

УДК 539.216; 539.22; 538.91-405; 548; 620.18

УГЛОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТОМОВ, РАСПЫЛЁННЫХ ИЗ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ Mo и W

*А.В. Рогов, Ю.В. Мартыненко, Н.Е. Белова (НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия),
В.И. Шульга (НИИЯФ им. Д.В. Скобельцина МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия)*

Текстура поверхности диагностических зеркал в токамаках влияет на их оптические характеристики. Поэтому исследование разных проявлений поверхностной текстуры актуально. В то же время угловые распределения распылённых атомов важны для расчёта загрязнения первого зеркала для оптических диагностик за счёт переосаждения продуктов эрозии. В работе исследовано влияние текстуры поверхностного слоя поликристаллических мишеней Mo и W на угловые распределения атомов при распылении в малоразмерном планарном DC-магнетроне ионами Ar^+ с энергией 200—300 эВ. Текстура формировалась при прокатке металлических фольг и в процессе изготовления протяжённых прутков из слитков и контролировалась с помощью рентгеноструктурного анализа. Обнаружена анизотропия углового распределения атомов, распыляемых из фольг: в плоскости, перпендикулярной прокатке, наблюдается максимум при $\theta = 0$ (нормаль к распыляемой поверхности); в плоскости, параллельной направлению прокатки, имеются максимумы при $\theta = 0$ (Mo, W), 57° (Mo) и 60° (W). В случае распыления образцов, изготовленных из прутков, азимутальной анизотропии не обнаружено, однако полярное распределение имеет максимум при $\theta = 37^\circ$ (Mo) и 45° (W) в отличие от поликристаллов Mo и W с хаотическим распределением зёрен, для которых максимальный выход распыления наблюдается при $\theta = 0$. Компьютерное моделирование, проведённое с учётом вклада кристаллитов, выявленных при рентгеноструктурном анализе, показало хорошее качественное соответствие расчётных и экспериментальных угловых распределений распылённых атомов. Отмечено, что угловое распределение распылённых атомов может быть использовано для определения текстуры поверхности.

Ключевые слова: распыление, угловое распределение, поликристаллы, текстура, магнетрон.

ANGLE DISTRIBUTION OF ATOMS SPUTTERED FROM TEXTURED Mo AND W POLYCRYSTALS. A.V. ROGOV, Yu.V. MARTYNYENKO, N.E. BELOVA, V.I. SHULGA. Surface texture of diagnostic mirrors in tokamaks effects on mirrors optical characteristics. Therefore investigation of various texture manifestations is an actual problem. The same time angular distribution of sputtered atoms is important for calculation of first diagnostic mirror contamination due to erosion products deposition. In the work the effects of W and Mo surface crystalline texture on the angular distribution of sputtered atoms was investigated at sputtering in small size DC-magnetron by 200—300 eV Ar^+ ions. Crystalline texture was formed under rolling of metal foils and during preparation of metal bars and was controlled by X-ray diffraction analysis. A strong anisotropy of the angular distribution was found for foils: in the planes oriented perpendicularly to the direction of rolling the angular distribution was peaked at the polar angle $\theta = 0$, while in the direction parallel to the rolling the angular distribution has maxima at $\theta = 0$ (Mo, W), 57° (Mo) and 60° (W). For bars, no azimuthal anisotropy was observed but the angular distribution was peaked at $\theta = 37^\circ$ (Mo) and $\theta = 45^\circ$ (W) in contrast to the case of Mo and W polycrystals with random grain orientation, for which the angular distribution has a maximum at $\theta = 0$. Computer simulation with account of crystallites found out at X-ray analysis shows a good agreement of calculated and experimental angular distribution of sputtered atoms. It was noted that the angular distribution of sputtered atoms can be used for determination of the crystalline surface texture.

