

УДК 537.534:538.911

СТРУКТУРНОЕ ПОДАВЛЕНИЕ БЛИСТЕРООБРАЗОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ He^+ С ЭНЕРГИЕЙ 30 кэВ

© 2025 г. Р. Х. Хисамов^{a, *}, Н. Н. Андрианова^{b, c}, А. М. Борисов^{a, b, c}, М. А. Овчинников^{a, b},
И. И. Мусабилов^a, Р. Р. Тимирязев^a, Р. Р. Мулюков^a

^aИнститут проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, 450001 Россия

^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына,
Москва, 119991 Россия

^cМосковский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, 125993 Россия

*e-mail: r.khisamov@mail.ru

Поступила в редакцию 17.12.2024 г.

После доработки 19.01.2025 г.

Принято к публикации 19.01.2025 г.

Исследовано влияние ультрамелкозернистой структуры вольфрама и конусообразной морфологии поверхности образца на образование блистеров при облучении ионами He^+ с энергией 30 кэВ. В сравнительных экспериментах использовали ультрамелкозернистые и мелкозернистые образцы со средним размером зерен, соответственно, 300 нм и 7 мкм, с гладкой и конусообразной морфологией поверхности. Образцы вольфрама с ультрамелкозернистой структурой получили с помощью интенсивной пластической деформации, конусообразную морфологию поверхности — путем высокодозного облучения ионами Ar^+ с энергией 30 кэВ. Установлено, что блистеры при облучении ионами гелия с флуенсом 10^{18} ион/см² образуются как на мелкозернистых, так и на ультрамелкозернистых образцах. На мелкозернистых образцах часть блистеров была с удаленными крышками, в то время как на ультрамелкозернистых образцах все блистеры были целыми. Толщина крышек, диаметр блистеров зависит от размера зерен. Обнаружено, что конусообразная морфология поверхности ультрамелкозернистого вольфрама подавляет образование блистеров.

Ключевые слова: вольфрам, гелий, аргон, интенсивная пластическая деформация, ультрамелкозернистая структура, ионное облучение, блистеры.

DOI: 10.31857/S1028096025040173, EDN: FDIPWY

ВВЕДЕНИЕ

Дивертор, устройство, предназначенное для отвода тепла и загрязнений из плазмы, является одним из важнейших элементов в термоядерном реакторе [1]. В процессе работы реактора дивертор будет подвергаться тепловому воздействию, облучению нейтронами, ионами гелия и изотопов водорода. В связи с этим фактом предъявлены жесткие требования к материалу дивертора: он должен выдерживать воздействие высокодозного облучения и высоких температур без существенной деградации его свойств, формы и поверхности. В проекте Международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР) в качестве материала стенок дивертора запланировано использовать вольфрам,

как материал с высокой температурой плавления и теплопроводности, низким коэффициентом теплового расширения и коэффициентом распыления, низкой способностью захвата изотопов H^+ . Вместе с тем при использовании вольфрама для стенок дивертора сталкиваются с рядом проблем. В частности, при облучении ионами гелия на поверхности вольфрама возникают нежелательные образования типа “пух”, блистеры, что приводит к росту эрозии поверхности [2–5]. Вырванные с поверхности наночастицы вольфрама могут попасть в плазму и охладить ее, привести к срыву разряда плазмы и остановке работы реактора.

Повышение стойкости вольфрама к облучению ионами гелия можно обеспечить формированием

ультрамелкозернистой структуры [6–9], созданием специальной морфологии его поверхности. Например, в [10] показано, что ультрамелкозернистая структура вольфрама увеличивает пороговое для образования блистеров значение флуенса облучения, в [11] сдерживает образование крупных блистеров. Имеются предпосылки, что ультрамелкозернистая структура может сдерживать образование “пуха” [12]. Конусообразная [13, 14] и наноканальная [15] морфологии поверхности также могут предотвратить или затормозить образование как блистеров, так и “пуха”. В связи с этим представляется интересным совместить положительные факторы, предотвращающие образование блистеров, “пуха” — формирование ультрамелкозернистой структуры в объеме вольфрама и создание конусообразной морфологии на его поверхности.

В настоящей работе приведено сравнение блистерообразования при высокодозном облучении ионами He^+ с энергией 30 кэВ для образцов с ультрамелкозернистой и мелкозернистой структурой с полированной (гладкой) поверхностью и ионно-индуцированной конусообразной морфологией поверхности.

ЭКСПЕРИМЕНТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для исследований выбрали поликристаллический вольфрам марки ВА с химическим составом (в мас. %): W99.931, Al0.002, Fe0.009, Ni 0.004, Ca 0.010, Si 0.004, Mo 0.040. Исходным образцом являлся слиток поликристаллического вольфрама с размером зерен до 1 мм, полученный двукратной аргонно-дуговой переплавкой. Из слитка вырезали заготовки в форме дисков диаметром 10 мм, толщиной 1 мм. Заготовки механически шлифовали и промывали в ультразвуковой ванне в ацетоне для удаления загрязнений. Ультрамелкозернистую структуру образцов получали интенсивной пластической деформацией методом кручения на 6 оборотов под высоким давлением [16–19] при усилии гидравлического пресса около 50 тонн, при комнатной температуре. Для деформации использовали наковальни с плоской поверхностью. Давление на образец в процессе деформации кручением достигало 5–6 ГПа.

