

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И АППАРАТУРЫ

УДК 537.534:538.911

**ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ИОННО-ИНДУЦИРОВАННОГО  
КОНУСООБРАЗНОГО РЕЛЬЕФА НА ПОВЕРХНОСТИ  
И МИКРОСТРУКТУРЫ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ВОЛЬФРАМА,  
ПОЛУЧЕННОГО ДЕФОРМАЦИОННЫМ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕМ**

© 2024 г. Р. Х. Хисамов<sup>a, \*</sup>, Н. Н. Андрианова<sup>b, c, d</sup>, А. М. Борисов<sup>b, c, d</sup>,  
М. А. Овчинников<sup>c</sup>, Р. Р. Тимирязев<sup>a</sup>, И. И. Мусабилов<sup>a</sup>, Р. Р. Мулюков<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт проблем сверхпластичности металлов, Российская академия наук, Уфа, 450001 Россия

<sup>b</sup>Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, 125993 Россия

<sup>c</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Московский  
Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

<sup>d</sup>Московский государственный технологический университет “СТАНКИН”, Москва, 127055 Россия

\*E-mail: r.khisamov@mail.ru

Поступила в редакцию 26.05.2023 г.

После доработки 31.05.2023 г.

Принята к публикации 05.06.2023 г.

Представлены результаты исследования влияния деформационного наноструктурирования на образование конусообразного рельефа на поверхности ультрамелкозернистого вольфрама со средним размером зерен 300 нм при высокодозном облучении ионами аргона с энергией 30 кэВ. Изучена термическая стабильность полученного конусообразного рельефа на поверхности и ультрамелкозернистой структуры в объеме вольфрама при нагреве до 1400°C. Проведены измерения микротвердости.

**Ключевые слова:** вольфрам, деформационное наноструктурирование, ультрамелкозернистая структура, ионное облучение, конусы, термическая стабильность, микротвердость

**DOI:** 10.56304/S2079562923030193

**Введение**

Вольфрам, благодаря высокой температуре плавления и теплопроводности, относительно низким коэффициентам распыления и теплового расширения, является перспективным материалом для обращенных к плазме деталей в термоядерных реакторах [1, 2]. Однако для практического использования требуется повысить его радиационную стойкость. Известно, например, что при облучении вольфрама низкоэнергетической (менее 100 эВ) гелиевой плазмой при температуре около 1000°C на поверхности вольфрама образуется структура типа пух [3–6]. Образование такой структуры на поверхности крайне нежелательно в виду того, что она может отслаиваться, частицы вольфрама могут попасть в плазму и охладить ее.

В качестве путей повышения радиационной стойкости рассматривается подбор легирующих элементов сплавов на основе вольфрама [7, 8], формирование в них нужной микроструктуры. В частности, в последнее время исследуется влияние ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры (размер зерен от 100 нм до 1 мкм) в объеме вольфрама на

его радиационную стойкость [9, 10]. Например, в работе [11] показано, что на УМЗ вольфраме при облучении ионами гелия с энергией 30 кэВ с флюенсом до  $10^{19}$  ион/см<sup>2</sup> блистеры не образуются. В то время как на крупнозернистом вольфраме блистеры образуются при флюенсе  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. Полагается, что отсутствие блистеров на УМЗ вольфраме связано с большой объемной долей границ зерен (по сравнению с крупнозернистым вольфрамом). Однако в [12] отмечается, что зерна в УМЗ вольфраме, имеющие размеры от 100 нм и выше, являются слишком большими, чтобы оказывать заметное влияние на образование и рост блистеров при облучении ионами гелия. Для того чтобы предотвратить образование вакансий и объединение их в газовые пузырьки с ионами гелия на границах зерен необходим размер зерен около 30–50 нм [13]. Имеются и детальные исследования влияния границ зерен и температуры на образование газовых пузырей на облучаемой поверхности [14].

Одним из способов повышения радиационной стойкости может являться модификация поверх-

ности [15–18]. Например, однородно распределенные конусы на поверхности вольфрама могут сдерживать появление блистеров и структур типа пух, снижать коэффициент распыления. В работе [19] исследовано влияние наноканальной структуры на радиационную стойкость. Пленку из вольфрама с наноканальной структурой толщиной около 1 мкм получили путем магнетронного осаждения. Показано, что при нагреве до 800°C и облучении ионами гелия с энергией около 50 эВ с флюенсом  $1.7 \cdot 10^{21}$  ион/см<sup>2</sup> на вольфрамовой пленке с наноканальной структурой образуется пух толщиной около 100 нм. В то же время на гладкой поверхности поликристаллического вольфрама пух образуется при флюенсе около  $2.5 \cdot 10^{20}$  ион/см<sup>2</sup>, т.е., на порядок ниже, чем на наноканальной структуре. В работе [20] исследовано влияние наностолбчатой структуры на коэффициент распыления вольфрама. Наностолбчатую структуру получили паровым осаждением. Установлено, что такая структура на поверхности имеет сниженный коэффициент распыления при облучении ионами аргона с энергией в единицы кэВ по сравнению с коэффициентом распыления гладкой поверхности.

