

УДК 537.534:538.911

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ НА ИОННО-ЛУЧЕВУЮ ЭРОЗИЮ МЕТАЛЛОВ

© 2024 г. Н. Н. Андрианова^{1, 2}, А. М. Борисов^{1, 2, 3*}, М. А. Овчинников¹, Р. Х. Хисамов⁴,
Р. Р. Мулюков⁴

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова”,

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)”, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»”, Москва, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук”, Уфа, Россия

*E-mail: anatoly_borisov@mail.ru

Поступила в редакцию 15.11.2023

После доработки 22.11.2023

Принята к публикации 28.12.2023

Исследовано влияние деформационного наноструктурирования меди, никеля и титана на ионно-индуцированную морфологию и распыление при высокодозном облучении ионами аргона с энергией 30 кэВ по нормали к поверхности. Распыление слоя, соизмеримого с размером зерен металлов, приводит к однородному конусообразному рельефу, стационарная эрозия которого происходит со значительным перепылением атомов.

DOI: 10.31857/S0367676524040066, EDN: QIOERP

ВВЕДЕНИЕ

Металлы с нано и ультрамелкозернистой структурами (размер зерен менее 100 нм и 1 мкм, соответственно) рассматриваются в качестве материалов для деталей, обращенных к плазме в термоядерном реакторе. Это обусловлено тем, что металлы с такими структурами, наряду с высокими механическими свойствами способны сдерживать образование блистеров при облучении ионами гелия [1–3]. Материал, обращенный к плазме, должен иметь также низкий коэффициент распыления. Влияние размера зерен металлов на ионное распыление изучали в [4–9]. В [9] магнетронному распылению подвергали медные мишени с размером зерен 10–20 и 120–150 мкм. Показано, что коэффициент распыления для мишени с меньшим размером зерен больше на 4%, чем коэффициент распыления мишени с большим размером зерен. Авторы считают, что повышение коэффициента распыления связано с повышенной долей границ зерен в мишени с меньшим размером зерен. В целом, вопрос о влиянии размера зерен на коэффициент распыления, определение величины такого эффекта и даже

факта его существования требуют проведения дополнительных исследований.

В настоящей работе экспериментально изучали влияние размера зерен поликристаллических образцов меди, никеля и титана на закономерности эрозии поверхности при высоких флюенсах облучения монохроматическим пучком ионов аргона с энергией 30 кэВ при необходимых и достаточных условиях для абсолютных весовых измерений коэффициента распыления [10,11].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Материалами в эксперименте являлись: медь (М1), никель (Н-0), титан (ВТ1-0). Исходные образцы меди имели мелкозернистую структуру с размером зерен до 10 мкм, образцы никеля и титана — крупнозернистую структуру с размером зерен до 100 мкм. Для получения ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры в образцах использовали деформационное наноструктурирование методом кручения под высоким давлением [12, 13]. Деформацию кручением осуществляли на накопках Бриджмена [14, 15] под давлением 6 ГПа

