,31$ мкм (рис. 4, в). Этот размер зёрен для исходного СМК-состояния сплава ВТ6 (рис. 5, а и 4, з) составляет $\sim 0,9$ мкм при $K_{\text{нз}} \sim 1$.

После облучения МИП с плотностью энергии 3 Дж/см² в приповерхностном слое образца сплава ВТ1-0 наблюдается рост зёрен (рис. 5, а). Их средний размер в поперечном направлении составил $\sim 0,54$ мкм после одного импульса облучения

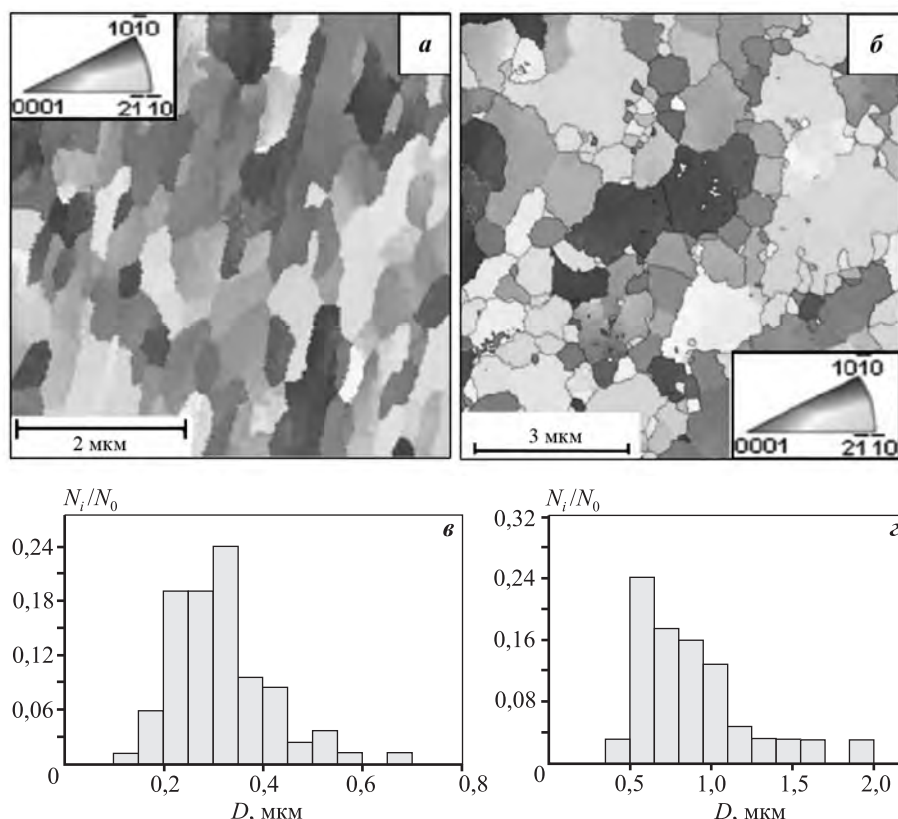


Рис. 4. Структура приповерхностных слоев титановых сплавов ВТ1-0 (а) и ВТ6 (б) в исходном состоянии (зеренная структура в цветовой гамме кристаллографического треугольника ГПУ-решетки титана по данным дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD-анализ)) и гистограммы распределения зёрен по размерам для сплавов ВТ1-0 (в) и ВТ6 (г) в исходном состоянии