Недавно показано, что облучение никеля с УМЗ структурой ионами аргона с энергией 30 кэВ с флюенсом  $2 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> позволяет сформировать однородный конусообразный рельеф поверхности [21, 22]. УМЗ структура с размером зерен 200–300 нм была получена деформационным наноструктурированием методом кручения под высоким давлением. На мелко- и крупнозернистом никеле при таких же режимах облучения формируется сложный рельеф с перепадом высот между зернами и немногочисленными неравномерно распределенными по поверхности конусами. Конусообразный рельеф на УМЗ никеле термостабилен до  $0.4T_{пл}$ , тогда как размер зерен в его объеме – только до  $0.3T_{пл}$  [23]. Проведение подобных исследований образования конусообразного рельефа поверхности вольфрама при ионном облучении и термостабильности полученного рельефа представляет практический интерес.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Материалом для исследований выбрали поликристаллический вольфрам марки ВА чистотой 99.93%. Микроструктура исходных образцов вольфрама являлась мелкозернистой со средним размером зерен 2 мкм. Для формирования УМЗ структуры в исходных образцах использовали деформационное наноструктурирование методом кручения под высоким давлением [24–26]. Деформацию образцов осуществляли на накопальниках Бриджмена с плоскими поверхностями под давлением 6 ГПа и 3.5 оборотах. Образцы при

деформации нагревались не выше 50°C. В результате деформации были получены образцы в виде дисков диаметром 8 мм толщиной около 0.3 мм.

Для исследования микроструктуры поверхность образцов вначале шлифовали механически, затем травили на установке PIPS Gatan model 691 ионами  $Ar^+$  с энергией 5 кэВ под скользящим углом 4° град. в течение 1 ч при азимутальном вращении образца. Микроструктуру исследовали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Tescan Mira 3 LHM и рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima IV с  $Cu-K_\alpha$  облучением. Размер зерен оценили методом дифракции обратно-отраженных электронов с шагом сканирования 50 нм.

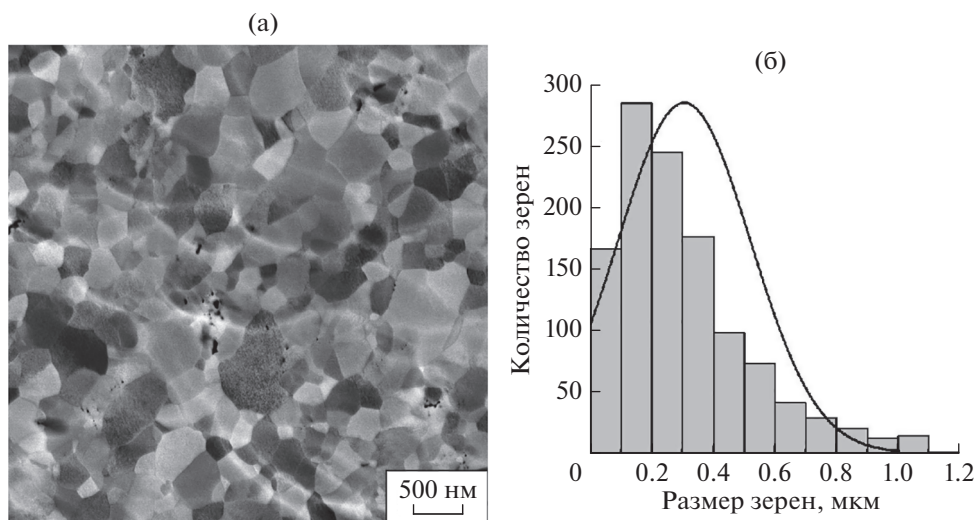
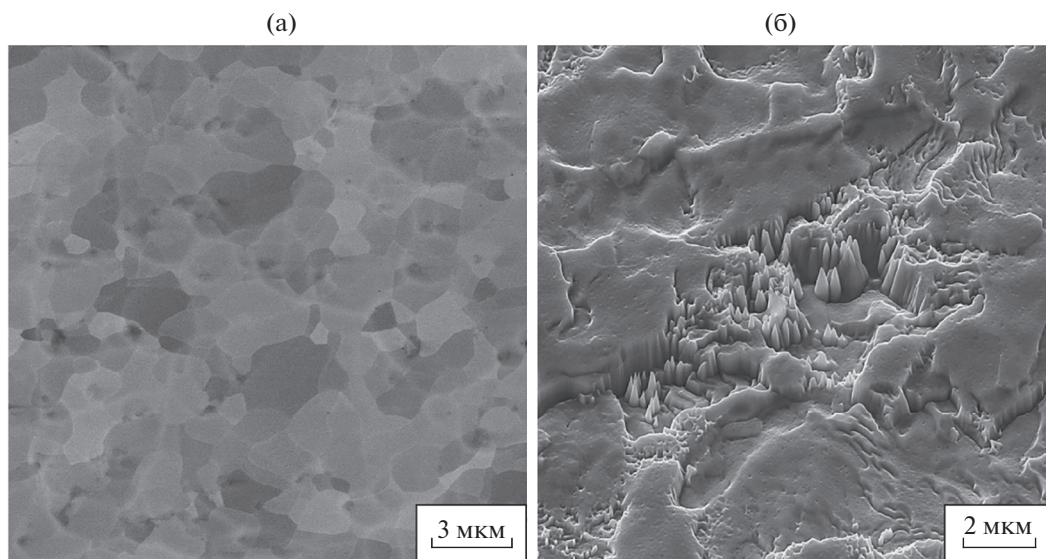
Облучение проводили ионами  $Ar^+$  с энергией 30 кэВ при нормальном падении ионов к поверхности образца на масс-монокроматоре НИИЯФ МГУ [27]. Поверхность образцов предварительно механически полировали до зеркального блеска. Ток ионов задавали равным около 100 мкА при плотности тока 0.3 мА/см<sup>2</sup>. Флюенс в процессе облучения достигал величины  $3 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>. Контроль температуры осуществляли с помощью хромель-алюмелевой термопары, спай которой укрепляли на облучаемой стороне образца вне зоны облучения. Температура образца при облучении не превышала 50°C. В результате облучения на поверхности образцов образовался протравленный участок диаметром около 5 мм. Морфологию поверхности исследовали с помощью РЭМ при углах наклона съемки 0 и 45° град.