В сравнительных экспериментах использовали мелкозернистые образцы, которые получали отжигом ультрамелкозернистых образцов. Температуру отжига выбрали исходя из предварительного измерения температуры рекристаллизации ультрамелкозернистого образца методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с помощью синхронного термического анализатора STA 449 F1 Jupiter NETZSCH (Германия). На зависимости

теплового потока от температуры нагрева ультрамелкозернистого образца около 1250°C наблюдали экзотермический пик, что связано с рекристаллизацией зерен. Это коррелирует с температурой рекристаллизации деформированного вольфрама $\approx 1300^\circ\text{C}$ [20]. Полная рекристаллизация структуры деформированного вольфрама, по данным [21], наступает при температуре 1400°C. Это подтверждается и в [22], где было показано, что отжиг ультрамелкозернистого вольфрама при 1400°C привел к росту среднего размера зерен до 2 мкм. Таким образом, для получения образцов с мелкозернистой структурой ультрамелкозернистые образцы отжигали при 1500°C в течение 1 ч в вакууме при давлении 10^{-3} Па.

Поверхность всех исследуемых образцов механически шлифовали на кругах с напылением из SiC с понижением зернистости от 600 до 4000. Полировку поверхности проводили в растворе 1 мас. % NaOH+H₂O при напряжении 16.5 В и токе 1.1 А при комнатной температуре.

Морфологию образцов исследовали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Tescan Mira 3LHM в режиме детектирования обратно-отраженных электронов. Размер и ориентацию зерен определяли методом дифракции обратно-отраженных электронов с шагом сканирования от 40 нм до 1 мкм.

Ионное облучение ультрамелкозернистых и мелкозернистых образцов проводили на масс-монохроматоре НИИЯФ МГУ [23]. Для выявления влияния размера зерен на образование блистеров образцы с гладкой поверхностью облучали нормально падающими ионами He^+ с энергией 30 кэВ при флуенсе 1×10^{18} ион/см². Для выявления влияния конусообразной морфологии поверхности на образование блистеров ультрамелкозернистые и мелкозернистые образцы предварительно облучали нормально падающими ионами Ar^+ с энергией 30 кэВ при флуенсе $\sim 10^{19}$ ион/см² [22, 24, 25], а затем облучали нормально падающими ионами He^+ с энергией 30 кэВ при флуенсом 1×10^{18} ион/см². Во всех случаях облучения пучок ионов направляли на половину радиуса дисковых образцов. Температура образцов в процессе облучения не превышала 50°C, ее контролировали с помощью хромель-алюмелевой термопары. Морфологию поверхности образцов после облучения исследовали с помощью РЭМ в режиме детектирования вторичных и обратно-отраженных электронов. Поперечный срез делали с помощью фокусированного пучка ионами Ga^+ с энергией 30 кэВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ

Исходный образец вольфрама (слиток) имел поликристаллическую структуру с размером

кристаллических зерен до 1 мм (рис. 1а) [24]. Исследование с помощью РЭМ деформированных кручением образцов показало, что от центра к краю образцов размер зерен неоднороден. В центре образца, где степень деформации была минимальная, наблюдали структуру с крупными зернами порядка нескольких сотен мкм. На половине радиуса и на краю образцов наблюдали ультрамелкозернистую структуру с размером зерен от 40 нм до 1 мкм при среднем значении 300 нм (рис. 1б). Размер зерен после отжига ультрамелкозернистых образцов составил от 1 до 25 мкм при среднем значении 7 мкм (рис. 1в). Полученные мелкозернистые образцы также, как и ультрамелкозернистые образцы, не имели кристаллографической текстуры.

Облучение мелкозернистого образца с полированной поверхностью ионами He^+ привело к образованию блистеров диаметром от нескольких со-

тен нм до 2 мкм (рис. 2а). Блистеры располагались по всей поверхности зерен. Наиболее крупные по диаметру блистеры располагались на зернах с ориентацией параллельно (001), в то время как на зернах с ориентацией (111) диаметр блистеров был меньше. Это согласуется с данными о зависимости диаметра блистеров от ориентации зерен [26, 27]. Некоторые блистеры имели трещины на периферии, что указывает на хрупкий характер разрушения блистера. При периферийном разрушении, как правило, крышки блистеров удаляются [28].

После аналогичного облучения ультрамелкозернистого образца с полированной поверхностью на нем также образовались блистеры, но с диаметром, заметно меньшим 1 мкм (рис. 2б). Многие крупные блистеры имели трещины на вершине крышек (рис. 2в). По сравнению с мелкозернистым образцом на ультрамелкозернистом образце не было блистеров с удаленными крышками.