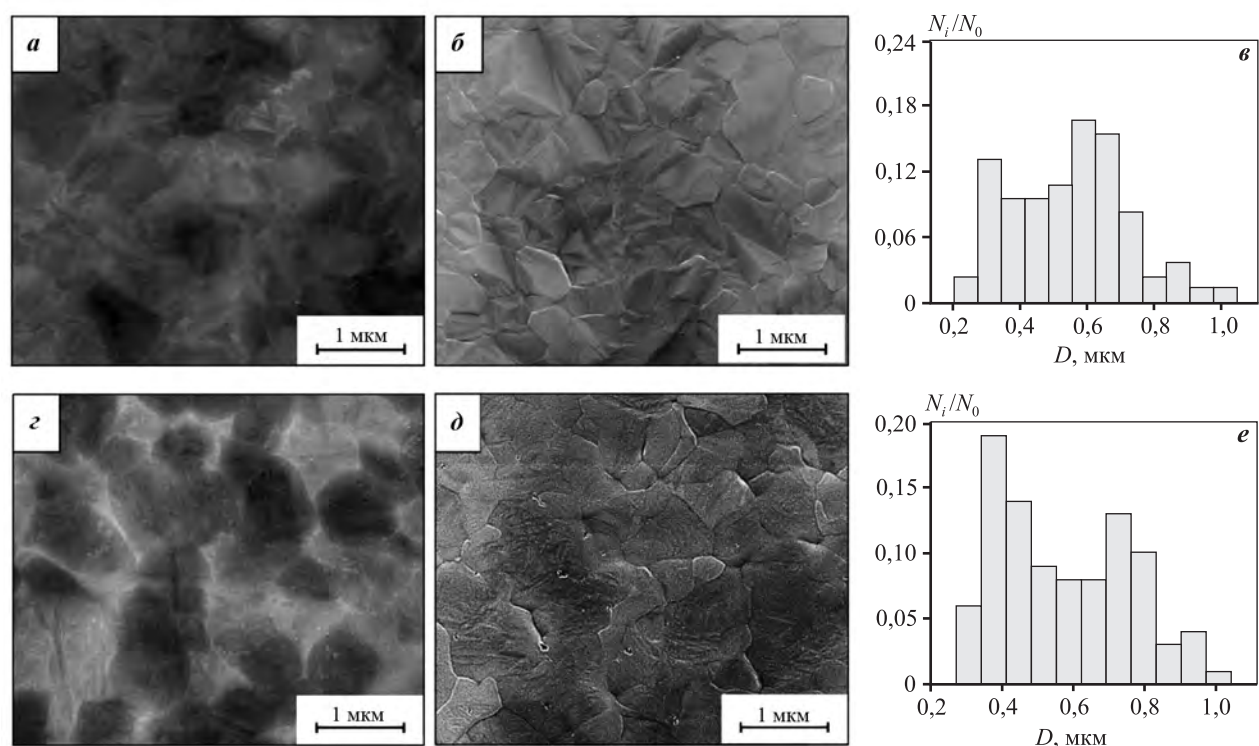


Рис. 5. Структура приповерхностных слоев (РЭМ-изображения) и гистограммы распределения зерен по размерам для титановых сплавов ВТ1-0 (а–в) и ВТ6 (г–е) после воздействия 1 импульса МИП

а, г – детектор обратно-рассеянных электронов; б, д – детектор вторичных электронов

