

## Влияние мощного импульсного ионного пучка на топографию поверхности тантала

А.Е. Лигачев<sup>1,\*</sup>, М.В. Жидков<sup>2</sup>, Ю.Р. Колобов<sup>2</sup>, Г.В. Потемкин<sup>4</sup>, М.В. Лукашова<sup>3</sup>,  
Г.Е. Ремнев<sup>4</sup>, С.К. Павлов<sup>4</sup>, В.А. Тарбоков<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия

<sup>3</sup>TESCAN, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>Томский политехнический университет, Томск, Россия

\*carbin@yandex.ru

**Аннотация.** Поверхность тантала облучали мощным импульсным ионным пучком на ускорителе ТЕМП Томского политехнического университета (Сп<sup>+</sup>, ускоряющее напряжение 200±10 кВ, плотность энергии в импульсе 2.6–3 Дж/см<sup>2</sup>). Изменение топографии поверхности тантала после воздействия мощного импульсного ионного пучка исследовали с помощью растровой электронной микроскопии. Изменения рельефа и структуры поверхности образцов Та изучали методом сканирующей электронной микроскопии.

**Ключевые слова:** тантал, мощный импульсный ионный пучок, ионы углерода.

### 1. Введение

Единое понимание механизма возникновения кратеров на поверхности металлов и также кремния после воздействия на них мощных импульсных ионных пучков (МИИП) пока отсутствует [1–11]. Поэтому необходимы дальнейшие экспериментальные исследования, направленные на изучение влияния МИИП на выше названные материалы, имеющих различную температуру плавления. Ранее были выполнены эксперименты по воздействию МИИП ионов углерода на поверхность магния [7], титана и его сплавов [8, 9], нержавеющей стали [10, 11].

В настоящей работе проведены исследования топографии и структуры поверхностного слоя тантала, после воздействия МИИП.

### 2. Методика эксперимента

В качестве объекта исследований был выбран образец тантала (99.9% Та) в виде фольги толщиной 400 мкм (фольга для исследований предоставлена с.н.с. ЦЕНИ ИОФ РАН Ашкинази Е.Е.). Облучение фольги тантала проводили на ускорителе «ТЕМП» [1] потоком ионов С<sup>n+</sup> при ускоряющем напряжении 200±10 кВ, длительности импульса ~100 нс и плотности тока в импульсе 130–150 А/см<sup>2</sup> (2.5–3 Дж/см<sup>2</sup>). Давление остаточных газов внутри камеры составляло 4–5·10<sup>-2</sup> Па. Поверхности обрабатывали 3 и 10 импульсами.

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.

Топографию поверхности тантала после ионно-лучевой обработки исследовали с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа FEI Quanta 600.

### 3. Результаты исследований

Изображение поверхности образца тантала в состоянии поставки и результаты ее энергодисперсионного анализа (ЭДА) представлены на Рис.1. В исходном состоянии рельеф

образцов представлен следами и полосами от прокатки, образовавшимися в процессе изготовления фольги. Согласно данным ЭДА, помимо тантала на поверхности присутствуют кислород и углерод, вероятно являющиеся следами окисления поверхности и загрязнения ее углеродсодержащими соединениями.