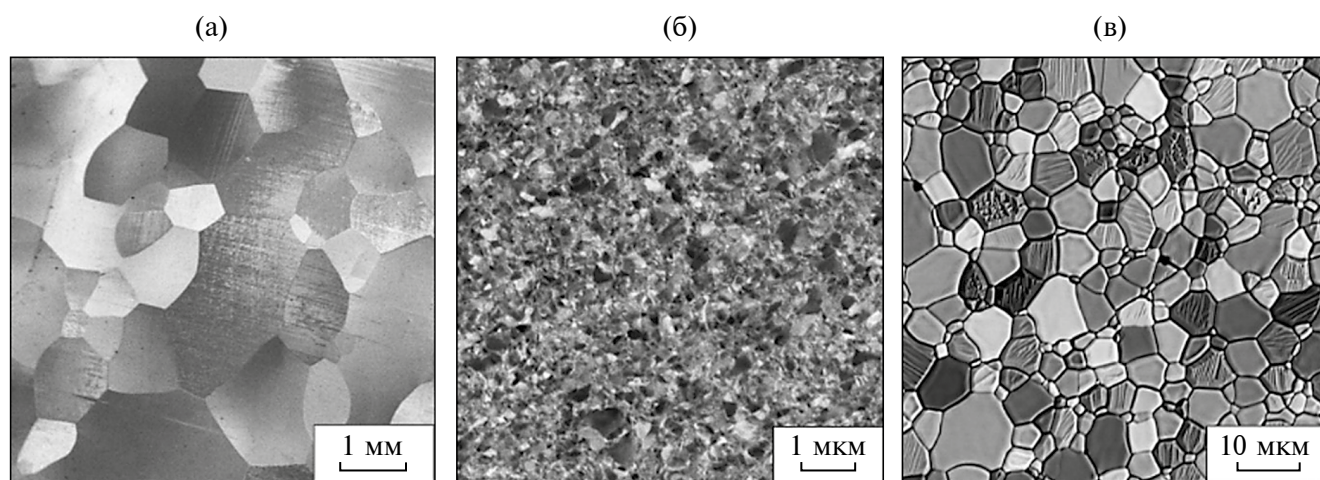


Рис. 1. РЭМ-изображения, полученные в режиме детектирования обратно-отраженных электронов, морфологии исходного (слиток) (а); ультрамелкозернистого (б); мелкозернистого (в) образцов вольфрама.

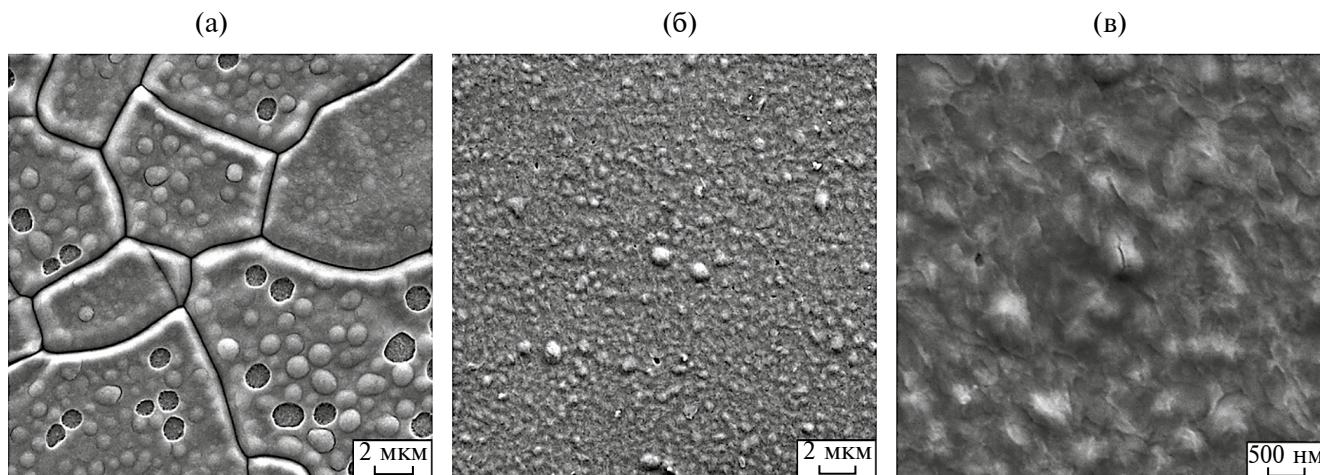


Рис. 2. РЭМ-изображения, полученные в режиме детектирования вторичных электронов, поверхности мелкозернистого (а) и ультрамелкозернистого (б, в) образцов вольфрама после облучения ионами He^+ .

По-видимому, флуенс облучения 1×10^{18} ион/см² для ультрамелкозернистого вольфрама был недостаточен для отрыва крышек блистеров, в то время как для мелкозернистого вольфрама при таком флуенсе уже происходит отрыв крышек.

На рис. 3 представлены РЭМ-изображения поперечного среза блистеров мелкозернистого и ультрамелкозернистого образца. Поперечный срез был сделан травлением с помощью фокусированного ионного пучка. Непосредственно перед травлением на поверхность образцов с блистерами был нанесен слой платины толщиной не более 1 мкм с целью получения лучшего качества изображения и предотвращения завалов на границе среза. На мелкозернистом образце делали поперечный срез блистеров в среднем составлял 1.5 мкм, толщина крышек 170 нм (рис. 3а). На ультрамелкозернистом образце также исследовали блистеры наибольшего диаметра. На поперечном срезе блистера на ультрамелкозернистом образце можно видеть, что блистер захватывает несколько зерен (рис. 3б). Диаметр крупных блистеров и толщина их крышек в среднем составили 700 и 120 нм соответственно.

