

МТК-52  
Москва-2023

# ВЫСОКОДОЗНАЯ ИОННО-ЛУЧЕВАЯ ЭРОЗИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ВОЛЬФРАМА

Р.Х. Хисамов<sup>1\*</sup>, Н.Н. Андрианова<sup>2,3</sup>, А.М. Борисов<sup>2,3,4</sup>, М.А. Овчинников<sup>3</sup>,

И.И. Мусабилов<sup>1</sup>, Р.Р. Тимирязев<sup>1</sup>, Р.Р. Мулюков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем сверхпластичности металлов, Российская академия наук, Уфа, Россия

<sup>2</sup>Московский авиационный институт, Научно-исследовательский университет, Москва, Россия

<sup>3</sup>НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет, Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия



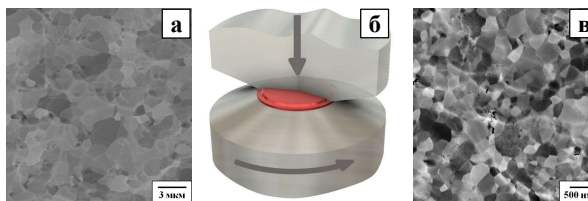
## Введение

Нано и ультрамелкозернистые металлы, полученные деформационным наноструктурированием, могут иметь перспективу применения в качестве материалов обращенных к плазме в термоядерном реакторе. Металлы с такой структурой имеют улучшенные физико-механические свойства, могут сдерживать образование блистеров, структур типа «пух» на поверхности, которые образуются при облучении ионами гелия.

Сдерживать образование блистеров и пуха могут и конусы, равномерно распределенные по поверхности металла. Ранее в [1,2] было показано, что 30 кэВ облучение  $Ag^+$  ультрамелкозернистого никеля позволяет получить конусообразный рельеф с концентрацией конусов  $10^8 \text{ см}^{-2}$  с высотой до 1 мкм. Конусы на поверхности никеля с такой структурой термостабильны до 0.4Тпл, в то время как зерна термостабильны до 0.3 Тпл. Проведение подобных исследований образования конусообразного рельефа поверхности вольфрама при ионном облучении и термостабильности полученного рельефа представляет практический интерес.

## Материалы и методы исследований

1. Материал – Вольфрам (99.93%)
2. Исследуемые образцы, размер зерен  $d$ : (УМЗ) ультрамелкозернистый ( $d=300 \text{ нм}$ ) (МЗ) мелкозернистый ( $d=2 \text{ мкм}$ )
3. Облучение 30 кэВ ионами  $Ag^+$
4. РЭМ, АСМ исследование поверхности
5. Определение термической стабильности
6. Исследование поперечного среза
7. Оценка коэффициента распыления

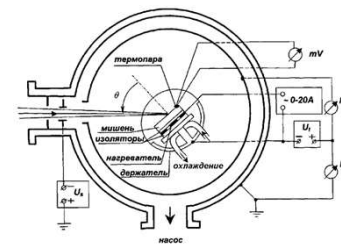


(а) исходный образец - мелкозернистая структура ( $d=2 \text{ мкм}$ )

(б) режимы деформационного наноструктурирования:

$P=6 \text{ ГПа}$ , число оборотов - 3.5,  $T<50^\circ\text{C}$

(в) после деформации - ультрамелкозернистая структура ( $d=300 \text{ нм}$ )

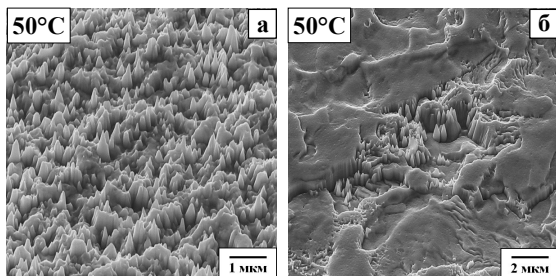


Масс-монохроматор НИИЯФ МГУ [3]

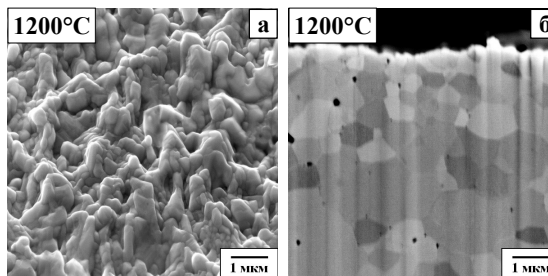
Режимы облучения:

$Ag^+ \rightarrow W$ ,  $E=30 \text{ кэВ}$ ,  $j=0.3 \text{ мА/см}^2$ ,  $\alpha=0^\circ$ , флюенс -  $3 \cdot 10^{18} \text{ ион/см}^2$ ,  $T \sim 50^\circ\text{C}$