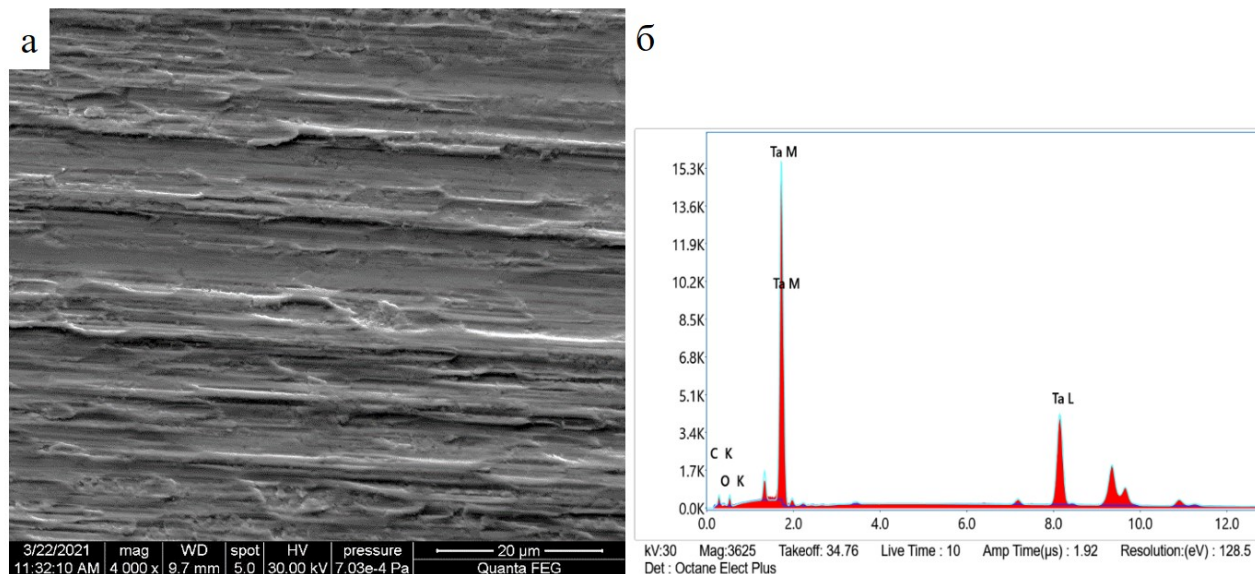


Рис.1. Рельеф (а) и элементный состав (б) поверхности образцов тантала в исходном состоянии.

После обработки МИИП рельеф исходной поверхности сглаживается (Рис.2). После воздействия тремя импульсами происходит формирование микрократеров округлой формы и микротрещин на поверхности тантала (Рис.2в). Стоит отметить, что микрократеры после воздействия 3 импульсов не имеют четко-сформированной границы.

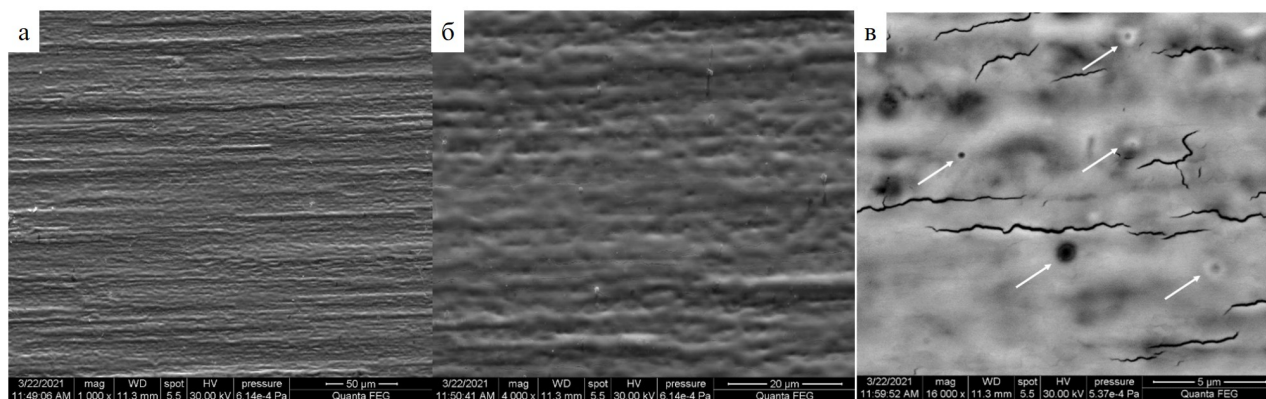


Рис.2. Рельеф поверхности тантала после обработки 3 импульсами МИИП.