Key words: Sputtering, angular distribution, polycrystalline, texture, magnetron.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение угловых распределений атомов, распылённых ионами Ar^+ с энергией 290—320 эВ при использовании поликристаллических металлических мишеней, представляет большой практический и фундаментальный интерес. Применительно к задачам термоядерного синтеза данные по угловым распределениям необходимы, например, для расчёта профиля отражающего покрытия при магнетронном напылении на подложки с заданной геометрией [1], при анализе результатов имитационных экспериментальных исследований деградации оптических свойств диагностических зеркал в ИТЭР с использованием магнетронного распылительного устройства [2]. Отдельную проблему составляет расчёт массопереноса продуктов эрозии в условиях термоядерного реактора. Знание угловых распределений позволит более точно учесть загрязнение первого зеркала в условиях интенсивного переосаждения (например, для оптических диагностик, расположенных в области дивертора), ресурс диверторных пластин, поступление тяжёлых примесей в плазму при распылении атомами перезарядки. В качестве одного из основных кандидатных материалов для изготовления первого зеркала для ряда диагностик в настоящее время рассматривается молибден (Mo). Для изготовления дивертора планируется использовать вольфрам (W). Распыление именно этих двух материалов и исследовалось в данной работе.

Сравнение большого количества экспериментальных данных, широко представленных в опубликованных работах, показало существенное расхождение в измеренных угловых распределениях для одних и тех же материалов у разных авторов [3]. В первую очередь, это связано с влиянием структуры, состава

и морфологии поверхности исследуемых материалов на результаты измерений, что трудно учитывать при проведении экспериментов.

В настоящее время достаточно хорошо развиты теория и компьютерное моделирование распыления аморфных, моно- и поликристаллических материалов, имеющих гладкую поверхность или поверхность, описываемую простейшими функциями [4—6]. Показано, что пространственное распределение распылённых частиц определяется каскадным механизмом распыления и механизмом прямого выбивания. Имеются аналитические оценки пороговой энергии распыления и коэффициента распыления при разной энергии падающих ионов.

В данной работе исследовано влияние линейной и аксиально-симметричной текстуры, сформированной при изготовлении поликристаллических мишеней из W и Mo на угловые распределения атомов, распылённых ионами Ar^+ с энергией 290—320 эВ. Первый тип текстуры (с одним выделенным направлением вдоль или под углом к поверхности образца) характерен для фольг и тонкого листового материала, формируется в процессе прокатки твёрдых и хрупких материалов и является текстурой деформации [7]. Преимущественная аксиально-симметричная ориентация зёрен (при наличии определённой закономерности в ориентации и размере зёрен) наблюдается в структуре прутков и обусловлена процессом их изготовления методом порошковой металлургии [8].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эксперименты по распылению проводились на лабораторной установке МАВР-3 с использованием планарного DC-магнетрона оригинальной конструкции с дисковым катодом. Магнетрон предусматривает установку исследуемых распыляемых мишеней в зоне эрозии с прижимом к водоохлаждаемому корпусу через термоинтерфейс. Такая конструкция позволяет исследовать распыление металлических фольг толщиной от 0,1 мм. Максимальная толщина мишени составляет 2 мм. Внешний диаметр зоны эрозии D равен 18 мм. Диаметр максимума зоны эрозии $d = 12$ мм.

Использовались два типа мишеней Mo и W: мишени толщиной 1,5 мм, изготовленные из поликристаллических прутков диаметром 40 и 30 мм, и мишени, изготовленные из фольги толщиной 0,4 и 0,2 мм соответственно. Ось изготовленной из прутка катодной вставки совпадала с его первоначальной осью. Режим распыления: давление рабочего газа (Ar) $P \approx 3$ м-торр, среднее напряжение и ток магнетронного разряда для мишеней, изготовленных из прутка: $U_1 = 438$ В, $I_1 = 180$ мА; $U_2 = 423$ В, $I_2 = 210$ мА, фольги: $U_3 = 390$ В, $I_3 = 200$ мА; $U_4 = 422$ В, $I_4 = 230$ мА для Mo и W соответственно. Среднюю энергию распыляющих ионов E_i в магнетронном разряде можно оценить, используя соотношение $E_i = 0,733U_d$, где U_d — напряжение магнетронного разряда [9]. Соответственно получаем значения $E_1 \approx 320$ эВ, $E_2 \approx 310$ эВ, $E_3 \approx 290$ эВ и $E_4 \approx 310$ эВ. Эти значения использовались в качестве исходных данных при проведении последующих расчётов. Ионы падали на поверхность катода по нормали.