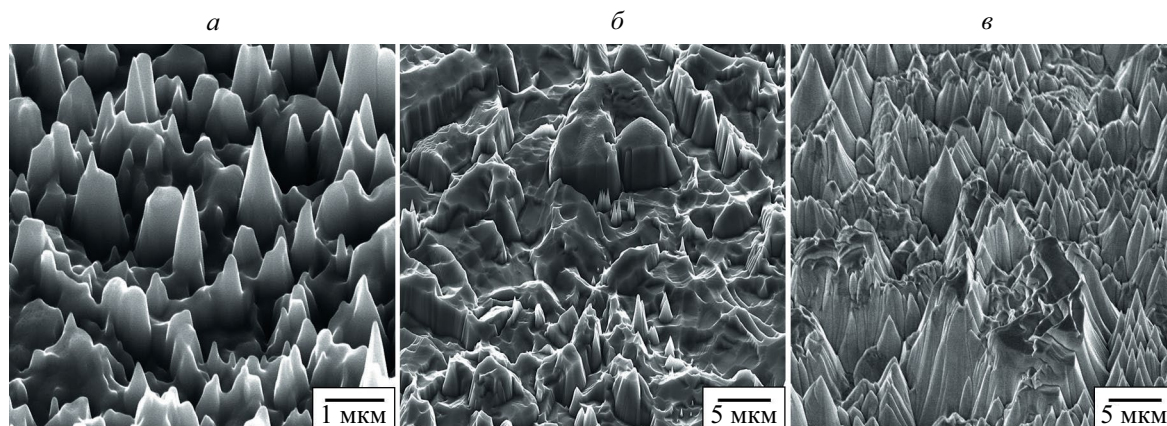


Рис. 1. РЭМ изображения поверхности образцов меди с разной структурой после облучения ионами Ag^+ с энергией 30 кэВ: (а) ультрамелкозернистый, облученный с флюенсом $3 \cdot 10^{18}$ ион/см², (б) мелкозернистый — с флюенсом $3 \cdot 10^{18}$ ион/см², (в) мелкозернистый — с флюенсом $1.2 \cdot 10^{19}$ ион/см².

и 10 оборотах. Образцы во время деформации кручением нагревались не выше 50°C. Полученные в результате деформации образцы имели форму дисков диаметром 12 мм, толщиной около 0.7 мм. Для придания зеркально-гладкой поверхности образцы механически полировали. Аттестацию микроструктуры, оценку размера зерен определяли с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) Tescan Mira 3LHM.

Облучение образцов проводили ионами Ag^+ с энергией 30 кэВ при нормальном падении ионов на масс-монохроматоре НИИЯФ МГУ [10]. Ток ионов на образец составлял около 100 мкА при плотности 0.3 мА/см². В процессе облучения периодически регистрировали токи ионов и вторичных электронов для определения флюенса облучения и коэффициента ионно-электронной эмиссии. Флюенс однократного облучения составлял около $3 \cdot 10^{18}$ ион/см². Контроль температуры осуществляли с помощью хромель-алюмелевой термопары, спай которой укрепляли на облучаемой стороне мишени вне зоны облучения. Температура образцов при облучении не превышала 50°C. Образцы подвергали многократному облучению с суммарным флюенсом до $1.5 \cdot 10^{19}$ ион/см².

Морфологию поверхности образцов исследовали с помощью РЭМ. Коэффициент распыления определяли по изменению веса образцов до и после облучения с точностью 0.01 мг. Экспериментальные значения коэффициента распыления сравнивали с результатами моделирования распыления гладкой и шероховатой поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В результате деформационного наноструктурирования в образцах металлов была сформирована ультрамелкозернистая структура. Размер зерен,

определенный с помощью метода дифракции обратно отраженных электронов с шагом сканирования 50 нм, составил: в образцах меди от 50 нм до 1.2 мкм при среднем значении 450 нм, в образцах никеля от 50 нм до 1 мкм при среднем значении 300 нм. В образцах УМЗ титана размер зерен, определенный с помощью просвечивающей электронной микроскопии, составил 200–300 нм [16].

Высокодозное облучение УМЗ образцов ионами Ag^+ с энергией 30 кэВ с флюенсом $3 \cdot 10^{18}$ ион/см² привело к формированию на их поверхности конусообразного рельефа (рис. 1а). На образцах меди и никеля коническими элементами рельефа являлись как заостренные при вершине зерна, так и ионно-индуцированные конусы. Радиус закругления зерен при вершине составлял около 100 нм, конусов — менее 50 нм. Поверхностная концентрация конических элементов составила порядка 10^8 см⁻², а их высота достигала 1 мкм, что сопоставимо с концентрацией зерен на поверхности и их размером. Увеличение флюенса облучения до $1.5 \cdot 10^{19}$ ион/см² не приводило к существенным изменениям формы конусообразного рельефа. Его форма, поверхностная концентрация конических элементов и их высота оставались практически одними и теми же.

Облучение мелкозернистых образцов меди с размером зерен до 10 мкм и крупнозернистых образцов никеля с размером зерен до 100 мкм с флюенсом $3 \cdot 10^{18}$ ион/см² привело к формированию на их поверхности сложного рельефа с перепадом высот между зернами (рис. 1б). На большинстве зерен наблюдали ямки травления. На поверхности наиболее протравленных зерен располагались немногочисленные скопления конусов. Последующее облучение мелкозернистых образцов меди с флюенсом $1.2 \cdot 10^{19}$ ион/см² привело к образованию на поверхности конусообразного рельефа