Механизмы образования блистеров на металлах широко обсуждены в работах [28–30]. В модели боковых напряжений движущей силой блистерообразования служат внутренние механические напряжения, возникающие из-за распухания облученного слоя [31]. Согласно этой модели, толщина крышки t связана с диаметром блистера D соотношением:

$$D = 7.66t^{3/2} \{E_Y / [12S(1 - \nu^2)]\}^{1/2}, \quad (1),$$

где E_Y — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона. Сжимающее напряжение S , параллельное поверх-

ности крышки блистера, можно описать выражением: $S = 2.5 \times 10^{-6} \sigma$, где σ — боковое напряжение, значение которого принимают равной пределу текучести или пределу прочности на разрыв. Рассчитаем диаметр блистера подставив в соотношение (1) экспериментально измеренную толщину крышки. Примем модуль Юнга E_Y для вольфрама равный 350 ГПа, коэффициент Пуассона — 0.28 (эти величины слабо зависят от размера зерен). Величину σ примем равной пределу прочности [28]. Для вольфрама с ультрамелкозернистой структурой, экспериментально измеренный предел прочности составил около 2.5 ГПа [32]. Предел прочности для мелкозернистого образца примем равным 1.6 ГПа [33]. Соотношение (1) для диаметра блистера на ультрамелкозернистом и мелкозернистом вольфраме примет вид: $D_{\text{умз}} = 17.2t^{3/2}$, $D_{\text{мз}} = 21.5t^{3/2}$. При толщине крышек блистеров на мелкозернистом образце 170 нм и на ультрамелкозернистом образце 120 нм, расчетный диаметр блистеров равен 1.51 и 0.72 мкм соответственно. Это коррелирует с экспериментально измеренными диаметрами блистеров. Благодаря повышенному пределу прочности, диаметр блистеров на ультрамелкозернистом образце меньше, чем на мелкозернистом образце.

Для выявления влияния конусообразной морфологии поверхности на образование блистеров ультрамелкозернистые и мелкозернистые образцы вольфрама облучали ионами Ag^+ . В результате облучения на исходной полированной поверхности мелкозернистых образцов сформировалась морфология с перепадом высот между зернами (рис. 4а). На поверхности наблюдали как относительно ровные участки, так и участки с коническими образованиями. На полированной

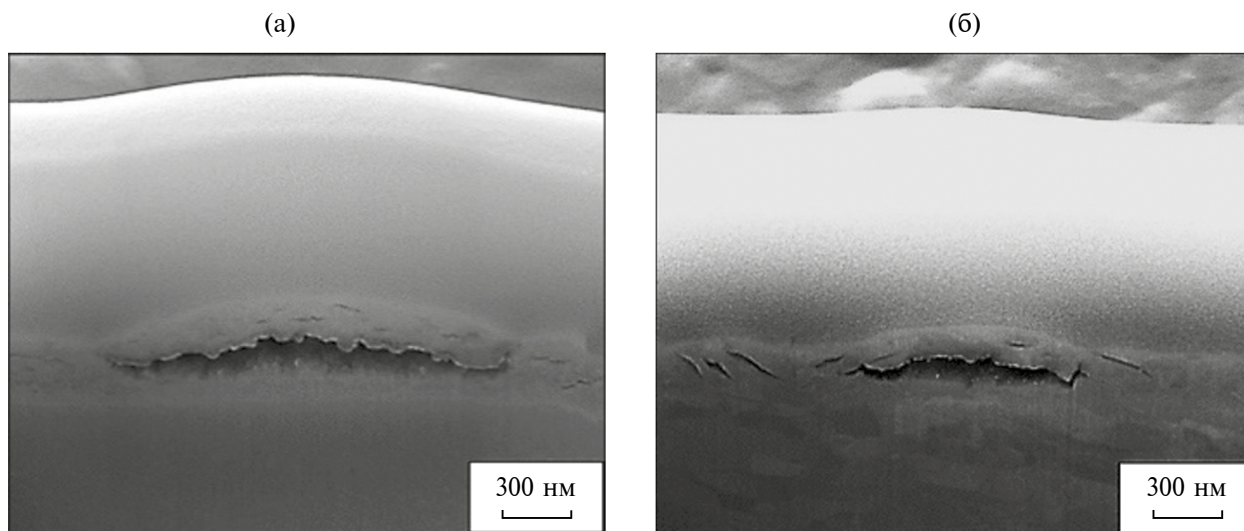


Рис. 3. РЭМ-изображения, полученные в режиме детектирования вторичных электронов, приповерхностного слоя мелкозернистого (а) и ультрамелкозернистого (б) образцов вольфрама, облученного ионами He^+ .

поверхности ультрамелкозернистых образцов при тех же условиях облучения сформировалась однородная конусообразная морфология [22] (рис. 4б). Коническими элементами морфологии являлись заостренные зерна и ионно-индуцированные конусы. Высота конических образований составляла около нескольких сотен нм, концентрация $\sim 10^9 \text{ см}^{-2}$, что сопоставимо с размером зерен и их концентрацией на поверхности. Угол наклона при основании конических элементов морфологии составил около 80° .