Измерения углового распределения проводились методом взвешивания марок, на которые осаждался распылённый материал. Металлические марки размещались равноудаленно от центра распыляемого катода на двух взаимно перпендикулярных подложкодержателях с радиусом кривизны 120 мм. Взаимное размещение марок и магнетрона в вакуумной камере представлено на рис. 1.



Рис. 1. Взаимное расположение распылительного магнетрона и держателя измерительных марок в вакуумной камере

Поскольку диаметр зоны распыления (18 мм) много меньше расстояния до марок при напылении (120 мм), профиль зоны эрозии на распыляемом катоде в первом приближении можно не учитывать. Расчёт толщины покрытия производился по результатам измерения массы каждой марки до и после напыления. Взвешивание проводилось с использованием аналитических весов фирмы CAS (CAUW 220D), точность измерения $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ г. Минимальный прирост массы (при азимутальных углах, близких к 90°) превышал точность измерения не менее чем в 10 раз.

Текстура распыляемых образцов исследовалась методом рентгеноструктурного анализа на установке ДРОН-3М и методом оптической микроскопии. Рентгенографический анализ текстуры выполнялся методом Θ — 2Θ -дифракции на молибденовом и медном излучении от гладкой (нераспылённой) поверхности. Визуально текстура на поверхности фольг была выражена в виде мелких штрихов, параллельных прокатке. Далее для простоты изложения направление вдоль штрихов будем условно называть «направлением текстуры». При проведении распыления подложкодержатели ориентировались вдоль и поперёк направления текстуры на поверхности исследуемых образцов.

МЕТОДИКА РАСЧЁТА

С целью интерпретации результатов измерений был проведён расчёт угловых распределений атомов, распылённых с различных граней монокристаллов W и Mo ионами Ag с энергией 237 и 225 эВ соответственно. В расчётах использована компьютерная программа [10], основанная на приближении парных столкновений и предусматривающая учёт слабых одновременных взаимодействий на больших расстояниях. Подробное описание программы приведено в работах [11, 12]. В качестве парного межатомного потенциала использован известный потенциал Зиглера—Бирсака—Литтмарка [13]. Неупругие потери энергии рассчитывались по формуле Фирсова. Тепловые колебания атомов мишени считались некоррелированными и рассматривались по модели Дебая (температура мишени 300 К), температура Дебая для W и Mo равна 400 и 450 К соответственно. Учитывалось, что атомы, находящиеся на поверхности, имеют большую амплитуду колебаний, чем объёмные атомы, и что их колебания анизотропны. Дебаевские температуры для поверхностных атомов брались из работы [14]. Распылёнными считались те атомы, которые преодолевали плоский потенциальный барьер, имитирующий эффект притяжения при отлёте частиц от поверхности твёрдого тела. В качестве поверхностной энергии связи взята теплота сублимации W и Mo (8,68 и 6,83 эВ соответственно). Поверхность мишени считалась плоской. Для обеспечения достаточной статистики расчёт проводился до тех пор, пока число распылённых атомов не достигало $7 \cdot 10^6$. Направление вылета распылённых атомов характеризовалось полярным и азимутальным углами. Для сравнения с экспериментом рассчитывалось не только полное (проинтегрированное по азимуту) угловое распределение распылённых атомов по полярному углу, но и полярные распределения атомов при фиксированных значениях азимута.

Расчёты угловых распределений были проведены для граней (110), (211) и (100) W и Mo, выявленных в ходе рентгеноструктурного анализа. Для сравнения с экспериментом угловые распределения, рассчитанные для разных граней, суммировались друг с другом с учётом их веса. При моделировании распыления нетекстурированной поликристаллической мишени распределение монокристаллических зёрен считалось хаотическим и задавалось с помощью генератора случайных чисел.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Угловые распределения распылённых атомов. Угловые распределения при распылении катодов, изготовленных из неотожжённых фольг Mo и W и прутка W, полученные из экспериментальных данных, соответственно представлены на рис. 2 и 3.