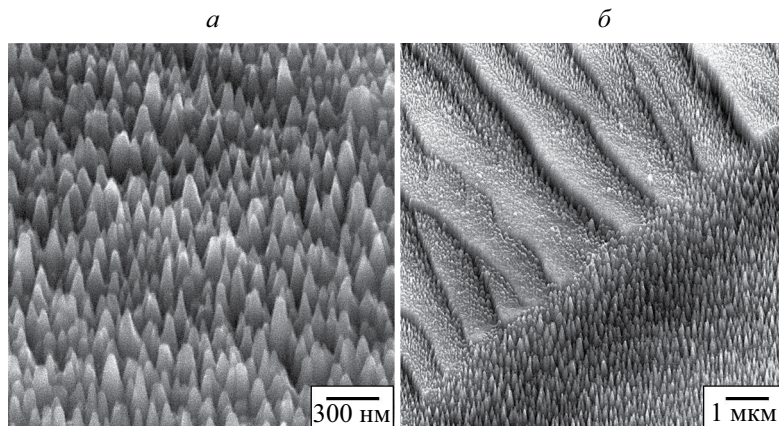


Рис. 2. РЭМ изображения поверхности образцов титана после облучения ионами Ag^+ с энергией 30 кэВ: (а) ультрамелкозернистый, облученный с флюенсом $3 \cdot 10^{18}$ ион/см², (б) крупнозернистый — с флюенсом $1.2 \cdot 10^{19}$ ион/см².

с заостренными при вершине зернами и ионно-индуцированными конусами на поверхности зерен (рис. 1а). Поверхностная концентрация конических элементов, 10^5 – 10^6 см⁻², высота, единицы мкм, также сопоставимы с концентрацией зерен на поверхности и их размером, как в случае ультрамелкозернистой меди. Последующее облучение мелкозернистого образца меди с еще большим флюенсом не приводило к существенному изменению формы рельефа.

В случае крупнозернистого никеля с размером зерен до 100 мкм облучение вплоть до флюенса $1.5 \cdot 10^{19}$ ион/см² не привело к формированию однородного конусообразного рельефа поверхности, как на меди. Форма рельефа оставалась практически такой же, как при облучении с меньшим флюенсом и отличалась лишь высотой конических элементов.

Существенное отличие ионно-индуцированного рельефа наблюдали для образцов титана. На поверхности УМЗ титана при облучении с флюенсом $3 \cdot 10^{18}$ ион/см² сформировался конусообразный рельеф, состоящий лишь из ионно-индуцированных конусов высотой — 100–300 нм (рис. 2а). При этом каких-либо выступающих или протравленных зерен, как на УМЗ меди и никеле, не наблюдали. Поверхностная концентрация конусов составила порядка 10^{10} см⁻². Последующее облучение с флюенсом $1.2 \cdot 10^{19}$ ион/см² не приводило к изменению формы рельефа.

Облучение крупнозернистого титана с размером зерен до 100 мкм с флюенсом до $1.2 \cdot 10^{19}$ ион/см² привело к развитию рельефа с незначительным перепадом высот между зернами (рис. 2б). На поверхности одних зерен образовались ряды ионно-индуцированных конусов, на других зернах — уступы с конусами. Есть также зерна, на поверхности которых наблюдали лишь немногочисленные ямки травления.

Коэффициент распыления Y определяли согласно выражению

$$Y = \frac{\Delta m}{\Phi} \cdot \frac{N_a}{A \cdot S}, \quad (1)$$

где Δm — убыль веса, Φ — флюенс облучения, N_a — число Авогадро, A — молярная масса, S — площадь облучения.

Измерения показали, что коэффициенты Y для образцов меди с различной структурой близки и практически не зависят от флюенса облучения. Коэффициент Y для УМЗ меди варьировался от 9.2 до 10 ат./ион при среднем значении 9.6 ат./ион, коэффициент Y для мелкозернистой меди варьировался от 8.4 до 10.2 при среднем значении 9.3 ат./ион. Установленные коэффициенты Y оказались близкими к измеренному ранее в [11,17] $Y=9.3$ ат./ион для крупнозернистой меди при облучении ионами Ag^+ с энергией 30 кэВ.

Коэффициент Y для УМЗ никеля варьировался от 5.6 до 6.4 ат./ион при среднем значении 6 ат./ион, для крупнозернистого никеля — от 4.7 до 5.8 ат./ион при среднем значении 5.3 ат./ион.

В целом, принимая во внимание, что размер зерен в изученных образцах металлов отличается не менее чем на порядок в случае меди, и на два порядка в случае никеля, а коэффициент распыления отличается не более 10%, можно заключить, что коэффициент распыления слабо зависит от размера зерен, по крайней мере, вплоть до 100 нм. Кроме этого, на коэффициент распыления Y меди и никеля слабое влияние оказал и различный рельеф поверхности как УМЗ, так и мелко- и крупнозернистых образцов при различных флюенсах облучения.

