

ЭВОЛЮЦИЯ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НИОБИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

В.Н. Пименов¹⁾, И.В. Боровицкая¹⁾, А.С. Демин¹⁾, Н.А. Епифанов^{1), 2)}, С.В. Латышев^{1), 3)},
С.А. Масляев¹⁾, Е.В. Морозов¹⁾, И.П. Сасиновская¹⁾, Г.Г. Бондаренко²⁾, А.И. Гайдар⁴⁾

¹⁾Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Ленинский пр. 49,
119334 Москва, Россия, pimval@mail.ru, symp@imet.ac.ru, casha@bk.ru,

mophix94@gmail.com, maslyayev@mail.ru, lieutenant@list.ru, porfirievna@mail.ru

²⁾Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
ул. Мясницкая 20, 101000 Москва, Россия, gbondarenko@hse.ru

³⁾Московский технический университет связи и информатики,
ул. Авиамоторная 8а, 111024 Москва, Россия, latyshevsv@rambler.ru

⁴⁾Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий,
ул. Малая Пионерская 12, 115054 Москва, Россия, niipmt@mail.ru

Представлены результаты исследования состояния поверхностного слоя ниобия после воздействия импульсных потоков ионов гелия (ИГ) и гелиевой плазмы (ГП) в установке Плазменный фокус (ПФ). Плотность мощности потоков ИГ составляла $q_i \sim 10^8$ Вт/см², длительность импульсов $\tau_i \approx 30 - 50$ нс; для потоков ГП эти параметры равны $q_p \sim 10^7$ Вт/см² и $\tau_p \approx 100$ нс.

При воздействии указанных потоков энергии происходила эрозия материала ионно-атомным механизмом испарения. В центральной части зоны облучения под действием наиболее высокоэнергичных потоков ИГ и ГП этот процесс протекал несколько более интенсивно. Толщина слоя, испаряемого за один импульсный разряд, составляла ~ 0.1 мкм и была примерно такая же, как у вольфрама при воздействии на него ионов дейтерия и дейтериевой плазмы в близких условиях облучения.

После импульсного воздействия на образцы Nb радиационных потоков наблюдается, помимо эрозии, плавление поверхностного слоя с образованием волнообразного рельефа поверхности, содержащей газонаполненные блистеры, а также блистеры с разрушенными оболочками. Происхождение блистеров связано с формированием комплексов на основе соединения имплантированного гелия с вакансиями и атомами примесей внедрения (С, О, N и др.) и последующим их ростом и коагуляцией в жидкой фазе, которая возникала при расплавлении поверхностного слоя Nb падающими импульсными потоками энергии.

Во многих участках облученного поверхностного слоя наблюдаются микротрещины, образованные под действием термических напряжений, развивающихся на стадии охлаждения и кристаллизации жидкой фазы. Часть микротрещин находится в зоне расположения блистеров, другая часть совпадает с линиями скольжения материала, возникающими под действием высокоскоростной пластической деформации. Сетка таких микротрещин создает на поверхности Nb блочную структуру.

В облученном поверхностном слое ниобия обнаружены зоны столбчатых кристаллов и ячеистая микроструктура поверхности, в которой размер ячеек составляет $\sim 100-200$ нм. Численным моделированием показано, что в указанных зонах затвердевание расплава протекало посредством направленной кристаллизации с высокой скоростью, которая вблизи облученной поверхности достигала ~ 35 м/с.

Ключевые слова: импульсные потоки; гелиевая плазма; ионы гелия; плазменный фокус.

EVOLUTION OF THE STATE OF THE SURFACE LAYER OF NIOBIUM UNDER IMPACT OF PULSE BEAM-PLASMA FLOWS

V.N. Pimenov¹⁾, I.V. Borovitskaya¹⁾, A.S. Demin¹⁾, N.A. Epifanov^{1), 2)}, S.V. Latyshev^{1), 3)},
S.A. Maslyayev¹⁾, E.V. Morozov¹⁾, I.P. Sasinovskaya¹⁾, G.G. Bondarenko²⁾, A.I. Gaidar⁴⁾

¹⁾A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS, 49 Leninsky Ave.,
119334 Moscow, Russia, pimval@mail.ru, symp@imet.ac.ru, casha@bk.ru,
mophix94@gmail.com, maslyayev@mail.ru, lieutenant@list.ru, porfirievna@mail.ru

²⁾National Research University «Higher School of Economics»,
20 Myasnitskaya Str., 101000 Moscow, Russia, gbondarenko@hse.ru

³Moscow Technical University of Communications and Informatics,
8a Aviamotornaya Str., 111024 Moscow, Russia, latyshevsv@rambler.ru
⁴Research Institute of Advanced Materials and Technologies,
12 Malaya Pionerskaya Str., 115054 Moscow, Russia, niipmt@mail.ru

The results of studying the state of the surface layer of niobium after exposure to pulsed fluxes of helium ions (HI) and helium plasma (HP) in the Plasma Focus (PF) setup are presented. The power density of the HI fluxes was $q_i \sim 10^8$ W/cm², the pulse duration was $\tau_i \approx 30 - 50$ ns; for HP fluxes these parameters are $q_p \sim 10^7$ W/cm² and $\tau_p \approx 100$ ns.