После 10 импульсов размер кратеров существенно возрастает, средний диаметр варьируется в диапазоне от 10 до 30 мкм (Рис.3). Большинство наблюдаемых на поверхности кратеров имеют четко-различимую внешнюю границу. В центре кратера после воздействия МИИП может образовываться выступ округлой формы (Рис.3б, черная стрелка), и вокруг центрального выступа могут формироваться отверстия диаметром 1–3 мкм (Рис.3б, белая стрелка). В процессе облучения 10 импульсами возникают двойные кратеры, происходит наложение их друг на друга (Рис.3). В центральной зоне такого двойного кратера могут присутствовать капли застывшего металла размером менее 0.5 мкм (Рис.3б,в).

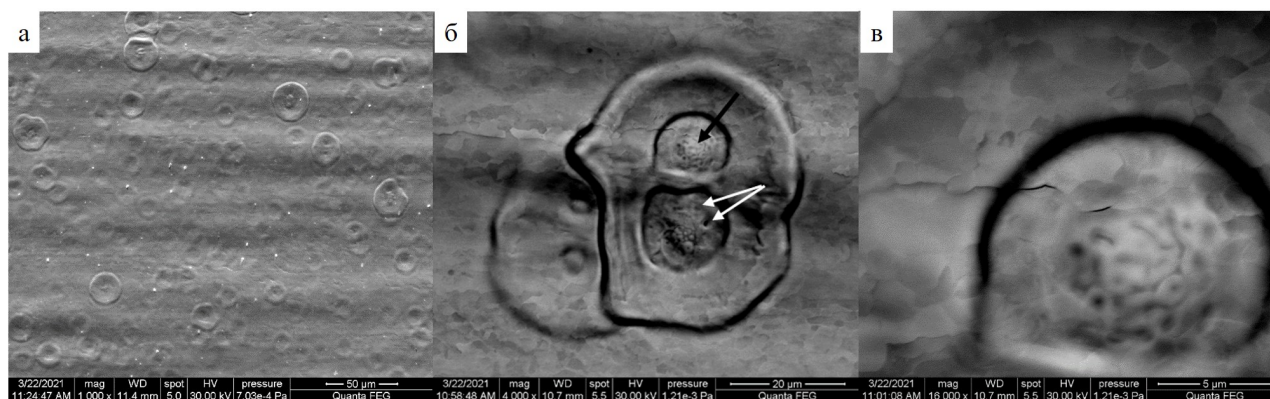


Рис.3. Рельеф поверхности образцов тантала после обработки 10 импульсами МИИП.

Исследование кратеров методом ЭДА не обнаружило различий в элементном составе материала до и после облучения МИИП. Состав центральной и периферийной областей кратеров не отличаются между собой, в центральной области кратеров не обнаружено присутствие включений. Ранее для нержавеющей стали нами было показано, что в центральной области образующихся при воздействии МИИП кратеров присутствуют неметаллические включения на основе титана и серы (сульфиды или карбосульфиды титана), и что данные включения вероятнее всего являются предпочтительным местом для образования кратеров [11]. В то же время, для чистых металлов (титана [8, 9], магния [7]) ранее не обнаруживались изменения элементного состава кратеров, свидетельствующие о присутствии включений и других фаз в местах образования кратеров.

Также, как и для других ранее исследованных металлов и сплавов, с увеличением числа импульсов МИИП в поверхностном слое тантала обнаружено формирование равноосной ультрамелкозернистой структуры (Рис.4).