Для УМЗ и крупнозернистого титана коэффициент распыления также слабо зависит от размера зерен. Однако по сравнению с медью и никелем

распыление титана имеет отличия. При облучении изначально зеркально-гладкой поверхности образцов титана с разным размером зерен коэффициент Y составил 1.0–1.2 ат./ион. Повышение флюенса облучения привело к снижению коэффициента Y до 0.7 ат./ион. Такого рода подавления распыления с флюенсом облучения для меди и никеля не наблюдали.

Известно, что одним из основных параметров рельефа, определяющим распыление поверхности ионной бомбардировкой, является угол наклона топографических элементов на поверхности, см., например, [17, 18]. Если в процессе облучения распределение углов наклона не меняется со временем облучения, то можно говорить о формировании стационарного (установившегося) рельефа облучаемой поверхности. Эксперимент показывает, что уже при флюенсе облучения $3 \cdot 10^{18}$ ион/см² на поверхности УМЗ образцов металлов формируется конусообразный рельеф, и он не меняется с дальнейшим увеличением флюенса. Условием для формирования такого стационарного конусообразного рельефа на поверхности УМЗ металлов является превышающее значение толщины распыленного слоя по сравнению с размером зерен в нем. Например, для УМЗ меди оценка толщины распыленного слоя при флюенсе $3 \cdot 10^{18}$ ион/см² составляет около 4 мкм (рис. 3), что существенно превышает средний размер зерен 450 нм. Однако для мелкозернистого образца меди при флюенсе облучения $3 \cdot 10^{18}$ ион/см² такая толщина распыленного слоя недостаточна для образования стационарного рельефа. Но, когда флюенс облучения превышает $9 \cdot 10^{18}$ ион/см² и распыленный слой достигает толщины 10 мкм, на поверхности мелкозернистого образца меди также образуется стационарный конусообразный рельеф. На крупнозернистом никеле при флюенсе $1.5 \cdot 10^{19}$ ион/см² конусообразный рельеф на поверхности не сформировался из-за того, что толщина распыленного слоя 9 мкм существенно меньше размера зерен.

В случае УМЗ титана также можно считать, что на его поверхности сформировался стационарный конусообразный рельеф, который с увеличением флюенса не меняется. Толщина распыленного слоя для титана при флюенсе $3 \cdot 10^{18}$ ион/см² составляет несколько сотен нм, что сопоставимо с размером зерен в УМЗ титане. Формирование таких же конусов на крупнозернистом титане предполагает, что стационарный рельеф на титане не зависит от размера зерен.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эффекты неустойчивости поверхности при ионном облучении приводят к тому, что во многих практических случаях происходит распыление шероховатой поверхности, даже если в начале

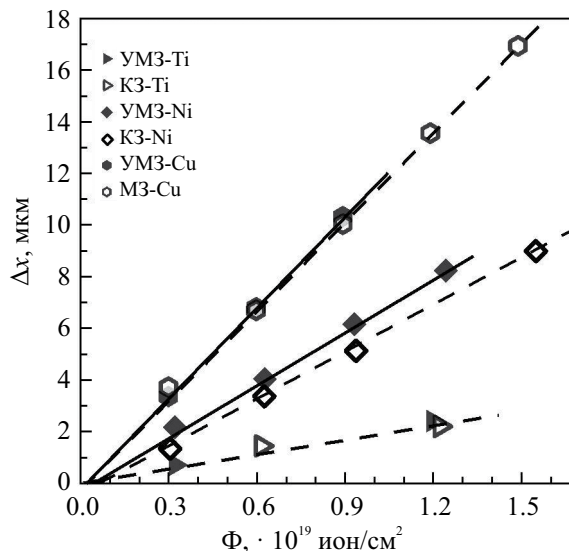


Рис. 3. Зависимость толщины распыленного слоя Δx от флюенса облучения Φ ионами Ar^+ с энергией 30 кэВ для металлов с разной структурой.