Under the influence of these energy flows, the material was eroded by the ion-atomic mechanism of evaporation. In the central part of the irradiation zone, under the influence of the most high-energy flows of HI and HP, this process proceeded somewhat more intensively. The thickness of the layer evaporated in one pulse discharge was ~ 0.1 μ m and was approximately the same as that of tungsten when exposed to deuterium ions and deuterium plasma under similar irradiation conditions.

After the pulsed action of radiation fluxes on Nb, in addition to erosion, the melting of the surface layer with the formation of a wave-like surface relief containing gas-filled blisters, as well as blisters with destroyed shells, is observed. The origin of blisters is associated with the formation of complexes based on the combination of implanted helium ions with vacancies and atoms of interstitial impurities (C, O, N, etc.) and their subsequent growth and coagulation in the liquid phase during the melting of the surface layer of Nb by pulsed energy flows.

In many areas of the irradiated surface layer, microcracks formed under the action of thermal stresses developing at the stage of crystallization of the liquid phase are observed. Part of the micro-cracks is located in the area of the blisters, the other part coincides with the sliding lines of the material that arise under the action of high-speed plastic deformation. A network of such microcracks creates a block structure on the Nb surface.

In the irradiated surface layer of niobium, zones of columnar crystals and a cellular micro-structure of the surface are found, in which the average cell size is ~ 100 nm. Numerical modeling shows that in the indicated zones, the solidification of the melt proceeded through directional crystallization at a high speed, which reached ~ 35 m/s near the irradiated surface.

Keywords: impulse flows; helium plasma; helium ions; plasma focus.

Введение

Широкое применение ниобия в промышленности связано с его высокими физико-механическими и технологическими свойствами - пластичностью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, малым сечением захвата тепловых нейтронов. Между тем воздействие на Nb мощных импульсных радиационных потоков - ионов, электронов, плазмы - изучено значительно меньше, чем для таких тугоплавких материалов, как вольфрам, молибден, ванадий и сплавы на их основе. Весьма мало сведений о повреждаемости и изменении структурного состояния поверхностных слоев (ПС) ниобия в условиях мощных импульсных воздействий потоков ионов и плазмы.

Целью данной работы было изучение рельефа облученной поверхности, процесса эрозии, повреждаемости и структурных превращений в ПС ниобия в условиях мощных импульсных воздействий пото-

ков ионов гелия и высокотемпературной гелиевой плазмы, генерируемых в установке Плазменный фокус (ПФ).

Результаты и их обсуждение

Эксперименты по облучению образцов Nb импульсными потоками ионов гелия (ИГ) и гелиевой плазмы (ГП) проведены в установке ПФ «Вихрь» [1]. Облучаемые образцы располагались нормально к падающему потоку энергии. Длительность воздействия импульсов на образец-мишень для ИГ была $\tau_i \approx 30-50$ нс, для ГП $\tau_p \approx 100$ нс; плотность мощности ИГ $q_i \sim 10^8$ Вт/см², для ГП $q_p \sim 10^7$ Вт/см². Количество импульсных воздействий N потоков ИГ и ГП на облучаемый образец варьировалось в пределах от $N = 2$ до $N = 16$.

Установлено, что после облучения поверхность Nb приобретает волнообразный рельеф, содержащий каплеобразные, в основном протяженные, фрагменты. Данная форма рельефа характерна для затвердевшего расплава ПС.

Наблюдается эрозия Nb (убыль массы при испарении ПС) под облучением. Наибольшая эрозия вследствие максимальной интенсивности потока ИГ имеет место в центральной части образца-мишени. Испарение Nb потоками ИГ и ГП происходило атомно-ионным механизмом, и толщина испаренного слоя за импульс составляла $h \approx 0.05 - 0.1$ мкм. Численное моделирование процесса эрозии показало, что наблюдаемое снижение эрозии материала по мере смещения из центральной части образца Nb к периферии зоны облучения связано с уменьшением энергетической нагрузки на мишень. Если в центральной части зоны облучения она составляла ~ 10 Дж/см², то на ее периферии снижалась примерно в 1.5 раза.

При исследовании микроструктуры облученного ПС ниобия установлено наличие на поверхности большого количества блистеров двух видов – газонаполненных и с разрушенными оболочками (рис. 1).

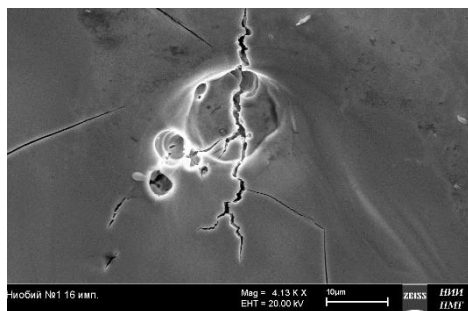


Рис. 1. Участок облученной поверхности Nb после 16 импульсных воздействий потоков ИГ и ГП
Fig. 1. Area of the irradiated surface of Nb after 16 pulses of HI and HP fluxes

Образование блистеров связано с формированием комплексов имплантированного гелия с вакансиями и атомами примесей внедрения (С, О, N и др.) и дальнейшим их ростом и коагуляцией в расплаве ПС с увеличением числа импульсных воздействий потоков ИГ и ГП.