Термическую стабильность рельефа на поверхности (после ионного облучения) и микроструктуры в объеме УМЗ образцов определяли путем отжига и последующего РЭМ исследования. Образцы отжигали в диапазоне температур от 1000 до 1400°C в вакууме в течение 1 ч. Скорость нагрева составила 20°C/мин, охлаждение вместе с печью не менее 4 ч. Микроструктуру в объеме УМЗ вольфрама исследовали после отжигов на поперечном срезе торца образца, который получали травлением фокусированным пучком ионов  $Ga^+$  с энергией 30 кэВ при токе около 4 нА.

Для косвенного контроля эволюции микроструктуры измеряли микротвердость образцов. Измерения проводили методом Виккерса с помощью микротвердомера МНТ-10 (Paar Physica, Австрия), совмещенным с оптическим микроскопом Carl Zeiss. Нагрузку индентора задавали равной 2, 3 Н.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате высокодозного облучения исходного (до деформации) мелкозернистого образца вольфрама (рис. 1а) ионами  $Ar^+$  с энергией 30 кэВ при нормальном падении ионов с флюенсом  $3 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> на его поверхности



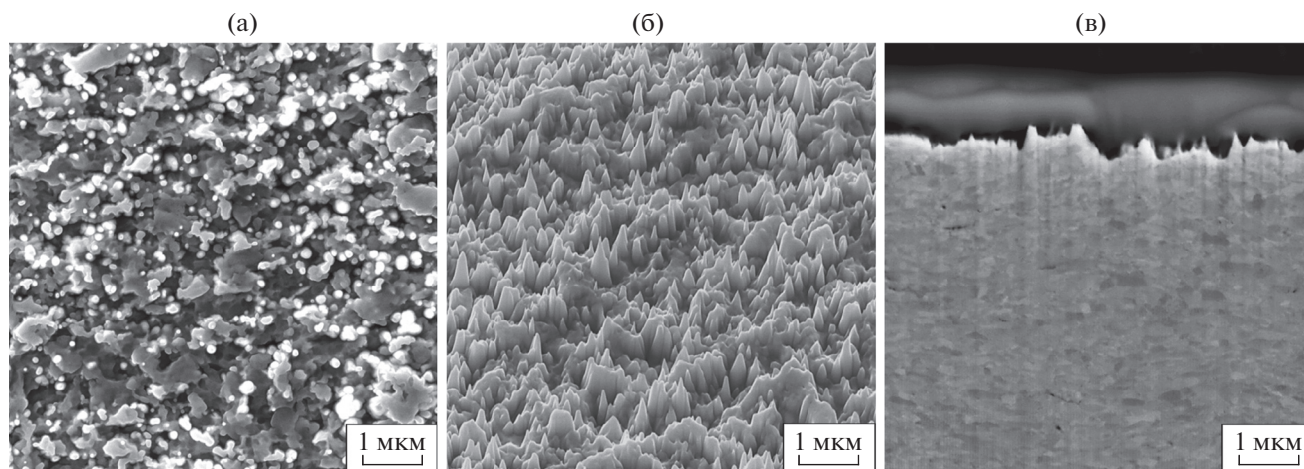
**Рис. 2.** РЭМ изображение микроstructures УМЗ вольфрама после деформации методом кручения под давлением 6 ГПа и 3.5 оборотах и распределение размера зерен.