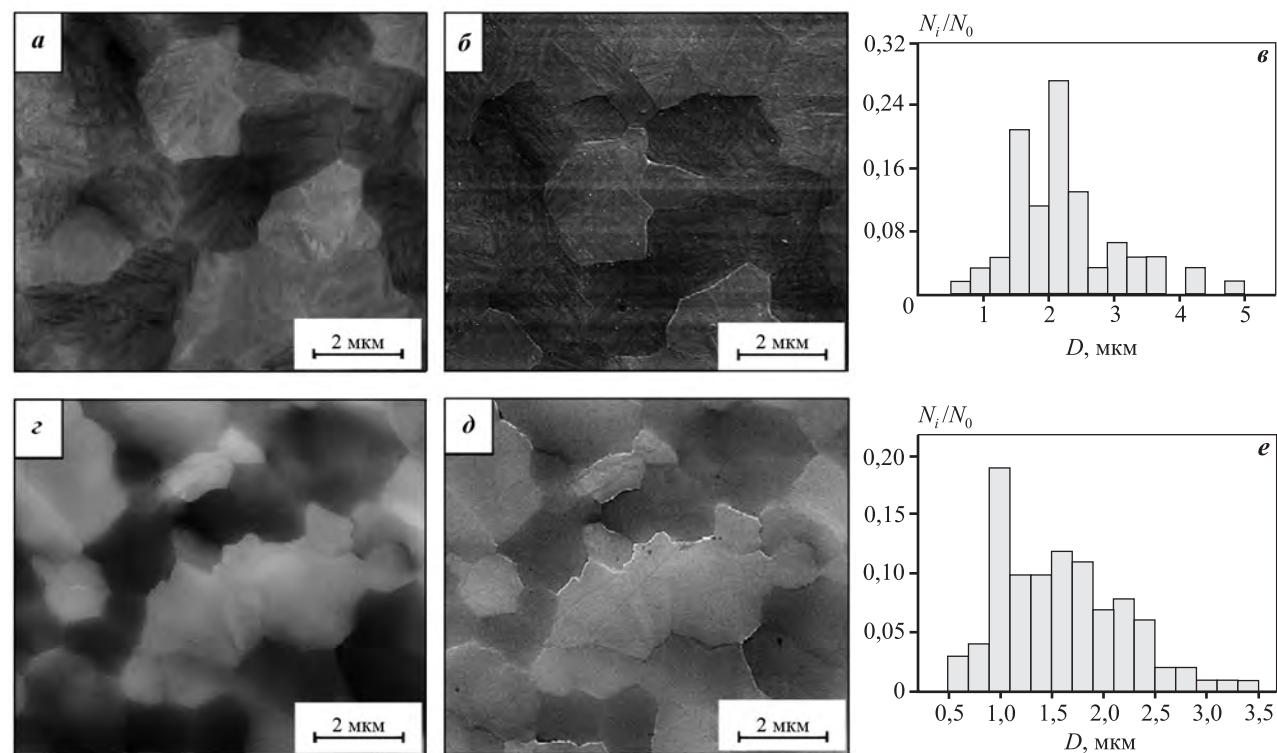


Рис. 6. Структура приповерхностных слоев (РЭМ-изображения) и гистограммы распределения зерен по размерам для титановых сплавов ВТ1-0 (а–в) и ВТ6 (г–е) после воздействия 50 импульсов МИП

а, г – детектор обратно-рассеянных электронов; б, д – детектор вторичных электронов

(рис. 5, в). После облучения одним импульсом МИП с $j = 1$ Дж/см² в приповерхностном слое образца ВТ6 размер зерна уменьшается до значения ~0,54 мкм (рис. 5, г—е). При этом, как видно на РЭМ-изображениях, сделанных в режиме рельефа, имеет место травление границ зерен и их отдельных граней.

После воздействия 50 импульсов (рис. 6) средний размер зерна в приповерхностном слое достигает ~2,2 мкм для сплава ВТ1-0 и ~1,6 мкм — для ВТ6. Стоит отметить, что для обоих сплавов уже после воздействия 1 импульса МИП формируется достаточно однородная зеренная структура с равноосными зернами.

В целом полученные результаты показывают, что возникающие при воздействии МИП тепловые и ударно-волновые процессы могут приводить к существенному изменению структуры поверхности и приповерхностных слоев (в том числе в материалах, предварительно подвергнутых обработке пластической деформацией) с формированием более однородной по размерам и степени равноосности зерен микроструктуры. Обработка МИП открывает перспективы для управляемой инженерии поверхности и формирования поверхностных ультрамелкозернистых (УМЗ), субмикроструктурных (СМК) или наноструктурированных (НС) состояний с заданным размером зерна и улучшенными физико-химическими свойствами. Изменение топографии поверхности за счет такого воздействия, в частности формирование поверхностных дефектов, носит, скорее, нежелательный эффект, поскольку формируемые кратеры могут служить концентраторами напряжений на поверхности или потенциальными источниками ускоренной коррозии [15].