облучения поверхность была гладкой [19–26]. Поверхностный рельеф может оказывать влияние на коэффициент распыления, что связано, в частности, с изменением распределения локальных углов падения при бомбардировке шероховатой поверхности. В [27] показано, что определяющим параметром процесса распыления может служить среднее значение угла наклона элементов поверхности, и этот параметр может применяться для широкого спектра структур на поверхности. Измеренные в настоящем эксперименте по РЭМ изображениям средние углы наклона конических элементов θ на поверхности УМЗ и мелкозернистых образцов меди независимо от флюенса облучения оказались практически одинаковыми, около 82° (рис. 4а). Близкие значения углов θ и явились, скорее всего, причиной близких значений коэффициента распыления Y для образцов меди с разным размером зерен.

В [28] получено сложное интегральное выражение для коэффициента распыления Y шероховатой поверхности. Однако если рассматривать поверхность покрытой только конусами с углом наклона θ , то выражение для коэффициента $Y_k(\theta)$ упрощается:

$$Y_k(\theta) = \frac{Y(\theta) \cdot [1 - F(\theta)]}{[1 - R(\theta)]}, \quad (2)$$

где $Y(\theta)$ и $R(\theta)$ — получаемые, например, моделированием соответственно угловые зависимости коэффициента распыления и отражения ионов для плоской поверхности, $F(\theta)$ — доля перепыленных частиц на стенки конусов. Множитель $[1 - R(\theta)]$

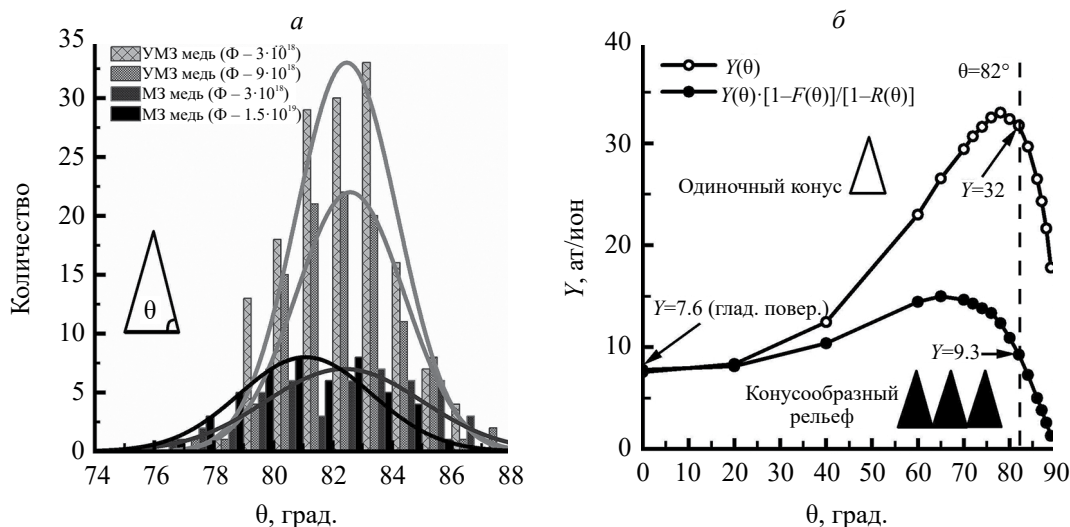


Рис. 4. Распределение углов наклона θ конусов для ультрамелкозернистых и мелкозернистых образцов меди, облученных при различных флюенсах (а), зависимость коэффициента распыления от угла наклона θ для случая одиночного конуса Y и конусообразного рельефа Y_k на поверхности меди при облучении ионами Ag^+ с энергией 30 кэВ (б).

учитывает, что при нормальном падении все ионы участвуют в распылении, включая и отраженные от стенок конусов [20,24].

В расчетах $Y_k(\theta)$ из семейства зависимостей $F(\theta)$, представленных в работе [29], использовали кривую для косинусоидального распределения распыленных атомов. Например, при углах наклона конусов $\theta = 82^\circ$, перепыление атомов составляет $F = 0.86$, что уменьшает коэффициент Y на множитель $[1-F(\theta)] = 0.14$.

На рис. 4б представлены зависимости коэффициента распыления меди $Y(\theta)$ и коэффициента $Y_k(\theta)$ с учетом перепыления атомов и отражения ионов. Первая соответствует случаю, когда поверхность представляется в виде одиночного конуса, вторая — поверхность имеет конусообразный рельеф. Зависимости $Y(\theta)$ и $R(\theta)$ получали моделированием с помощью программы SRIM-2013 [30]. Видно, что для углов наклона конусов θ от 0 до 20° расчетные коэффициенты Y как для одиночного конуса, так и для конусообразного рельефа Y_k близки. Однако при увеличении угла θ за счет увеличения перепыления атомов, коэффициент Y_k для конусообразного рельефа начинает снижаться. При $\theta = 82^\circ$ расчетный коэффициент Y_k для конусообразного рельефа составляет 9.3 что в 3.5 раза меньше, чем Y для одиночного конуса.