сформировался сложный рельеф с перепадом высот между зернами (рис. 1б). На уступах границ зерен и на поверхности наиболее протравленных зерен образовались ионно-индуцированные конусы. Высота конусов сравнима с перепадом высот между зернами и составила около 1 мкм. Распределение конусов по поверхности неоднородное, имеется их локальное сосредоточение на наиболее протравленных участках поверхности образца.

Деформационное наноструктурирование методом кручения под высоким давлением привело

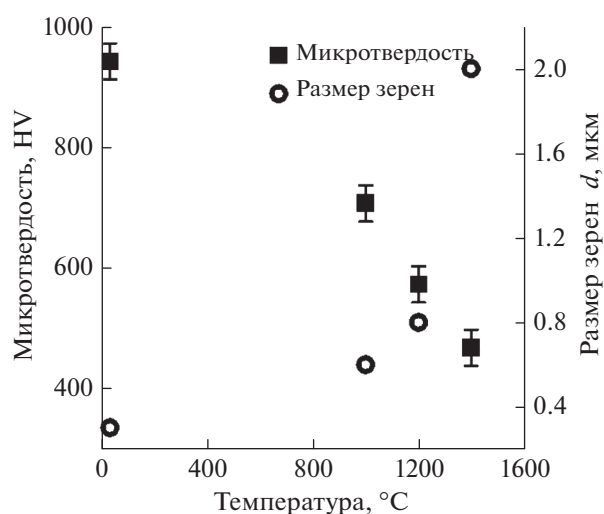
к формированию ультрамелкозернистой структуры в вольфраме. Размер зерен составил от 50 нм до 1.1 мкм при среднем значении 300 нм (рис. 2). Рентгеноструктурный анализ показал, что размер областей когерентного рассеяния составил около 50 нм, величина микронапряжений решетки — 0.15%. Значение размера зерен находится в хорошем согласии со значениями размеров зерен УМЗ вольфрама, исследованных в работах [28–30].

После высокодозного облучения УМЗ образца вольфрама ионами  $Ag^+$  с энергией 30 кэВ при нормальном падении ионов с флюенсом  $3 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>



**Рис. 3.** РЭМ изображения поверхности УМЗ вольфрама после облучения ионами  $\text{Ag}^+$  с энергией 30 кэВ с флюенсом  $3 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>: (а), (б) угол съемки 0 и 45° соответственно, (в) поперечный срез образца, полученный фокусированным пучком ионами  $\text{Ga}^+$  с энергией 30 кэВ.

на его поверхности сформировался конусообразный рельеф (рис. 3а, 3б), существенно отличающийся от рельефа облученного мелкозернистого образца. Элементами рельефа являются как заостренные зерна, выступающие над поверхностью, так и ионно-индуцированные конусы. Радиус закругления зерен при вершине составил около 100 нм, конусов — менее 50 нм. Периодичность расположения элементов рельефа на поверхности и их высота — 50–300 нм. Концентрация элементов составляет порядка  $10^8$ – $10^9$  см<sup>–2</sup>, что сопоставимо с концентрацией зерен на поверхности УМЗ образца.