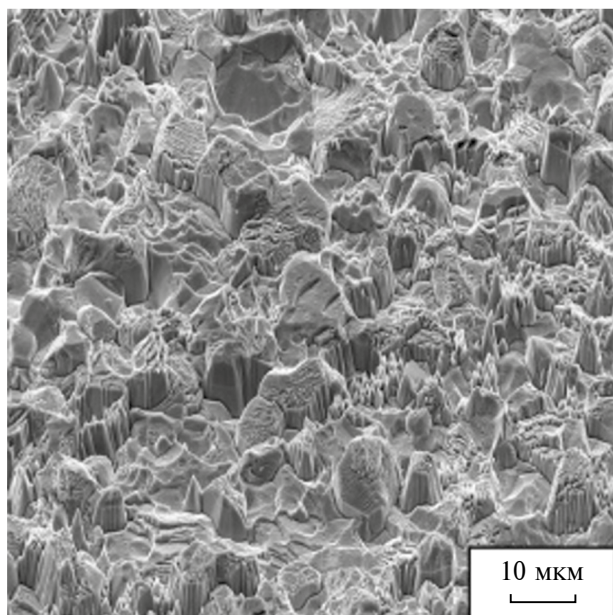
После облучения ионами He^+ мелкозернистых и ультрамелкозернистых образцов, предварительно облученных ионами Ag^+ (рис. 4), морфология с перепадом высот между зернами на мелкозернистом образце и конусообразная морфология на ультрамелкозернистом образце сохранилась. Вместе с тем на мелкозернистых образцах на относительно ровных участках поверхности образовались блистеры диаметром в несколько мкм (рис. 5а). Некоторые блистеры имели трещины на периферии. На ультрамелкозернистых образцах блистеры на ровных участках не были обнаружены (рис. 5б). Однако на этих же участках поверхности появились трещины (рис. 5г). Такие же трещины были и в некоторых редких областях на мелкозернистых образцах. На боковой стороне конических элементов морфологии поверхности как мелкозернистых, так и ультрамелкозернистых образцов блистеры отсутствовали (рис. 5б, 5г).

Как известно, диаметр блистеров зависит не только от флуенса облучения, температуры,

но и от шероховатости поверхности [28, 29]. Например, как показано в [34], при облучении ионами гелия площадки в виде квадрата со стороной 2 мкм монокристаллического вольфрама, на ней образовывались четыре блистера диаметром 1 мкм. Облучение квадратной площадки со стороной 1 мкм приводило к образованию единственного блистера диаметром около 1 мкм. В результате последующего уменьшения стороны квадратной площадки до размеров менее 1 мкм диаметр блистеров уменьшался в соответствии со стороной квадратной площадки. Следует отметить, что блистер не выходил за пределы облучаемой площадки, его диаметр соответствовал стороне этой площадки. Подобный эффект наблюдали и в работе [26] где показано, что уменьшение расстояния между канавками на шероховатой поверхности образца приводит к уменьшению диаметра образующихся блистеров. При расстоянии между канавками 500 нм, диаметр блистеров не превышал 200 нм.

В настоящей работе на мелкозернистых образцах, где на относительно больших и ровных участках поверхности образовывались блистеры, их диаметры преимущественно ограничивались лишь другими блистерами. На ультрамелкозернистых образцах расстояние между различными неровностями, коническими элементами морфологии поверхности составляло порядка 100 нм, и, видимо, поэтому блистеры не образовывались. В то же время высокие механические напряжения в приповерхностном слое образца, возникшие

(а)



(б)

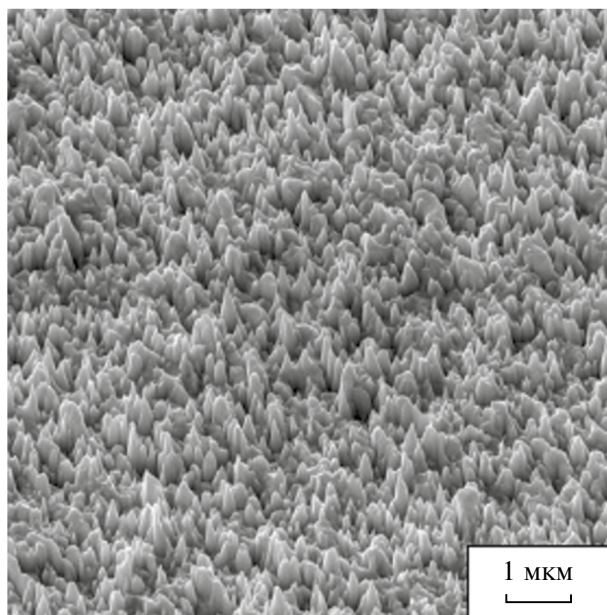


Рис. 4. РЭМ-изображения, полученные в режиме детектирования вторичных электронов под углом 45° : мелкозернистого (а) и ультрамелкозернистого (б) образцов вольфрама после облучения ионами Ag^+ .