Экспериментальные средние значения коэффициента распыления Y для УМЗ (9.6 ат./ион) и мелкозернистых образцов (9.3 ат./ион) меди близки к расчетному коэффициенту распыления $Y_k = 9.3$ ат./ион для конусообразного рельефа поверхности образцов. При этом экспериментальные значения Y для меди с разным размером зерен

является практически одними и тем же, что при распылении как изначально гладкой поверхности, так и при последующем распылении конусообразной поверхности.

На никеле и титане углы наклона для стационарных конусообразных рельефов на УМЗ образцах, $\theta \approx 82^\circ$, близки к углам наклона рельефа на УМЗ меди. Расчетное значение коэффициента распыления Y_k для конусообразного рельефа на УМЗ никеле составляет 7.8 ат./ион, для титана — 3.5 ат./ион (табл. 1). Это в 3.5 раза меньше, чем для одиночного конуса как на никеле, так и на титане, что обусловлено тем же эффектом перепыления атомов. При этом, если для УМЗ никеля экспериментальный коэффициент $Y \approx 6$ ат./ион отличается от расчетного приблизительно в 1.3 раза, то для УМЗ титана экспериментальный коэффициент $Y \approx 1$ ат./ион (при флюенсе $3 \cdot 10^{18}$ ион/см²), в 3.5 раза меньше расчетного значения. Таким образом, расчетные значения коэффициентов распыления никеля и титана значительно отличаются от экспериментально измеренных.

Хорошее согласие расчетного и экспериментального коэффициента распыления для меди связано, скорее всего, с тем, что распыление меди наиболее полно изучено как экспериментально, так и теоретически. В случае никеля и титана измеренные в данной работе значения коэффициента распыления близки к другим экспериментальным данным. Можно предположить, что для этих металлов программа SRIM-2013 не дает корректных значений коэффициента распыления.

Приведенные на рис. 3 зависимости толщины распыленного слоя металлов Δx от флюенса

Таблица 1. Сравнение расчетных коэффициентов распыления Y с экспериментальными коэффициентами Y для меди, никеля и титана с ультрамелкозернистой (УМЗ), мелко- (МЗ) и крупнозернистой (КЗ) структурой, облученных ионами Ag^+ с энергией 30 кэВ при нормальном падении.

Металл	Структура, d – размер зерен	Y (эксп.)	Y гладкой поверхности	Y рельефа с углами наклона элементов $\theta=82^\circ$
Cu	УМЗ ($d=500$ нм)	≈ 9.6	7.6	9.3
	МЗ (d до 10 мкм)	≈ 9.3		
Ni	УМЗ ($d=300$ нм)	≈ 6.0	6.5	7.8
	КЗ (d до 100 мкм)	≈ 5.2		
Ti	УМЗ ($d=300$ нм)	$\approx 1.1^*$ и 0.7^{**}	2.0	3.5
	КЗ (d до 100 мкм)			

Примечание: * при облучении с флюенсом $3 \cdot 10^{18}$ ион/см², ** при последующем облучении с суммарным флюенсом $1.5 \cdot 10^{19}$ ион/см²