Стоит отметить, что для контролируемого формирования рельефа на поверхности материалов в СМК- и НС-состояниях с пониженной термической стабильностью в случае, когда требуется сохранить нерекристаллизованную микроструктуру приповерхностных слоев, наилучшим образом подходит лазерное воздействие ультракороткими (фемто- и наносекундной длительности) импульсами. Несмотря на то, что при воздействии таких импульсов могут достигаться колоссальные значения пиковой плотности мощности (например, в нашем эксперименте указанные величины составляют ~10⁷ Вт/см² для МИП и 10¹³ Вт/см² для фемтосекундного лазерного облучения (ФЛО)), при такой длительности импульсов

глубина зоны термического влияния чрезвычайно мала. В исследованиях, проведенных нами ранее на СМК-сплавах ВТ6 и ВТ1-0 при близких величинах плотностей энергий (~1 и 3 Дж/см²), после воздействия ФЛО зоны термического влияния в приповерхностных слоях обнаружено не было [23, 24].

Выводы

1. Облучение поверхности титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6 мощным импульсным пучком ионов углерода приводит к формированию поверхностных дефектов в виде кратеров различных форм и геометрии диаметром от долей микрометра до 80—100 мкм.

2. Обработка МИП полученных воздействием пластической деформацией субмикроструктурных титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6 вызывает существенное изменение структуры поверхности и приповерхностных слоев с формированием более однородной по размерам и степени равноосности зерен микроструктуры.

Работа выполнена по программе РАН «Фундаментальные основы импульсной сильноточной эмиссионной электроники» (облучение образцов МИП, исследования образцов методом РЭМ) и при поддержке государственного задания Министерства образования вузам № 3.3144.2017/4.6 (анализ зеренной структуры, сравнительное исследование зон термического влияния при МИП и ФЛО).

Литература/References

1. Логачев Е.И., Ремнев Г.Е., Усов Ю.П. Ускорение ионов из взрывоэмиссионной плазмы. *Письма в ЖТФ*. 1980. Т. 22. No. 6. С. 1404—1406.
Logachev E.I., Remnev G.E., Usov Yu.P. The acceleration of ions from an explosive-emission-plasma. Pis'ma v ZhTF. 1980. Vol. 22. No. 6. P. 1404—1406 (In Russ.).
2. Диденко А.Н., Кузнецов Б.И., Ремнев Г.Е. Исследование влияния облучения сильноточными электронными и ионными пучками на поверхностные свойства инструментальных сталей. *Тез. докл. Всесоюз. конф. по применению электронно-ионной технологии в народном хозяйстве*. Тбилиси: НИИЭТ, 1981. С. 110—111.
Didenko A.N., Kuznetsov B.I., Remnev G.E. Study of the influence of high-current electron and ion beams irradiation on the surface properties of tool steels. In: Theses of reports of the All-Union conference on the use of electron-ion technology in the national economy. Tbilisi: NIET, 1981. P. 110—111 (In Russ.).