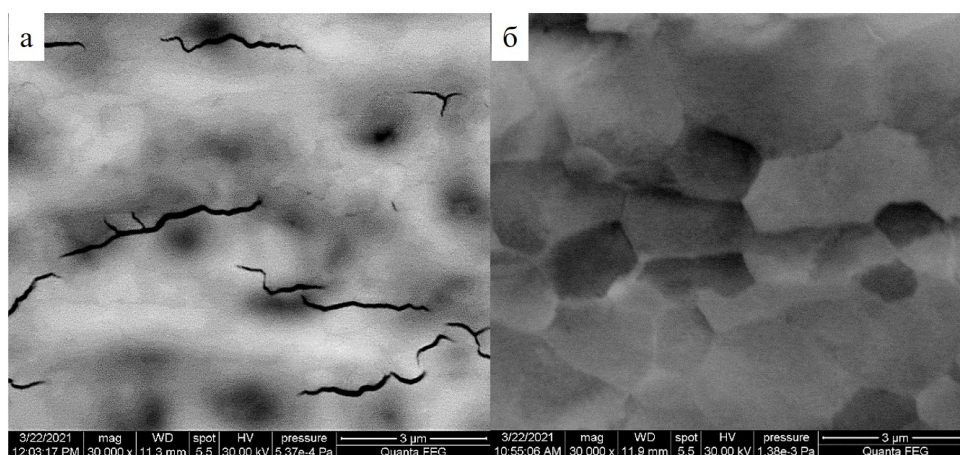


Рис.4. Структура поверхностного слоя тантала после воздействия 3 (а) и 10 (б) импульсов МИИП.

#### 4. Выводы

1. После обработки мощным импульсным ионным пучком (МИИП) на поверхности тантала образуются дефекты в виде кратеров – одинарных и двойных.
2. Элементный состав в пределах поверхности кратера (в центре и на его периферии) и на поверхности необлученного тантала практически остается неизменным.
3. После воздействия МИИП в поверхностном слое тантала формируется ультрамелкозернистая равноосная структура

## 5. Список литературы

- [1] Логачев Е.И., Ремнев Г.Е., Усов Ю.П., *Письма в ЖТФ*, **22**(6), 1404, 1980;
- [2] Диденко А.Н., Кузнецов Б.И., Ремнев Г.Е., *Тез. докл. Всесоюз. конф. по применению электронно-ионной технологии в народном хозяйстве, Тбилиси, Грузия*, 110, 1981.
- [3] Диденко А.Н., Ремнев Г.Е., Лигачев А.Е., *Тез. докл. VI Всесоюз. симп. по сильноточной импульсной электронике, Томск, Россия*, 163, 1986.
- [4] Погребняк А.Д., Ремнев Г.Е., Чистяков С.А., Лигачев А.Е., *Изв. вузов. Физика*, **30** (1), 52, 1987;
- [5] Pogrebnjak A.D., Remnev G.E., Kurakin I.B., Ligachev A.E., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B.*, **36**(3), 286, 1989;
- [6] Remnev G.E., Isakov I.F., Opekounov M.S., Kotlyarevsky G.I., Kutuzov V.L., *Surface and coatings technology*, **96**(1), 103, 1997; doi: 10.1016/S0257-8972(97)00116-3
- [7] Потемкин Г.В., Лигачев А.Е., Жидков М.В., Колобов Ю.Р., Ремнев Г.Е., Газизова М.Ю., Божко С.А., Буреев О.А., *Физика и химия обработки материалов*, **4**, 5, 2015;
- [8] Zhidkov M.V. Ligachev A.E. Kolobov Yu.R. Potemkin G.V., Remnev G.E., *Russian journal of non-ferrous metals*, **60**(5), 590, 2019; doi: 10.3103/S1067821219050195
- [9] Жидков М.В., Колобов Ю.Р., Лигачев А.Е., Потемкин Г.В., Газизова М.Ю., Ремнев Г.Е., *Научные труды IV международной научной конференции “Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении” (FRITME-2015)*, Москва, Россия, 101, 2015.
- [10] Ligachev A.E., Kolobov Y.R., Zhidkov M.V., Golosov E.V., Potemkin G.V., Remnev G.E., *Inorganic Materials: Applied Research*, **7**(3), 325, 2016; doi: 10.1134/S207511331603014X
- [11] Zhidkov M.V., Ligachev A.E., Golosov E.V., Gazizova M.Y., Pavlov S.K., Remnev G.E., *Vacuum*, **198**, 110852, 2022; doi: 10.1016/j.Vacuum.2021.110852