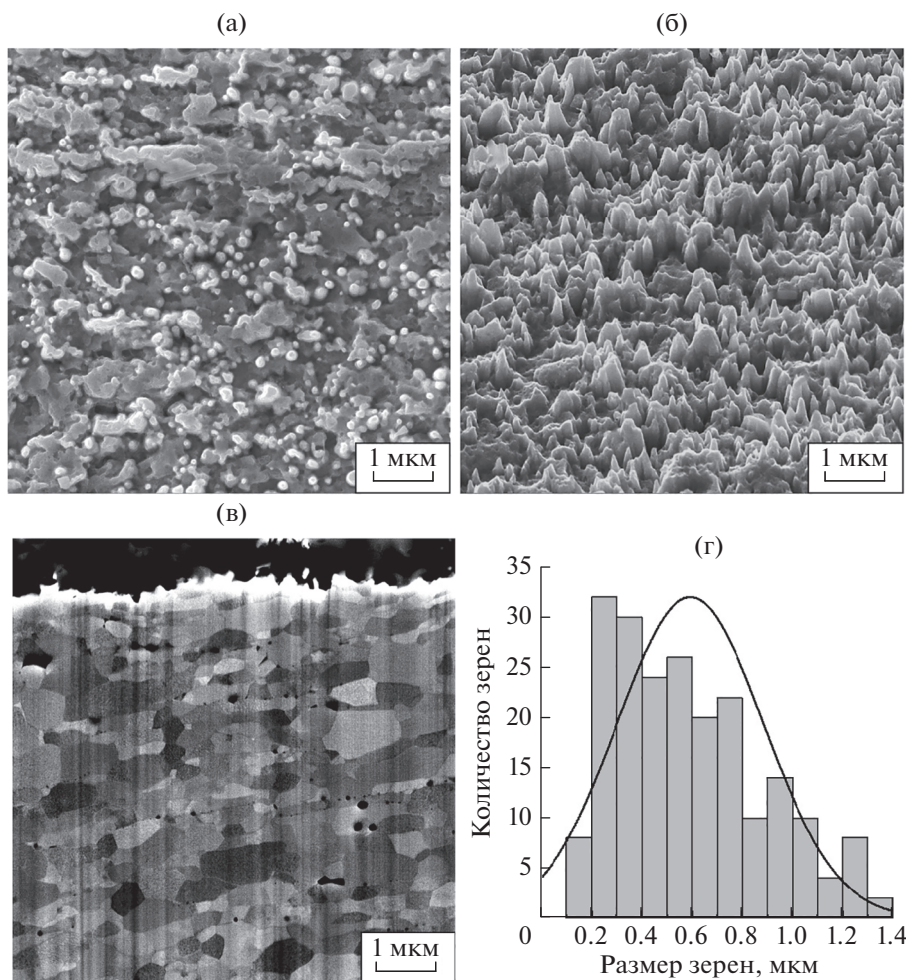


**Рис. 4.** Зависимость микротвердости HV и среднего размера  $d$  зерен УМЗ вольфрама от температуры отжига.

РЭМ исследования поперечного среза облученного УМЗ вольфрама, полученного травлением торца образца с помощью фокусированного пучка ионами  $\text{Ga}^+$  с энергией 30 кэВ (рис. 3в), подтверждают, что элементы конусообразного рельефа являются ионно-индуцированными. Конусы располагаются на зернах, которые находятся на поверхности, а заостренные зерна являются зернами поверхности. В приповерхностном слое между конусообразным рельефом поверхности и объемом образца не наблюдается каких-либо пор, трещин. Средний размер зерен в объеме образца и на его поверхности совпадают.

Для косвенной оценки термической стабильности микроструктуры УМЗ металлов нередко прибегают к измерению температурной зависимости микротвердости. Это связано с тем, что изменение размера зерен в объеме металла приводит к изменению микротвердости, согласно соотношению Холла–Петча. Микротвердость исходных мелкозернистых образцов вольфрама составила 580 HV. Формирование УМЗ структуры со средним размером зерен 300 нм в образцах вольфрама путем деформационного наноструктурирования привело к повышению микротвердости до 940 HV (рис. 4). Отжиг УМЗ образцов при температурах от 1000 до 1400°C приводит к монотонному снижению микротвердости до 470 HV при отжиге 1400°C. Снижение микротвердости при отжиге УМЗ вольфрама свидетельствует об увеличении размера зерен в нем.

В результате отжига УМЗ вольфрама при температуре 1000°C конусообразный рельеф практически сохранился. Высота заостренных зерен и конусов, их концентрация на поверхности имели такие же значения как до отжига. Единственным отличием являлось некоторое сглаживание ост-



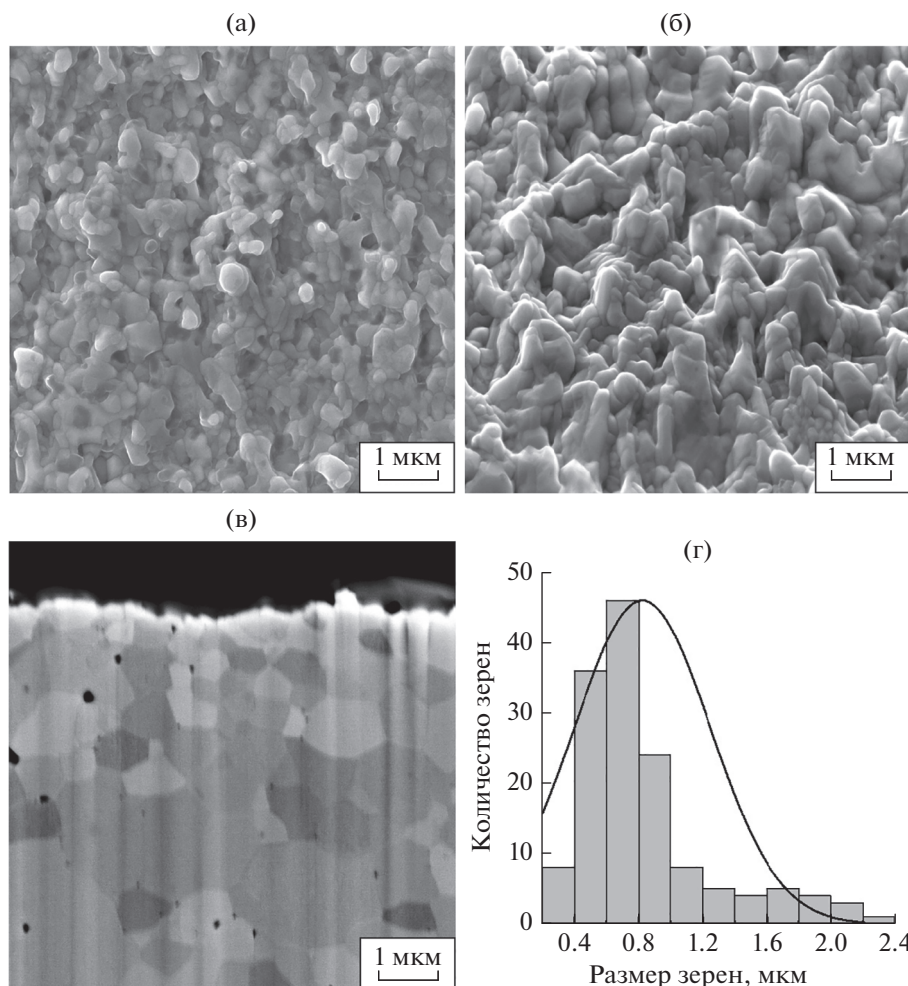
**Рис. 5.** РЭМ изображения поверхности УМЗ вольфрама после облучения ионами  $\text{Ar}^+$  с энергией 30 кэВ с флюенсом  $3 \cdot 10^{18}$  ион/ $\text{см}^2$  и последующего отжига при 1000°C в течение 1 ч: (а), (б) угол съемки 0 и 45° соответственно, (в) поперечный срез образца, полученный фокусированным пучком ионами  $\text{Ga}^+$  с энергией 30 кэВ, (г) распределение размера зерен в объеме.