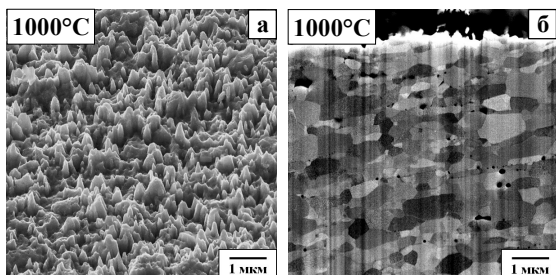
## Результаты исследований



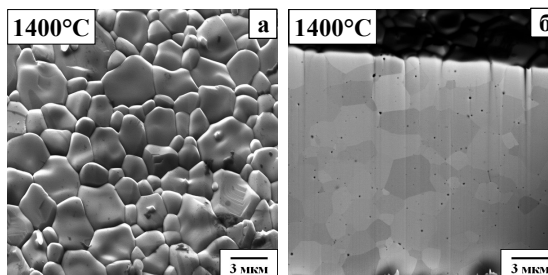
УМЗ (а) и МЗ (б) вольфрам после 30 кэВ  $Ag^+$  облучения. Угол съемки  $45^\circ$ . Концентрация конусов на УМЗ образце составляет  $10^8 \div 10^9 \text{ см}^{-2}$ , в то время как на МЗ образце концентрация конусов менее, чем  $10^6 \text{ см}^{-2}$



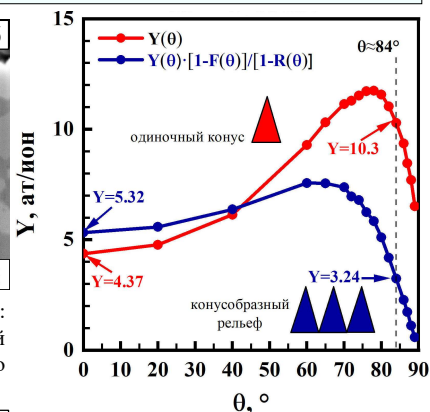
УМЗ вольфрам после облучения и отжига при  $1200^\circ\text{C}$ : поверхность (а), поперечный срез (б). Конусообразный рельеф трансформировался в рельеф выступов, в то время как в объеме образца размер  $d$  вырос до 800 нм.



УМЗ вольфрам после облучения и отжига при  $1000^\circ\text{C}$ : поверхность (а), поперечный срез (б), получением травлением фокусированным пучком 30 кэВ  $Ga^+$ . Конусообразный рельеф сохранился, в то время как в объеме образца размер  $d$  вырос до 600 нм.



УМЗ вольфрам после облучения и отжига при  $1400^\circ\text{C}$ : поверхность (а), поперечный срез (б). Конусообразный рельеф исчез. На поверхности и в объеме образца сформировалась мелкозернистая структура с размером зерен  $d=2 \text{ мкм}$ .



Коэффициент распыления  $Y$  от угла наклона конуса  $\theta$ . Измеренный угол  $\theta$  для конусов на УМЗ вольфраме составляют около  $84^\circ$ . Расчетный коэффициент  $Y$  для равномерно распределенных конусов по поверхности УМЗ вольфрама с учетом перепыления атомов  $F$  и коэффициента отражения ионов  $R$  составляет 3.24, что в 3 раза меньше, чем коэффициент распыления  $Y=10.3$  для одиночного конуса и в 1.3÷1.7 раза меньше, чем коэффициент распыления  $Y$  для гладкой поверхности.

## Заключение

Формирование УМЗ структуры в объеме вольфрама со средним размером зерен 300 нм путем деформационного наноструктурирования и последующее 30 кэВ облучение ионами  $Ag^+$  с флюенсом  $3 \cdot 10^{18} \text{ ион/см}^2$  позволяет получить на поверхности конусообразный рельеф с поверхностной концентрацией конусов  $10^8 \div 10^9 \text{ см}^{-2}$ , высотой до 300 нм, с углами наклона конусов  $\theta \approx 84^\circ$ . Конусообразный рельеф на поверхности УМЗ вольфрама термически стабилен не менее, чем до  $1000^\circ\text{C}$  ( $0.34T_{пл}$ ). Расчетный коэффициент распыления  $Y$  для равномерно распределенных конусов по поверхности УМЗ вольфрама с учетом перепыления атомов  $F$  и коэффициента отражения ионов  $R$  составляет 3.24, что в 3 раза меньше, чем  $Y=10.3$  для одиночного конуса и 1.3÷1.7 раз меньше, чем  $Y$  для гладкой поверхности.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания ИПСМ РАН и финансовой поддержки гранта РНФ № 21-79-30058. Электронно-микроскопические исследования выполнены на базе ЦКП ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов»

### Список литературы:

- [1] А.М. Борисов, Е.С. Машкова, М.А. Овчинников, Р.Х. Хисамов, Р.Р. Мулюков // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. 2022. №3. С.71-78.
- [2] А.М. Борисов, Е.С. Машкова, М.А. Овчинников, Р.Х. Хисамов, Р.Р. Мулюков // Письма в Журнал технической физики. 2022. Т.48. №12. С.24.
- [3] E.S. Mashkova, V.A. Molchanov. Medium-Energy Ion Reflection from Solids (North-Holland, Amsterdam, 1985). P.444.