

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

МАТЕРИАЛЫ
XXVII КОНФЕРЕНЦИИ

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Москва, НИЯУ МИФИ, 24-25 января 2024 г.

Сборник научных трудов

Москва
2024

ББК 22.333
УДК 533.9 (06)
В 40

Материалы XXVII конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, 24-25 января 2024 г.: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2024. – 151 с.

Сборник содержит материалы докладов, представленных на ежегодно проводимую в НИЯУ МИФИ 27-ю конференцию по взаимодействию плазмы с поверхностью. Тематика конференции охватывает экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия плазмы с поверхностью в установках управляемого термоядерного синтеза.

Материалы сборника могут быть полезны научным работникам, аспирантам и студентам в научно-исследовательской, учебно-методической и практической работе.

Аннотации докладов, входящих в сборник, опубликованы в авторской редакции при минимальной редакционной правке.

Материалы получены до 24 января 2024 г.

Редакционная коллегия:

Ю.М. Гаспарян

Д.Н. Синельников

М.В. Гришаев (ответственный редактор)

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
2024

ISBN 978-5-7262-3031-3

Р.Х. ХИСАМОВ^{1*}, Н.Н. АНДРИАНОВА^{2,3}, А.М. БОРИСОВ^{1,3,4},
М.А. ОВЧИННИКОВ³, И.И. МУСАБИРОВ¹, Р.Р. ТИМИРЯЕВ¹,
Р.Р. МУЛЮКОВ¹

¹*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия*

²*Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия*

³*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

⁴*Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", Москва, Россия*

**r.khisamov@mail.ru*

ПОЛУЧЕНИЕ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ОБРАЩЕННЫХ К ПЛАЗМЕ ОБРАЗЦОВ ВОЛЬФРАМА С УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ

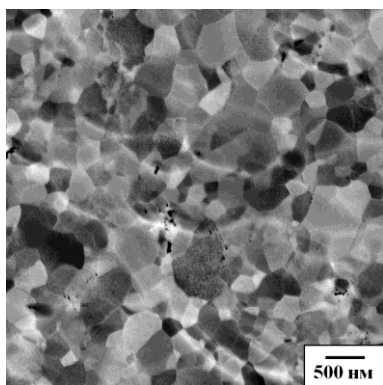
Вольфрам, благодаря высокой температуре плавления, низкому коэффициенту распыления, низкой способности к захвату водорода, является перспективным обращенным к плазме материалом в термоядерном реакторе. Однако, его стойкость к ионно-плазменным воздействиям все еще недостаточна. Одним из способов повышения стойкости вольфрама к таким воздействиям может явиться создание в нем ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры. Например, в [1,2] исследовано поведение УМЗ вольфрама с размером зерен менее 1 мкм при облучении ионами гелия, где показано, в частности, что УМЗ структура позволяет повысить порог по флюенсу для образования блистеров. Целью данной работы являлось получение УМЗ структуры в вольфраме и исследование влияния УМЗ структуры на ионное распыление.

Ультрамелкозернистую структуру в образцах вольфрама чистотой 99.9% получили деформационным наноструктурированием методом кручения под высоким давлением [3]. Деформацию осуществляли на наковальнях Бриджмена при давлении 6 ГПа и 5 оборотах наковальни при комнатной температуре. Образцы при этом нагревались не выше 50°C. Полученные в результате деформации образцы имели вид дисков диаметром 10 мм толщиной около 0.3 мм. Для сравнительных исследований использовали образцы листового вольфрама, полученного прокаткой, с мелкозернистой (МЗ) структурой с размером зерен 2 мкм. Микроструктуру образцов исследовали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Tescan Mira 3 LHM и рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima IV с Cu-K α

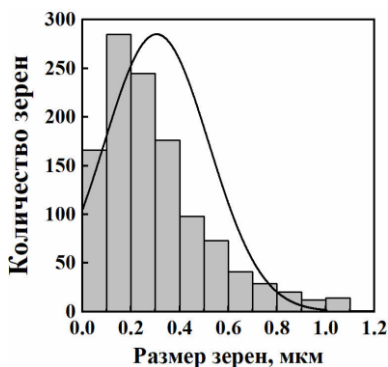
облучением. Размер зерен оценивали методом дифракции обратно-отраженных электронов с шагом сканирования 50 нм.

Для оценки влияния УМЗ структуры вольфрама на ионное распыление и для создания развитой морфологии поверхности образцы подвергали облучению ионами аргона с энергией 30 кэВ по нормали к поверхности на масс-монохроматоре НИИЯФ МГУ [4]. Площадь поперечного сечения пучка составляла 0.3 см², плотность ионного тока - 0.3 мА/см². Флюенс однократного циклического облучения составлял 3×10^{18} ион/см². Температура образцов при облучении не превышала 50°C. В процессе облучения для *in situ* мониторинга структурно-морфологических изменений поверхностного слоя образцов производили измерения ионно-электронной эмиссии.