рых кромок рельефа (рис. 5а, 5б). Сглаживание такого рельефа при температуре 1000°C можно связать с повышенной миграционной активностью поверхностных атомов вольфрама, которая начинается при 800°C [31]. Между тем на поперечном срезе образца можно заметить, что размер зерен в объеме вырос и составил от 150 нм до 1.4 мкм при среднем значении 600 нм (рис. 5в, 5г). Сохранение конусообразного рельефа вероятно связано с тем, что стенки выступающих конусов и заостренных зерен явились барьерами для их роста. В объеме металла таких барьеров как на поверхности не имеется.

Отжиг при 1200°C привел к изменению поверхности облученного УМЗ вольфрама. Конусообразный рельеф трансформировался в рельеф сглаженных выступов (рис. 6а, 6б). При детальном рассмотрении РЭМ изображения (рис. 6а) можно увидеть, что на поверхности такого релье-

фа появились образования с четкими границами раздела. Размер образований составил от 100 до 500 нм при среднем значении 300 нм. Возможно, они являются зародышами новых зерен, первичная рекристаллизация которых в деформированном вольфраме наблюдается при температуре около 1150°C [32]. Трансформацию конусообразного рельефа можно связать как с появлением, новых, первично рекристаллизованных, зерен, так и с повышением миграционной активности атомов вольфрама на кромках рельефа.

Анализ поперечного среза УМЗ образца показывает, что отжиг при 1200°C приводит к дальнейшему увеличению размера зерен в объеме материала. Размер варьируется от 300 нм до 2.4 мкм при среднем значении 800 нм (рис. 6в, 6г). При этом размер образований равный 300 нм на поверхности облученного материала имеет существенно меньшие значения. Это согласуется с ранее проведенны-



**Рис. 6.** РЭМ изображения поверхности УМЗ вольфрама после облучения ионами  $\text{Ag}^+$  с энергией 30 кэВ с флюенсом  $3 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> и последующего отжига при 1200°C в течение 1 ч: (а), (б) угол съемки 0 и 45° соответственно, (в) поперечный срез образца, полученный фокусированным пучком ионами  $\text{Ga}^+$  с энергией 30 кэВ, (г) распределение размера зерен в объеме.

ми исследованиями на УМЗ никеле, где ионно-индуцированный конусообразный рельеф сдержал рост зерен на поверхности и в приповерхностном слое при отжиге 500°C, в то время как в объеме размер зерен составил около 5 мкм [23].