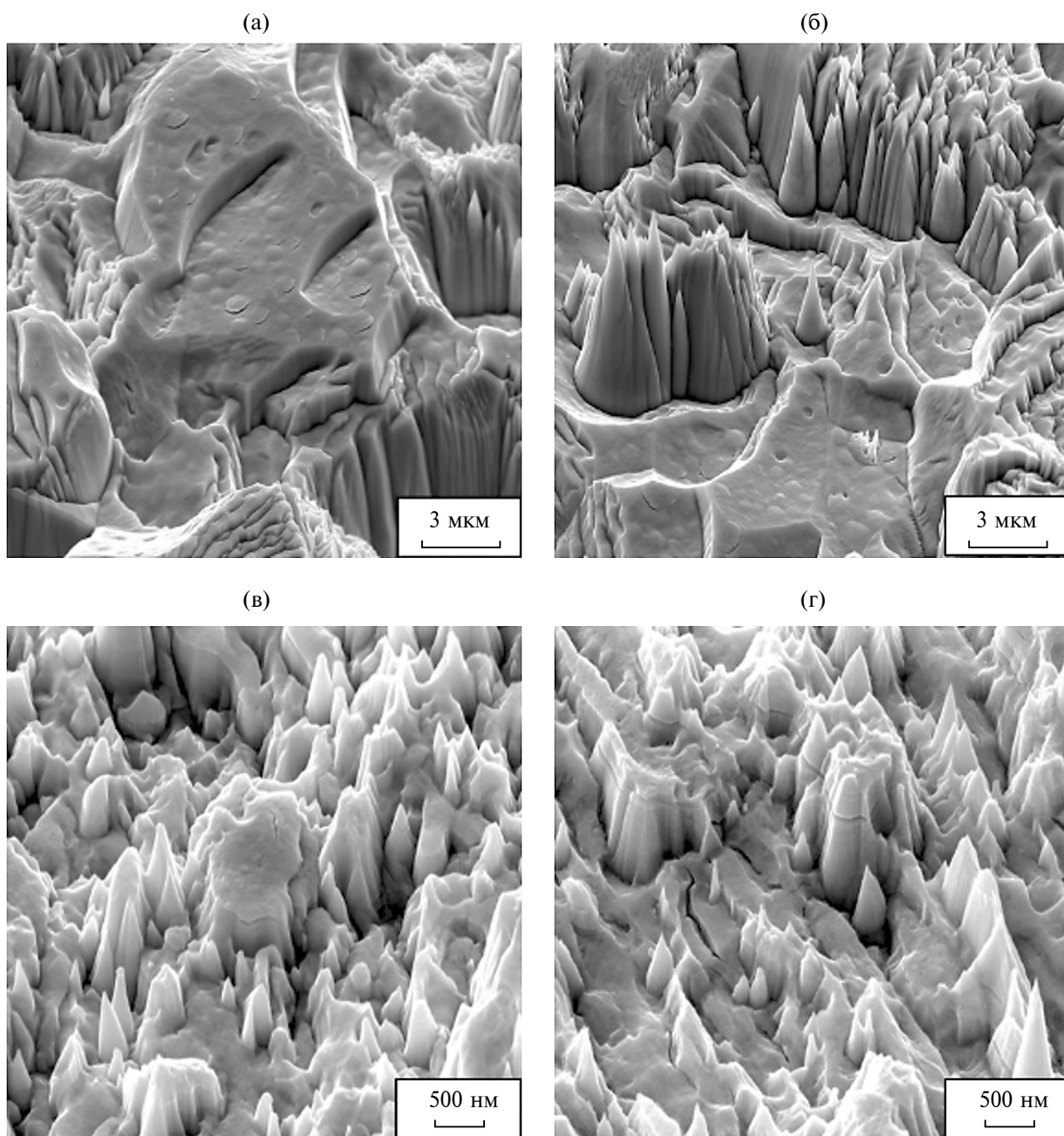


Рис. 5. РЭМ-изображения, полученные под углом 45°: мелкозернистого (а, б) и ультрамелкозернистого (в, г) образцов вольфрама после предварительного облучения Ag^+ и последующего облучения He^+ .

в результате имплантации ионов гелия, проявляются на морфологических элементах в виде трещин.

Отсутствие блистеров на боковой стороне ионно-индуцированных конусов можно связать как с малыми проекционными для образования блистеров размерами конусов (~100 нм), так и с тем, что при скользящей ионной бомбардировке значительная доля ионов отражается от поверхности, а глубина имплантации многократно уменьшается [35].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовали влияние ультрамелкозернистой структуры вольфрама и конусообразной морфологии его поверхности на образование блистеров в результате ионного облучения. Ультрамелкозернистую структуру со средним размером зерен 300 нм получали интенсивной пластической деформацией образцов вольфрама методом кручения под давлением около 5–6 ГПа. Конусообразную морфологию на поверхности ультрамелкозернистых образцов с концентрацией конусов около

10^9 см⁻² формировали высокодозным облучением ионами Ag⁺ с энергией 30 кэВ при флуенсе $\sim 10^{19}$ ион/см². Ультрамелкозернистые образцы с гладкой и конусообразной морфологией поверхности облучали ионами He⁺ с энергией 30 кэВ при флуенсе 1×10^{18} ион/см². Для сравнительных исследований использовали мелкозернистые образцы со средним размером зерен 7 мкм.

В результате облучения ионами He⁺ на изначально гладкой поверхности мелкозернистых образцов образовались блистеры диаметром от сотен нм до 1–2 мкм. Диаметр блистеров зависел от ориентации зерен. Наблюдали блистеры как с периферийным отщеплением крышек, так и блистеры с удаленными крышками. На границах зерен блистеры не были обнаружены. На поверхности ультрамелкозернистых образцов блистеры также образовались, однако их диаметр был меньше 1 мкм. Некоторые блистеры были целыми, другие имели трещины на вершине крышек.

Показано, что диаметр блистера зависит от толщины крышки. Меньший диаметр блистеров на ультрамелкозернистом образце по сравнению с мелкозернистым образцом обусловлен тем, что из-за повышенного предела прочности первого сдерживается рост блистера на его поверхности.