облучения Φ хорошо аппроксимируются линейной зависимостью $\Delta x = a\Phi + b$, где коэффициент $a \sim Y$. Слагаемое b является параметром, отражающим увеличение или уменьшение распыления шероховатой поверхности относительно исходной гладкой поверхности. Очевидно, что при $b < 0$ коэффициент распыления в начале облучения будет меньше установившегося коэффициента Y с флюенсом облучения. И, наоборот, при $b > 0$ коэффициент распыления в начале облучения будет больше установившегося с флюенсом облучения коэффициента Y . Соответственно при $b = 0$ коэффициент распыления шероховатой поверхности совпадает с коэффициентом распыления гладкой поверхности. Анализ данных на рис. 3 показывает, что для меди и никеля независимо от их микроструктуры слагаемое $b < 0$ в линейной зависимости $\Delta x = a\Phi + b$. Это говорит о том, что коэффициент распыления Y меди и никеля с ионно-индуцированной шероховатостью больше, чем Y гладкой поверхности. Для меди это согласуется также с данными эксперимента и моделирования. Экспериментальные коэффициенты распыления меди для УМЗ и мелкозернистых образцов составляют 9.6 и 9.3 ат./ион, соответственно. Расчетный коэффициент Y для гладкой поверхности меди (SRIM-2013) составляет 7.6 ат./ион. Для УМЗ и крупнозернистых образцов никеля экспериментальный коэффициент распыления 6 и 5.3 ат./ион, соответственно, тогда как расчетный коэффициент распыления для гладкой поверхности составляет заметно большее значение, $Y = 6.5$ ат./ион. Возможно, что такое значение коэффициента распыления гладкой поверхности никеля, полученного из программы SRIM-2013, имеет несколько завышенное значение. В этой связи отметим, что расчетный коэффициент никеля согласно эмпирической формуле в [31] составляет 4.2 ат./ион.

В случае УМЗ и крупнозернистого титана слагаемое $b > 0$ в линейной зависимости $\Delta x = a\Phi + b$

и, следовательно, коэффициент распыления конусообразного рельефа меньше, чем для гладкой поверхности, т.е., наблюдается эффект подавления распыления.

В начальный момент облучения поверхности коэффициент распыления Y соответствует гладкой поверхности. Можно оценить флюенс облучения и толщину распыленного слоя, при котором коэффициент распыления переходит от значения для гладкой поверхности к шероховатой. Искомый флюенс определяется точкой пересечения прямой $\Delta x = a_r \Phi$ для коэффициента Y гладкой поверхности и аппроксимирующей экспериментальные данные прямой $\Delta x = a\Phi + b$. Для УМЗ меди соответствующий флюенс составляет около $1 \cdot 10^{18}$ ион/см², толщина распыленного слоя при этом около 1 мкм. С повышением флюенса коэффициент Y УМЗ меди становится постоянным, и большим, чем Y гладкой поверхности. Отметим, что толщина распыленного слоя при флюенсе $1 \cdot 10^{18}$ ион/см² соответствует максимальному размеру зерен в УМЗ образцах меди (1 мкм). Это согласуется со сделанным выше выводом о том, что стационарный конусообразный рельеф формируется при толщине распыленного слоя соизмеримым с размером зерен.

Для никеля можно решить обратную задачу. Положим, что стационарный конусообразный рельеф на УМЗ никеле так же, как и на УМЗ меди образуется при толщине 1 мкм, соответствующей максимальному размеру зерен. В таком случае при расчетном флюенсе $1.8 \cdot 10^{18}$ ион/см² произойдет изменение коэффициента Y от значения для гладкой поверхности к шероховатой. Соответствующая оценка коэффициента Y для гладкой поверхности никеля дает значение 5.1 ат./ион, что меньше экспериментальных значений коэффициентов Y для шероховатых УМЗ и крупнозернистых образцов никеля, $Y \approx 6$ и $Y \approx 5.3$ ат./ион, соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Деформационное наноструктурирование меди, никеля и титана, приводит при высокодозном облучении ионами Ag^+ с энергией 30 кэВ к конусообразному рельефу с поверхностной концентрацией конусов выше 10^8 см^{-2} . Концентрация и высота конусов на поверхности определяются размером зерен в объеме металла. Чем меньше размер зерен, тем выше концентрация и меньше высота конусов.

Экспериментально измеренный коэффициент распыления слабо зависит от размера зерен и типа рельефа на поверхности.

Показано, что стационарная эрозия ионно-индуцированного рельефа происходит со значительным перепылением атомов. Расхождение между экспериментом и моделированием с использованием программы SRIM-2013 коэффициента распыления для меди и никеля составляет около 20–40%, тогда как для титана расхождение двукратное.