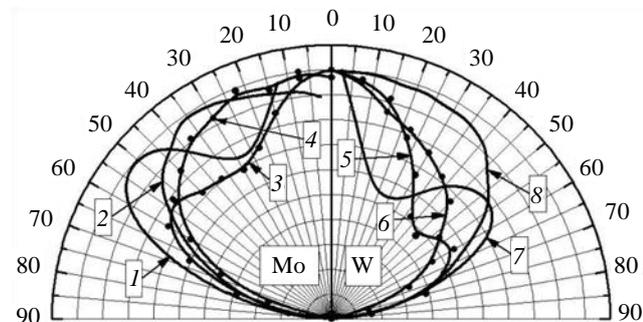


Рис. 2. Угловые распределения атомов, распылённых из фольги: 1 — расчёт, Mo вдоль текстуры; 2 — расчёт, Mo поперёк текстуры; 3 — эксперимент, Mo вдоль текстуры; 4 — эксперимент, Mo поперёк текстуры; 5 — эксперимент, W вдоль текстуры; 6 — эксперимент, W поперёк текстуры; 7 — расчёт, W вдоль текстуры; 8 — расчёт, W поперёк текстуры

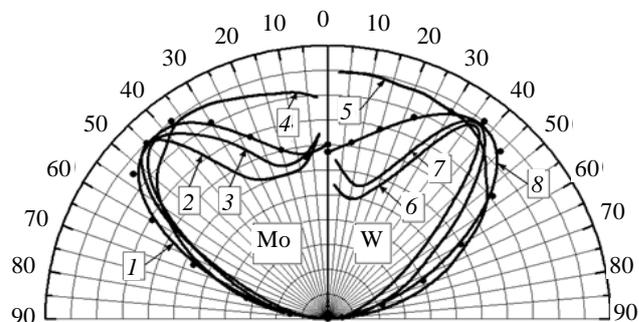


Рис. 3. Угловые распределения атомов, распылённых из прутков: 1 — эксперимент, Mo; 2 — расчёт, Mo, 0% вакансий; 3 — расчёт, Mo, 40% вакансий; 4 — расчёт, Mo, поликристалл с хаотическим распределением зёрен; 5 — расчёт, W, поликристалл с хаотическим распределением зёрен; 6 — расчёт, W, 0% вакансий; 7 — расчёт, W, 40% вакансий; 8 — эксперимент, W

Сравнение распределений, полученных на фольгах, показывает, что при наличии текстуры угловые распределения анизотропны: в плоскости, перпендикулярной направлению текстуры, наблюдается один максимум при $\theta = 0$, а в плоскости, параллельной текстуре, имеются два максимума при $\theta = 0$ и $\approx 57^\circ$ для Мо и при $\theta = 0$ и $\approx 60^\circ$ для W. В случае катода, изготовленного из прутка, такой анизотропии обнаружено не было. Угловое распределение имеет максимум при $\theta = 37^\circ$ (W) и 45° (Mo) в отличие от углового распределения для поликристалла с хаотическим распределением зёрен, для которого максимум распределения находится при $\theta = 0$.

Текстура образцов. Для определения возможного влияния рельефа поверхности на угловые распределения проводилось исследование микрорельефа поверхности распыляемых образцов в оптическом микроскопе. Результаты оптической микроскопии поверхности фольги вне зоны распыления (исходное состояние поверхности) и в максимуме зоны эрозии представлены на рис. 4 для W и на рис. 5 для Mo.