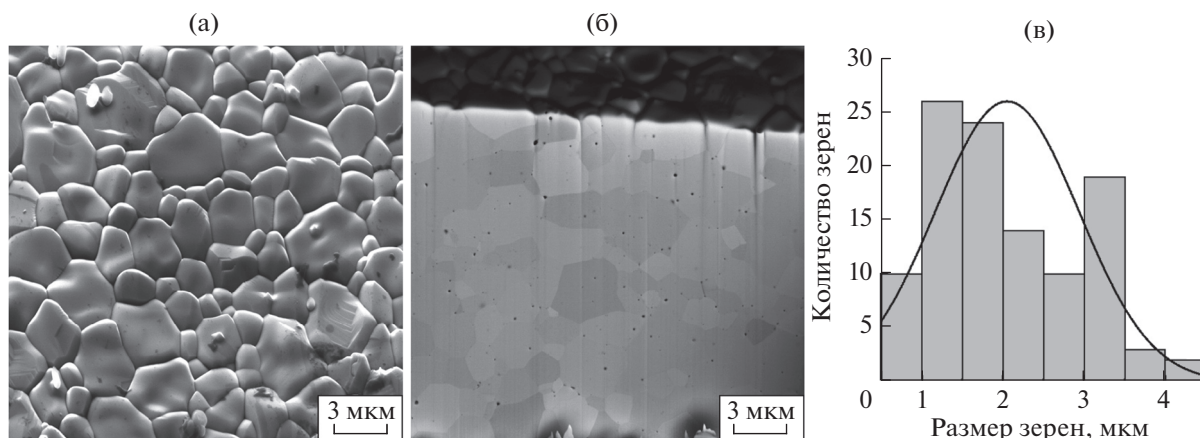
После отжига при 1400°C поверхность образца становится относительно гладкой, конусы на ней не наблюдаются. На поверхности и в объеме образца сформировалась мелкозернистая структура с размером зерен от 700 нм до 4 мкм при среднем значении 2 мкм (рис. 7). Размер зерен на поверхности становится равным размеру зерен в объеме.

При быстром нагреве вольфрама на его поверхности могут образовываться трещины [33]. В нашем случае, образование трещин или каких-либо других мезо- и макроскопических дефектов на поверхности и в объеме УМЗ образцов вольфрама при нагреве выявлено не было.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование ультрамелкозернистой структуры в объеме вольфрама со средним размером зерен 300 нм путем деформационного наноструктурирования и последующее облучение ионами аргона с энергией 30 кэВ с флюенсом  $3 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> позволяет получить на его поверхности конусообразный рельеф с поверхностной концентрацией конусов  $10^8$ – $10^9$  см<sup>-2</sup> и высотой до 300 нм. Высота конусов сопоставима с толщиной распыленного слоя.

Конусообразный рельеф на поверхности ультрамелкозернистого вольфрама термически стабилен до температуры не менее, чем 1000°C, что составляет  $0.34T_{\text{пл}}$ . На стабильность конусообразного рельефа на поверхности не оказывает значительный рост зерен в объеме образца. Отжиг при температуре 1200°C приводит к трансформации ко-



**Рис. 7.** РЭМ изображения поверхности УМЗ вольфрама после облучения ионами  $\text{Ar}^+$  с энергией 30 кэВ с флюенсом  $3 \cdot 10^{18}$  ион/ $\text{см}^2$  и последующего отжига при 1400°C в течение 1 ч: (а) угол съемки 45°, (б) поперечный срез образца, полученный фокусированным пучком ионами  $\text{Ga}^+$  с энергией 30 кэВ, (в) распределение размера зерен в объеме.

нусообразного рельефа в сглаженный рельеф выступов. На поверхности такого рельефа появляются образования со средним размером 300 нм, которые, возможно, являются новыми рекристаллизованными зернами. При этом средний размер зерен в объеме образца вырастает до 800 нм. После отжига ультрамелкозернистого вольфрама при 1400°C конусообразный рельеф не наблюдается. На поверхности и в объеме вольфрама формируется мелкозернистая структура с размером зерен 2 мкм.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа А.М. Борисова поддержана РНФ (проект № 21-79-30058), работа Р.Х. Хисамова, И.И. Мусабинова, Р.Р. Тимиряева и Р.Р. Мулюкова выполнена в рамках государственного задания Института проблем сверхпластичности металлов РАН. Электронно-микроскопические исследования проведены на оборудовании ЦКП «Структурные и физико-механические исследования материалов» ИПСМ РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Philips V. // J. Nucl. Mater. 2011. V. 415. P. S2. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.01.110>
2. Jiang W. et al. // J. Nucl. Mater. 2021. V. 550. P. 152905. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.152905>
3. Martynenko Yu.V., Nagel M.Yu. // Plasma Phys. Rep. 2012. V. 38. P. 996. <https://doi.org/10.1134/S1063780X12110074>
4. Kajita S., Kawaguchi S., Ohno N., Yoshida N. // Sci. Rep. 2018. V. 8 (1). P. 56. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18476-7>
5. Ogorodnikova O.V et al. // J. Nucl. Mater. 2022. V. 558. P. 153328. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.153328>
6. Zhang R. et al. // Nucl. Mater. Energy. 2022. V. 31. P. 101178. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2022.101178>
7. Litnovsky A. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2017. V. 59. P. 064003. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa6948>
8. Harutyunyan Z. et al. // J. Nucl. Mater. 2023. V. 578. P. 154353. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154353>
9. Efe M et al. // Scr. Mater. 2014. V. 70. P. 31. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.08.013>
10. Wu Y.C. et al. // J. All. Com. 2019. V. 779. P. 926. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.279>
11. Chen Z. et al. // Acta Mater. 2018. V. 147. P. 100. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.01.015>
12. Wurmshuber M. et al. // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 2023. V. 111. P. 106125. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106125>
13. El-Atwani O. et al. // Mater. Res. Lett. 2017. V. 5 (5). P. 343. <https://doi.org/10.1080/21663831.2017.1292326>
14. El-Atwani O. et al. // Scr. Mater. 2020. V. 180. P. 6. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.01.013>
15. Auciello O. // J. Vac. Sci. Technol. 1981. V. 19 (4). P. 841. <https://doi.org/10.1116/1.571224>
16. Carter G., Nobes M.J., Whitton J.L. // Appl. Phys. A. 1985. V. 38. P. 77. <https://doi.org/10.1007/BF00620458>
17. Was. G.S. // Prog. Surf. Sci. 1989. V. 32 (3-4). P. 211. [https://doi.org/10.1016/0079-6816\(89\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0079-6816(89)90005-1)
18. Begrambekov L.B., Zakharov A.M., Telkovsky V.G. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., Sect. B. 1996. V. 115 (1-4). P. 456. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(95\)01514-0](https://doi.org/10.1016/0168-583X(95)01514-0)
19. Qin W. et al. // Acta Mater. 2018. V. 153. P. 147. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.04.048>
20. Lopez-Cazalilla A. et al. // Phys. Rev. Mat. 2022. V. 6. P. 075402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.6.075402>