Формирование конусообразной морфологии поверхности ультрамелкозернистого вольфрама приводит к подавлению образования блистеров. Малое пространство (~ 100 нм) между коническими элементами на относительно ровной поверхности, большой угол наклона при основании конусов (80°) затрудняет образование блистеров.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа Н.Н. Андриановой, А.М. Борисова, М.А. Овчинникова выполнена в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова. Работа Р.Х. Хисамова, И.И. Мусабинова, Р.Р. Тимиряева выполнена в рамках государственного задания Института проблем сверхпластичности металлов РАН. Работа Р.Р. Мулюкова поддержана Евразийским научно-образовательным центром Республики Башкортостан. Исследования проведены на оборудовании ЦКП “Структурные и физико-механические исследования материалов” ИПСМ РАН и “Ускорительного комплекса МГУ”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pitts R.A., Bonnin X., Escourbiac F., Frerichs H., Gunn J.P., Hirai T., Kukushkin A.S., Kaveeva E., Miller M.A., Moulton D., Rozhansky V., Senichenkov I., Sytova E., Schmitz O., Stangeby P.C., De Temmerman G., Veselova I., Wiesen S. // Nucl. Mater. Energy. 2019. V. 20. P. 100696. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2019.100696>
2. Martynenko Y.V., Nagel M.Y. // Plasma Phys. Rep. 2012. V. 38. P. 996. <https://doi.org/10.1134/S1063780X12110074>
3. Kajita S., Kawaguchi S., Ohno N., Yoshida N. // Sci. Rep. 2018. V. 8. P. 56. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18476-7>
4. Budaev V.P., Fedorovich S.D., Dedov A.V., Karpov A.V., Martynenko Y.V., Kavyrshin D.I., Gubkin M.K., Lukashevsky M.V., Lazukin A.V., Zakharenkov A.V., Sliva A.P., Marchenkov A.Y., Budaeva M.V., Tran Q.V., Rogozin K.A., Konkov A.A., Vasilyev G.B., Burmistrov D.A., Belousov S.V. // Plasma Discharge. Fusion Science and Technology. 2023. V. 79. Iss. 4. P. 404. <https://doi.org/10.1080/15361055.2022.2118471>
5. Harutyunyan Z.R., Ogorodnikova O.V., Aksenova A.S., Gasparyan Y.M., Efimov V.S., Kharkov M.M., Kaziev A.V., Volkov N.V. // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2020. V. 14. № 6. P. 1248. <https://doi.org/10.1134/S1027451020060245>
6. Mulyukov R.R. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2006. V. 24. P. 1061. <https://doi.org/10.1116/1.2174024>
7. Wu Y-C., Hou Q-Q., Luo L-M., Zan X., Zhu X-Y., Li P., Xu Q., Cheng J-G., Luo G-N., Chen J-L. // J. Alloys Compd. 2019. V. 779. P. 926. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.279>
8. Efe M., El-Atwani O., Guo Y, Klenosky D.R. // Scr. Mater. 2014. V. 70. P. 31. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.08.013>
9. El-Atwani O., Hattar K., Hinks J.A., Greaves G., Harilal S.S., Hassanein A. // J. Nucl. Mater. 2015. V. 458. P. 216. <http://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.095>
10. Chen Z., Niu L-L., Wang Z., Tian L., Kecskes L., Zhu K., Wei Q. // Acta Mater. 2018. V. 147. P. 100. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.01.015>
11. Wurmshuber M., Doppermann S., Wurster S., Jakob S., Balooch M., Alfreider M., Schmuck K., Bodlos R., Romaner L., Hosemann P., Clemens H., Maier-Kiener V., Kiener D. // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 2023. V. 111. 106125. <https://doi.org/10.1016/j.jmrhm.2023.106125>
12. Qian W., Wei R., Zhang M., Chen P., Wang L., Liu X., Chen J., Ni W., Zheng P. // Mater. Lett. A. 2022. V. 308. P. 130921. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130921>
13. Cuomo J.J., Ziegler J.F., Woodall J.M. // Appl. Phys. Lett. 1975. V. 26. P. 557.
14. Auciello O. // J. Vacuum Sci. Technol. 1981. V. 19. P. 841. <http://doi.org/10.1116/1.571224>
15. Qin W., Ren F., Doerner R.P., Wei G., Lv Y., Chang S., Tang M., Deng H., Jiang C., Wang Y. // Acta Mater. 2018. V. 153. P. 147. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.04.048>
16. Zhang Y., Ganeev A.V., Wang J.T., Liu J.Q., Alexandrov I.V. // Mater. Sci. Eng. A. 2009. V. 503. P. 37. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.07.074>