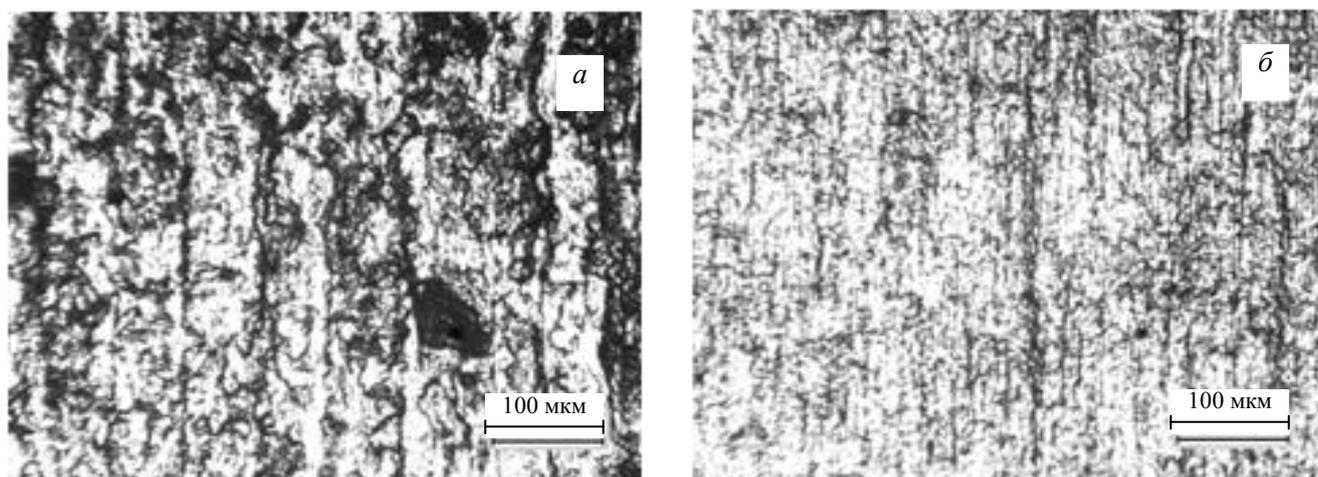


Рис. 4. Поверхность фольги W вне зоны распыления (а) и в максимуме зоны распыления (б) (глубина эрозии $\delta \approx 0,15$ мм)

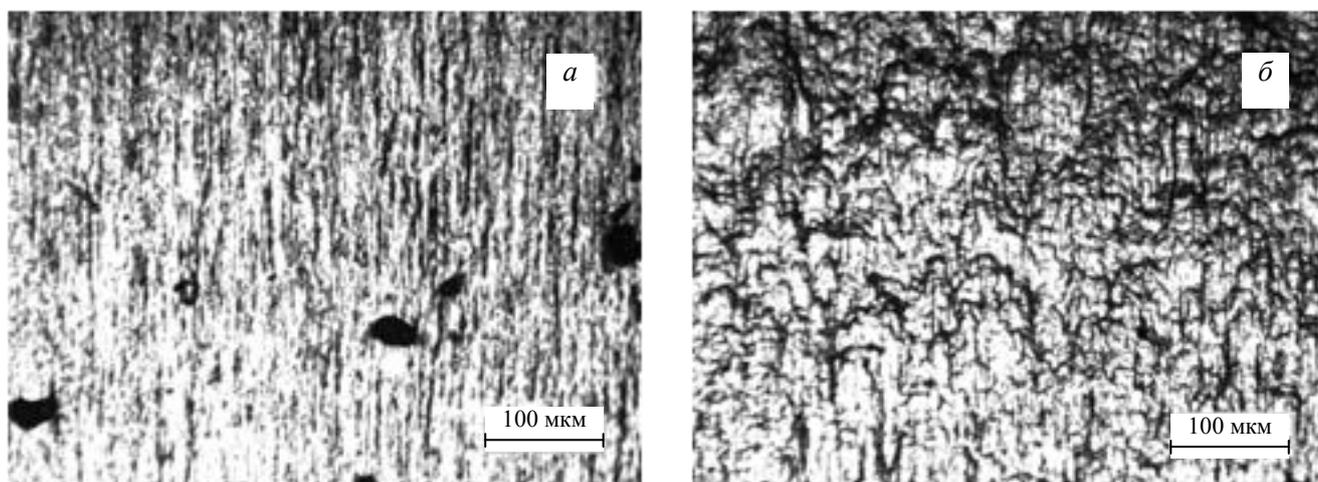


Рис. 5. Поверхность фольги Mo вне зоны распыления (а) и в максимуме зоны распыления (б) (глубина эрозии $\delta \approx 0,3$ мм)

Полученные фотографии выявили структуру поверхности, похожую на «борозды», образовавшиеся в результате прокатки образца. Однако специально сделанная фотография торца разломанной фольги показала, что в действительности глубоких борозд на фольге нет, а есть хаотическая шероховатость (рис. 6). Таким образом, регулярный рельеф поверхности, наблюдаемый визуально, в расчёте можно не учитывать. Структура, наблюдаемая при оптической микроскопии поверхности фольг, — это, по-видимому, текстура упорядоченных кристаллических зёрен.

Исследование структуры поверхности мишеней до и после распыления показало, что анизотропия в текстуре материала (наличие выделенного направления) сохраняется даже при значительной эрозии по-

верхности при ионном распылении. Это может означать, что причиной анизотропии угловых распределений является текстура — преимущественная ориентация зёрен, появляющаяся в результате прокатки.