3. Диденко А.Н., Ремнев Г.Е., Лигачев А.Е. Процессы упрочнения и повышения эксплуатационных характеристик сплавов, облученных мощными ионными пучками. *Тез. докл. VI Всесоюз. симп. по сильноточной импульсной электронике* (Томск, 27—29 мая 1986 г.). Томск: Институт сильноточной электроники СО АН СССР, 1986. С. 163—165.
Didenko A.N., Remnev G.E., Ligachev A.E. The processes of strengthening and improving the performance of alloys irradiated with powerful ion beams. In: *Abstracts of the VI All-Union symposium on high-current electronics* (Tomsk, 27—29 May 1986). Tomsk: Institute of high-current electronics SB USSR Academy of Sciences, 1986. P. 163—165 (In Russ.).
4. *Didenko A.N., Remnev G.E., Chistjakov S.A., Ligachev A.E.* Definition of recoil pulse and removal of target mass under effect of high power beams (HPIB). In: *Proc. 6-th Int. conf. of high-power particle beams* (Kobe, Japan, 9—12 June 1986). P. 77—81.
5. Погребняк А.Д., Ремнев Г.Е., Чистяков С.А., Лигачев А.Е. Модификация свойств металлов под действием мощных ионных пучков. *Изв. вузов. Физика*. 1987. Т. 30. No. 1. С. 52—65.
Pogrebnyak A.D., Remnev G.E., Chistyakov S.A., Ligachev A.E. Modification of metal properties under the action of high-power ion beams. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 1987. Vol. 30. No. 1. P. 52—65 (In Russ.).
6. *Pogrebnyak A.D., Remnev G.E., Kurakin I.B., Ligachev A.E.* Structural, physical and chemical changes induced in metals and alloys exposed to high power ion beams. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B*. 1989. Vol. 36. Iss. 3. P. 286—305.
7. Диденко А.Н., Лигачев А.Е., Куракин И.Б. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. М.: Энергоатомиздат, 1987.
Didenko A.N., Ligachev A.E., Kurakin I.B. Effects of charged particle beams on the surface of metals and alloys. Moscow: Energoatomizdat, 1987 (In Russ.).
8. Валеев А.Н., Погребняк А.Д., Плотников С.В. Радиационно-механические эффекты в твердых телах при облучении высокоинтенсивными импульсными электронными и ионными пучками. Усть-Каменогорск: ВКТУ, 1998.
Valeev A.N., Pogrebnyak A.D., Plotnikov S.V. Radiation-mechanical effects in solids under high-intensity pulsed electron and ion beams. Ust'-Kamenogorsk: VKTU, 1998 (In Russ.).
9. Шулов В.А., Ремнев Г.Е., Кащеев В.Н. Влияние ионно-лучевой обработки мощными импульсными пучками на физико-химическое состояние поверхностных слоев и усталостную прочность сплава ЭП718И. *Физика и химия обраб. материалов*. 1992. No. 6. P. 28—35.
Shulov V.A., Remnev G.E., Kashcheev V.N. Effect of ion-beam treatment with powerful pulsed beams on the physical and chemical state of the surface layers and the fatigue strength of the EP718I alloy. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 1992. No. 6. P. 28—35 (In Russ.).
10. *Shulov V.A., Nochovnaya N.A., Remnev G.E., Pellerin F., Monge-Cadet P.* High-power ion beam treatment application for properties modification of refractory alloys. *Surf. Coat. Technol.* 1998. Vol. 99. P. 74—81.
11. Погребняк А.Д., Иванов Ю.Ф., Лебедь А.Г., Вальяев А.Н., Рэнк Т., Томпсон М.О., Жао В. Результат воздействия интенсивного импульсного ионного пучка на свойства углеродистой и нержавеющей сталей. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2000. Т. 22. No. 10. P. 18—24.
Pogrebnyak A.D., Ivanov Yu.F., Lebed' A.G., Valyaev A.N., Renk T., Tompson M.O., Zhao V. The result of intensive pulsed ion beam action on the properties of carbon and stainless steel. *Metallofizika i noveishie tekhnologii*. 2000. Vol. 22. No. 10. P. 18—24 (In Russ.).
12. *Xian-xiu M., Sheng-zhi H., Teng-cai M., Ying-min W., Zhen-min L.* Microstructure and wear resistance of high-speed steel treated with intense pulsed ion beam. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B*. 2005. Vol. 239. P. 152—158.
13. *Mei X.X., Sun W.F., Hao S.Z., Ma T.C., Dong C.* Surface modification of high-speed steel by intense pulsed ion beam irradiation. *Surf. Coat. Technol.* 2007. Vol. 201. P. 5072—5076.
14. *Wang X., Lei M.K., Zhang J.S.* Surface modification of 316L stainless steel with high-intensity pulsed ion beams. *Surf. Coat. Technol.* 2007. Vol. 201. P. 5884—5890.
15. Погребняк А.Д., Кульментьева О.П. Структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях и свойства металлических материалов после импульсного воздействия пучков частиц. *Физическая инженерия поверхности*. 2003. Т. 1. No. 2. С. 110—136.
Pogrebnyak A.D., Kul'mentieva O.P. Structure-phase transformations in near-surface layers and properties of metal materials after pulse influence of particle beams. *Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti*. 2003. Vol. 1. No. 2. P. 110—136 (In Russ.).
16. Анишчик В.М., Углов В.В. Модификация инструментальных материалов ионными и плазменными пучками. Минск: Изд-во БГУ, 2003.
Anishchik V.M., Uglov V.V. Modification of instrumental materials by ion and plasma beams. Minsk: Izd-vo BGU, 2003 (In Russ.).
17. Коротаев А.Д., Тюменцев А.Н., Почивалов Ю.И., Овчин-