Работа Борисова А. М. выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-30058). Работа Хисамова Р. Х., Мулюкова Р. Р. выполнена в рамках государственного задания ИПСМ РАН. Электронно-микроскопические исследования выполнены на базе ЦКП ИПСМ РАН “Структурные и физико-механические исследования материалов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Efe M., El-Atwani O., Guoc Y., Klenosky D.R. // Scripta Mater. 2014. V. 70. P. 31.
2. Chen Z., Niu L.-L., Wang Z. et al. // Acta Mater. 2018. V. 147. P. 100.
3. Wurmshuber M., Dopfermann S., Wurster S. et al. // Int. J. Refract. Hard Mater. 2023. V. 111. Art. No. 106125.
4. Nagasaki T., Hirai H., Yoshino M., Yamada T. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 2018. V. 418. P. 34.
5. Michaluk C.A. // J. Electron. Mater. 2002. V. 31. P. 2.
6. Chen J.-K., Tsai B.-H., Huang H.-S. // Mater. Transact. 2015. V. 56. P. 665.
7. Reza M., Sajuri Z., Yunas J., Syarif J. // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2016. V. 114. Art. No. 012116.
8. Voitsenya V.S., Balden M., Bardamid A.F. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 2013. V. 302. P. 32.
9. Yang W., Zhao G., Wang Y. et al. // J. Mater. Sci. Mater. Electron. 2021. V. 32. P. 26181.
10. Mashkova E.S., Molchanov V.A. Medium-energy ion reflection from solids. Amsterdam, 1985. 444 p.
11. Behrisch R., Eckstein W. Sputtering by particle bombardment. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 509 p.
12. Smirnova N.A., Levit V.I., Pilyugin V.P. et al. // Phys Met. Metallogr. 1986. V. 61. P. 1170.
13. Nazarov A.A., Mulyukov R.R. Nanostructured materials. In: Handbook of NanoScience. Engineering and technology. Boca Raton: CRC Press, 2002. Art. No. 22.
14. Markushev M.V., Avtokratova E.V., Krymskiy S.V. et al. // Lett. Mater. 2022. V. 12. P. 463.
15. Khisamov R. Kh., Khalikova G.R., Kistanov A.A. et al. // Contin. Mech. Thermodyn. 2023. V. 35. P. 1433.
16. Murzaev R.T., Bachurin D.V., Mukhametgalina A.A. et al. // Phys. Lett. A. 2020. V. 384. Art. No. 126906.
17. Жукова Ю.Н., Машкова Е.С., Молчанов В.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 1994. Т. 58. № 3. С. 92.
18. Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Немов А.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2006. Т. 70. № 6. С. 820.
19. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Машкова Е.С., Немов А.С. // Поверхность. 2005. № 3. С. 79.
20. Littmark U., Hofer W.O. // J. Mater. Sci. 1978. V. 13. P. 2577.
21. Гарин Ш.Н., Додонов А.И., Машкова Е.С. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1985. Т. 49. С. 1808.
22. Makeev M.A., Barabasi A.-L. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 2004. V. 222. P. 316.
23. Stadlmayr R., Szabo P.S., Berger B.M. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 2018. V. 430. P. 42.
24. Шульга В.И. // Поверхность. Рентген. синхротр. и нейтрон. исслед. 2020. № 12. С. 83.
25. Борисов А.М., Машкова Е.С., Овчинников М.А. и др. // Поверхность. Рентген. синхротр. и нейтрон. исслед. 2022. № 3. С. 71.
26. Борисов А.М., Овчинников М.А., Машкова Е.С. и др. // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48. № 12. С. 24.
27. Cupak C., Szabo P.S., Biber H. et al. // Appl. Surf. Sci. 2021. V. 570. Art. No. 151204.
28. Szabo P.S., Cupak C., Biber H. et al. // Surf. Interfaces. 2022. V. 30. Art. No. 101924.
29. Diddens C., Linz S.J. // Eur. Phys. J. B. 2015. V. 88. P. 190.
30. <http://www.srim.org>.
31. Matsunami N., Yamamura Y., Itikawa Y. et al. // Atom. Data Nucl. Data Tables. 1984. V. 31. P. 1.

Effect of deformation nanostructuring on ion-beam erosion of metals**N. N. Andrianova^{1, 2}, A. M. Borisov^{1, 2, 3 *}, M. A. Ovchinnikov¹, R. K. Khisamov⁴, R. R. Mulyukov⁴**¹*Skobeltsyn Institute on Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*²*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993 Russia*³*"STANKIN" Moscow State University of Technology, Moscow, 127055 Russia*⁴*Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences, Ufa, 450001 Russia***e-mail: anatoly_borisov@mail.ru*

The effect of deformation nanostructuring of copper, nickel, and titanium on ion-induced morphology and sputtering under 30 keV argon ions high-fluence irradiation along the normal to the surface has been studied. Sputtering of a layer commensurate with the size of metal grains leads to a uniform cone-shaped relief, the stationary erosion of which occurs with significant redepositing of atoms.