Как правило, в зоне расположения блистеров наблюдаются микротрещины (рис. 1), возникающие под действием термических напряжений на стадии затвердевания расплава ПС. Часть из них совпадает с линиями скольжения материала, которое

происходит в результате высокоскоростной пластической деформации. Совокупность таких микротрещин создает на поверхности Nb блочную структуру (рис. 2).

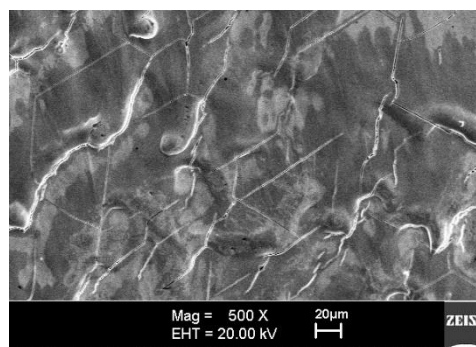


Рис. 2. Участок блочной структуры поверхности Nb после 16 воздействий потоков ИГ и ГП
Fig. 2. The block structure of the Nb surface after 16 impacts of HI and HP fluxes

В ряде участков облученного поверхностного слоя ниобия обнаружены зоны столбчатых кристаллов и ячеистая микроструктура поверхности, в которой размер ячеек составляет $\sim 100 - 200$ нм (рис. 3).

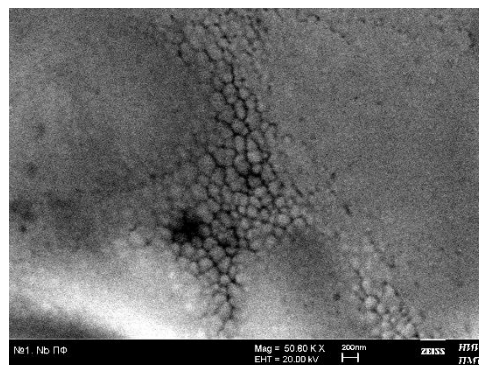


Рис. 3. Ячеистая микроструктура облученной поверхности Nb после 16 воздействий потоков ИГ и ГП
Fig. 3. Cellular microstructure of the irradiated surface of Nb after 16 impacts of HI and HP fluxes

Численным моделированием показано, что в указанных зонах затвердевание расплава протекало посредством направленной кристаллизации с высокой скоростью, которая вблизи облученной поверхности достигала ~ 35 м/с. Наблюдаемая ячеистая микроструктура указывает на то, что в некоторых участках перед фронтом кристаллизации создавалось переохлаждение, способствующее росту столбчатых кристаллов и формированию ячеистой мик-

роструктуры облученной поверхности.

Заключение

В результате проведенных экспериментов и исследований определены основные факторы повреждаемости и эволюции микроструктуры поверхностного слоя ниобия при воздействии импульсных потоков ионов гелия и гелиевой плазмы в установке Плазменный фокус «Вихрь».

Показано, что в реализованном режиме облучения происходит эрозия поверхностного слоя, его расплавление и кристаллизация с высокой скоростью. Имплантация в материал ионов гелия способствует образованию блистеров вблизи облученной поверхности, часть из которых имеет разрушенные оболочки.

Отмечено образование в поверхностном слое микротрещин, возникающих под действием термических напряжений на стадии охлаждения и кристаллизации жидкой фазы.

Выявлены особенности в характере микроструктуры различных участков облученного поверхностного слоя Nb: в одних участках зафиксирована блочная структура поверхности, в других – наблюдаются ячеистая структура и столбчатые кристаллы.

В целом, полученные результаты указывают на целесообразность дальнейших исследований поведения ниобия в условиях мощных импульсных пучково-плазменных воздействий с целью оценки перспективности его использования в термоядерной энергетике.

Работа выполнена по государственному заданию № 075-00328-21-00 и поддержана Международным Агентством по Атомной Энергии (грант IAEA CRP №23664).

Библиографические ссылки

1. Грибков В.А., Боровицкая И.В., Демин А.С., Морозов Е.Н., Масляев С.А., Пименов В.Н. и др. Установка «Вихрь» типа Плазменный фокус для диагностики радиационно-термической стойкости материалов перспективных для термоядерной энергетике и аэрокосмической техники. *Приборы и техника эксперимента* 2020; (1): 75-83.

References

1. Gribkov V.A., Borovickaya I.V., Demin A.S., Morozov E.N., Maslyaev S.A., Pimenov V.N., et al. The Vikhr plasma focus device for diagnosing the radiation-thermal resistance of materials intended for thermonuclear energy and aerospace engineering. *Instruments and Experimental Techniques* 2020; 63(1): 68-76.