17. Yusupova N.R., Krylova K.A., Mulyukov R.R. // *Lett. Mater.* 2023. V. 13. Iss. 3. P. 255.
<https://doi.org/10.22226/2410-3535-2023-3-255-259>
18. Mulyukov R.R., Khisamov R.K., Borisov A.M., Baimiev A.Kh., Ovchinnikov M.A., Timiryayev R.R., Vladimirova A.A. // *Lett. Mater.* 2023. V. 13. Iss. 4s. P. 444.
<https://doi.org/10.22226/2410-3535-2023-4-373-376>
19. Danilenko V.N., Parkhimovich N.Y., Kiekkuzhina L.U., Gunderov D.V. // *Lett. Mater.* 2023. V. 13. Iss. 4. P. 373.
<https://doi.org/10.22226/2410-3535-2023-4-444-449>
20. Li P., Sun D.-Z., Wang X., Xue K.-M., Hua R., Wu Y.-C. // *Trans. Nonferrous Metals Society of China.* 2018. V. 28. Iss. 3. P. 461.
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64679-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64679-5)
21. Xue K., Guo Y., Zhou Y., Xu B., Li P. // *Int. J. Refr. Met. Hard Mater.* 2021. V. 94. P. 105377.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105377>
22. Khisamov R.K., Andrianova A.A., Borisov A.M., Ovchinnikov M.A., Timiryayev R.R., Musabirov I.I., Mulyukov R.R. // *Phys. Atomic Nuclei.* 2023. V. 86. № 10. P. 2198.
<https://doi.org/10.1134/S1063778823100228>
23. Mashkova E.S., Molchanov V.A. *Medium-Energy Ion Reflection from Solids.* Amsterdam: North-Holland, 1985. 444 p.
24. Khisamov R.K., Andrianova A.A., Borisov A.M., Ovchinnikov M.A., Musabirov I.I., Timiryayev R.R., Mulyukov R.R. // *Phys. Atomic Nuclei.* 2024. V. 87. № 9. P. 1.
<https://doi.org/10.1134/S1063778824090151>
25. Andrianova N.N., Borisov A.M., Ovchinnikov M.A., Khisamov R.K., Mulyukov R.R. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2024. V. 88. P. 478.
<https://doi.org/10.1134/S1062873823706141>
26. Xiao S., Ma Y., Tian L., Li M., Qi C., Wang B. // *Nucl. Mater. Energy.* 2020. V. 23. P. 100746.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2020.100746>
27. Zhang M., Zhao J., Meng X., Chen Z., Wang Q., Guan X., Wang T. // *J. Nucl. Sci. Tech.* 2021. V. 58. Iss. 10. P. 1071.
<https://doi.org/10.1080/00223131.2021.1911872>
28. Guseva M.I., Martynenko Y.V. // *Sov. Phys. Usp.* 1981. V. 24. P. 996.
<https://doi.org/10.1070/PU1981v024n12ABEH004758>
29. Behrisch R., Eckstein W. *Sputtering by Particle Bombardment.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 509 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-44502-9>
30. Fan C., Pan S., Hu X., He B., Huang M. // *Acta Materialia.* 2023. V. 254. P. 118993.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.118993>
31. EerNisse E.P., Picraux S.T. // *J. Appl. Phys.* 1977. V. 48. P. 9.
<https://doi.org/10.1063/1.323332>
32. Wei Q., Zhang H.T., Schuster B.E., Ramesh K.T., Valiev R.Z., Kecskes L.J., Dowding R.J., Magness L., Cho K. // *Acta Materialia.* 2006. V. 54. P. 4079.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.05.005>
33. Xu A., Wei T., Short K., Palmer T., Ionescu M., Bhattacharyya D., Smith G.D.W., Armstrong D.E. J. // *J. Mater. Sci.* 2023. V. 58. P. 10501.
<https://doi.org/10.1007/s10853-023-08647-5>
34. Allen F.I., Hosemann P., Balooch M. // *Scripta Mater.* 2020. V. 178. P. 256.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.11.039>
35. Guseva M.I., Ivanov S.M., Martynenko Y.V. // *J. Nucl. Mater.* 1981. V. 96. P. 208.
[https://doi.org/10.1016/0022-3115\(81\)90235-X](https://doi.org/10.1016/0022-3115(81)90235-X)

Structural Suppression of Blister Formation on the Tungsten Surface under He⁺ Implantation with an Energy of 30 keV

**R. Kh. Khisamov^{1,*}, N. N. Andrianova^{2,3}, A. M. Borisov^{1,2,3}, M. A. Ovchinnikov²,
I. I. Musabirov¹, R. R. Timiryayev¹, R. R. Mulyukov¹**

¹*Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, Ufa, 450001 Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia*

³*Moscow Aviation Institute, Moscow, 125993 Russia*

*e-mail: r.khisamov@mail.ru

The influence of ultrafine-grained structure and cone-shaped surface morphology on the formation of blisters under irradiation of tungsten with He⁺ ions with energy of 30 keV has been studied. In comparative experiments, ultrafine-grained and fine-grained samples with an average grain size of 300 nm and 7 μm, respectively, with smooth and cone-shaped surface morphology were used. The ultrafine-grained structure in tungsten samples was obtained by severe plastic deformation, and the cone-shaped surface morphology was obtained by high-fluence irradiation with Ar⁺ ions with the energy of 30 keV. It was found that blisters are formed on both fine-grained and ultrafine-grained samples when irradiated with He⁺ ions with a fluence of 10¹⁸ ion/cm². On the fine-grained samples, some of the blisters were with the lids removed, while in the ultrafine-grained samples, all blisters were intact. The thickness of the lids, diameter of the blisters depends on the grain size. The cone-shaped surface morphology on ultrafine-grained tungsten was found to suppress blister formation.

Keywords: tungsten, helium, argon, severe plastic deformation, high-pressure torsion, ultrafine-grained structure, ion irradiation, blisters.