Деформационное наноструктурирование привело к формированию УМЗ структуры в вольфраме с размером зерен от 50 нм до 1.1 мкм при среднем значении 300 нм (рис.1). Микроструктура УМЗ образцов имела равноосные зерна с высокой долей большеугловых границ зерен.



(а)



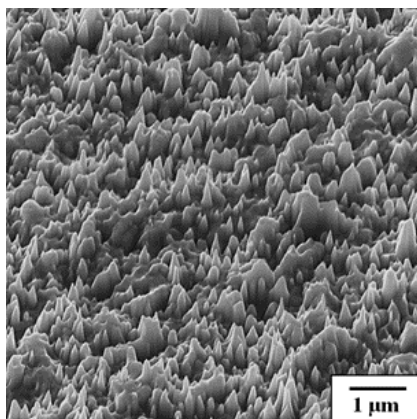
(б)

Рисунок 1 – РЭМ-изображение микроструктуры УМЗ вольфрама, полученного деформационным наноструктурированием методом кручения под высоким давлением при 6 ГПа (а), распределение размера зерен (б)

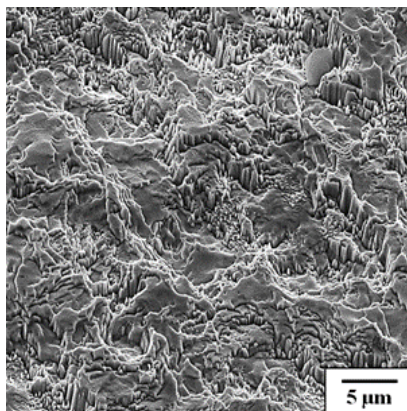
Исследования с помощью рентгеновской дифракции и дифракции обратно-отраженных электронов показали, что в УМЗ образцах отсутствовала кристаллографическая текстура. В случае МЗ образцов, полученных прокаткой, наблюдалась доминирующая кристаллографическая текстура с

ориентацией зерен близкой к (001).

В результате облучения исходно гладкая поверхность УМЗ образцов распыляется с образованием на поверхности конусов высотой 300 нм и плотностью 10^9 см^{-2} (рис. 2а). Таким же рельеф остается и после нескольких циклов облучения с флюенсом 3×10^{18} ион/см². Квazистационарный конусообразный рельеф на поверхности УМЗ образца образуется при распылении слоя толщиной сопоставимой с размером зерен. Коэффициент распыления, измеренный весовым методом, составил 3.5 – 3.6 ат./ион. При распылении прокатанных МЗ образцов формируется сложный рельеф с перепадом высот между зернами, ямками травления и немногочисленными скоплениями конусов (рис. 2б). Установившийся при флюенсах от $3 \cdot 10^{18}$ до $1.8 \cdot 10^{19}$ ион/см² коэффициент распыления составил 1.8 ат./ион.



а)



б)

Рисунок 2 – РЭМ-изображения поверхности образцов вольфрама с различной микроструктурой после облучения ионами Ag^+ с энергией 30 кэВ: а) УМЗ, флюенс $3 \cdot 10^{18}$ ион/см², б) МЗ, флюенс $1.8 \cdot 10^{19}$ ион/см²

Коэффициент ионно-электронной эмиссии, определенный как отношение тока вторичных электронов к току первичных ионов для УМЗ вольфрама составил 1.9–2.2 эл./ион и 1.6 – 1.9 эл./ион для МЗ вольфрама.

Таким образом, деформационное наноструктурирование вольфрама методом кручения под высоким давлением при комнатной температуре приводит к формированию УМЗ структуры со средним размером зерен 300

нм. При высокодозном облучении УМЗ вольфрама ионами аргона с энергией 30 кэВ образуется однородный конусообразный рельеф на поверхности. Стационарный режим эрозии поверхности наступает при флюенсах, достаточных для распыления слоя толщиной порядка размера зерен. Увеличенные коэффициенты распыления и ионно-электронной эмиссии для УМЗ вольфрама могут быть связаны не только с различием рельефа на УМЗ и МЗ образцах, но и с меньшим размером зерна и со значительной текстурой образцов листового вольфрама.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-79-30058 и государственного задания ИПСМ РАН. Электронно-микроскопические исследования выполнены на базе ЦКП ИПСМ РАН “Структурные и физико-механические исследования материалов”.

Литература

- [1] O. El-Atwani et al. Nucl. Fusion. 2014. V.54. P.083013.
- [2] Z. Chen et al. Acta Materialia 147 (2018) 100-112.
- [3] Nazarov A.A., Mulyukov R.R. Nanostructured Materials. In: Handbook of NanoScience. Engineering and Technology. CRC Press, Boca Raton, 2002. P. 22-1–22-41.
- [4] <http://beam.sinp.msu.ru>.