21. Borisov A.M., Mashkova E.S., Ovchinnikov M.A., Khisamov R.K., Mulyukov R.R. // J. Surf. Inv. 2021. V. 15. P. S66. <https://doi.org/10.31857/S1028096022030062>
22. Borisov A.M. et al. // Tech. Phys. Lett. 2022. V. 48 (6). P. 55. <https://doi.org/10.21883/TPL.2022.06.53792.19146>
23. Borisov A.M. et al. // J. Surf. Inv. 2023. V. 17. P. 54. <https://doi.org/10.31857/S1028096023010077>
24. Nazarov A.A., Mulyukov R.R. Nanostructured Materials. In: Handbook of NanoScience. Engineering and Technology. 2002. Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420040623>
25. Yusupova N.R., Krylova K.A., Mulyukov R.R. // Lett. Mater. 2021. V. 11. No. 4. P. 382–385. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-4-382-385>
26. Markushev M.V. et al. // Lett. Mater. 2022. V. 12 (4s). P. 463. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2022-4-463-468>
27. Mashkova E.S., Molchanov V.A. Medium-Energy Ion Reflection from Solids. 1985. Amsterdam: North-Holland.
28. Mulyukov R.R. et al. // JETP Lett. 2000. V. 72. P. 257. <https://doi.org/10.1134/1.1324023>
29. Mulyukov R.R. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2006. V. 24. P. 1061. <https://doi.org/10.1116/1.2174024>
30. Zhang Y. et al. // Mater. Sci. Forum. 2008. V. 584. P. 1000. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.584-586.1000>
31. Muller E.W. // Zeitschr. Phys. 1937. V. 106 (5-6). P. 541. <https://doi.org/10.1007/BF01339895>
32. Farrell K., Schaffhauser A.C., Stiegler J.O. // J. Less Common Metals. 1967. V. 13. P. 141. [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(67\)90177-4](https://doi.org/10.1016/0022-5088(67)90177-4)
33. Vyacheslavov L.N. et al. // Phys. Scr. 2018. V. 93. P. 035602. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/aaa119>

## Thermal Stability of Ion-Induced Cone-Shaped Relief on the Surface and Microstructure of Ultrafine-Grained Tungsten Obtained by Deformation Nanostructuring

**R. Kh. Khisamov<sup>1, \*</sup>, N. N. Andrianova<sup>2, 3</sup>, A. M. Borisov<sup>2, 3, 4</sup>, M. A. Ovchinnikov<sup>3</sup>,  
R. R. Timiryayev<sup>1</sup>, I. I. Musabirov<sup>1</sup>, and R. R. Mulyukov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences, Ufa, 450001 Russia*

<sup>2</sup>*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993 Russia*

<sup>3</sup>*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

<sup>4</sup>*Moscow State Technological University "Stankin", Moscow, 127055 Russia*

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

Received May 26, 2023; revised May 31; accepted June 5, 2023

**Abstract**—The results of the study of the effect of deformation nanostructuring on the formation of a cone-shaped relief on the surface of ultrafine-grained tungsten with an average grain size of 300 nm under high-fluence irradiation with argon ions with an energy of 30 keV are presented. The thermal stability of the resulting cone-shaped relief on the surface and the ultrafine-grained structure in the volume of tungsten under heating up to 1400°C has been studied. Changes of microhardness were measured.

**Keywords:** tungsten, deformation nanostructuring, ultrafine-grained structure, ion irradiation, cones, thermal stability, microhardness