- ников С.В., Ремнев Г.Е., Исаков И.Ф. Фазовоструктурное состояние поверхностного слоя металлических мишеней при воздействии мощных ионных пучков. *Физика металлов и металловедение*. 1996. Т. 81. No. 5. С. 118—127.
- Korotaev A.D., Tyumentsev A.N., Pinzhin Yu.P., Remnev G.E. Features of the morphology, defect substructure, and phase composition of metal and alloy surfaces upon high-power ion beam irradiation. *Surf. Coat. Technol.* 2004. Vol. 185. P. 38—49.
18. Volkov N.B., Maier A.E., Yalovets A.P. On the mechanism of cratering on solid surfaces exposed to an intense charged particle beam. *Techn. Phys. Russ. J. Appl. Phys.* 2002. Vol. 47. No. 8. P. 968—977.
 19. Бреховских В.Ф., Рыкалин Н.Н., Углов А.А. О возможном влиянии содержания газов в металлах на зону воздействия луча лазера. *ДАН СССР*. 1970. Т. 190. No. 5. С. 1059—1062.
Brekhovskikh V.F., Rykalin N.N., Uglov A.A. On the possible influence of gas content in metals on the laser beam area. *DAN SSSR*. 1970. Vol. 190. No. 5. P. 1059—1062 (In Russ.).
 20. Demidov B.A., Efremov V.P., Ivkin M.V., Ivonin I.A., Petrov V.A., Fortov V.E. Determination of the dynamic characteristics of aerogels in the energy-release zone of a high-power electron beam. *Techn. Phys. Russ. J. Appl. Phys.* 1998. Vol. 43. No. 10. P. 1239—1246.
 21. Korotaev A.D., Tyumentsev A.N., Pinzhin Yu.P., Remnev G.E. Features of the morphology, defect substructure, and phase composition of metal and alloy surfaces upon high-power ion beam irradiation. *Surf. Coat. Technol.* 2004. Vol. 185. P. 38—49.
 22. Zhidkov M., Ligachev A.E., Potemkin G.V., Manokhin S.S., Remnev G.E., Kolobov Yu.R. Study of the structure of crater at the surface of 12Cr18Ni10Ti steel irradiated by high-power pulsed ion beam. *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2018. Vol. 9. No. 3. P. 376—378.
 23. Kolobov Yu.R., Golosov E.V., Vershinina T.N., Zhidkov M.V., Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Ligachev A.E. Structural transformation and residual stresses in surface layers of alpha plus beta titanium alloys nanotextured by femtosecond laser pulses. *Appl. Phys. A*. 2015. Vol. 119. Iss. 1. P. 241—247.
 24. Kolobov Yu.R., Zhidkov M.V., Golosov E.V., Vershinina T.N., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Ionin A.A., Ligachev A.E. Phase composition and structure of femtosecond laser produced oxide layer on VT6 alloy surface. *Laser Phys. Lett.* 2016. Vol. 1. No. 7. Paper. 076103.