Дифракционный анализ вольфрамовой фольги, проведённый на излучении молибдена, показал отсутствие самого сильного для вольфрама отражения (110) и наличие отражений (200) и (211) (рис. 7). Соотношение интенсивностей наблюдаемых отражений к их расчётным значениям для изотропного образца позволяет оценить долю кристаллитов с ориентацией {001} и {112} как 73% и 27% соответственно.

Зависимость интенсивности «косых отражений», наблюдаемых при вращении плоскости поверхности на некоторый угол α , от угла вращения образца β вокруг нормали к поверхности позволила определить ориентацию кристаллитов относительно направления прокатки. Оказалось, что как кристаллиты {001}, так и кристаллиты {112} ориентированы вдоль направления $\langle 110 \rangle$, совпадающего с направлением прокатки.

Дифракционный анализ фольги Мо показал наличие трёхкомпонентной текстуры, обусловленной ориентационной зависимостью кристаллитов с плоскостями {001}, {112} и {011}, которые представлены в отношениях 79,8%, 16,3% и 3,9% соответственно. С направлением прокатки в кристаллитах {001}, {112} совпадает направление $\langle 110 \rangle$, а для {011} ориентированных кристаллитов — направление $\langle 111 \rangle$.

Дифракционный анализ образца W, вырезанного из слитка, проведённый методом $\Theta-2\Theta$, показал наличие всех отражений, характерных для структуры W (110), (100) и (211). Образец представлял собой диск, причём распыляется кольцевая область с радиусом диска $>1/3R$, а середина диска не распылялась. Для центральной части образца текстурные измерения не выявили ориентационных предпочтений. Для распыляемой зоны ближе к краю слитка наблюдаются крупные кристаллиты, ориентированные вдоль оси $\langle 110 \rangle$.

Компьютерное моделирование. Результаты рентгеноструктурного анализа были использованы в качестве исходных данных для проведения расчётов угловых распределений распылённых атомов с помощью описанного компьютерного кода. Результаты расчёта для фольг представлены на рис. 2, там же показаны экспериментально измеренные распределения. Для направления вдоль прокатки фольг имеется хорошее качественное соответствие расчёта и эксперимента. Максимумы распыления при угле $\theta \approx 55^\circ$ связаны с передачей импульса от атома к атому вдоль направлений плотной упаковки $\langle 111 \rangle$, составляющих с гранью (100) угол $54,7^\circ$. Следует отметить, что наилучшее согласие расчёта с экспериментом было получено для потенциала Мольера с длиной экранирования Робинсона (MR). Этот результат можно объяснить тем, что потенциал MR является полуэмпирическим и найден из экспериментальных данных для металлов [6]. Это сравнение показывает, что учёт текстуры образцов W и Мо позволяет достаточно хорошо описать угловое распределение атомов, распылённых вдоль направления прокатки. Для направления, перпендикулярного прокатке, рентгенография показала сильное искажение решётки. Наилучшее согласие с экспериментом дал расчёт для поликристалла с хаотической ориентацией кристаллитов.

Расчёты углового распределения атомов, распылённых из прутка, приведённые на рис. 3, проводились с усреднением по азимутальному углу, что соответствует аксиальной симметрии ориентации кри-

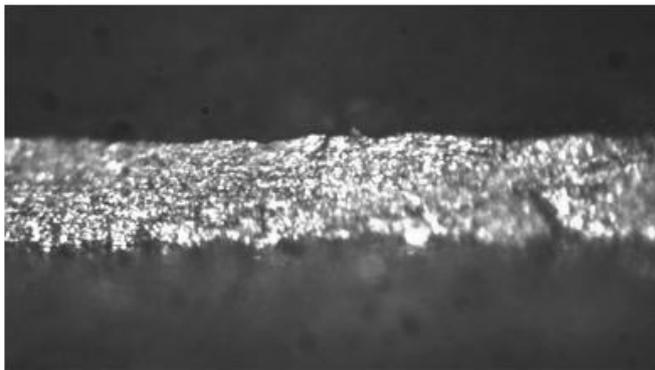


Рис. 6. Торце разломанной фольги W (толщина фольги 0,2 мм)

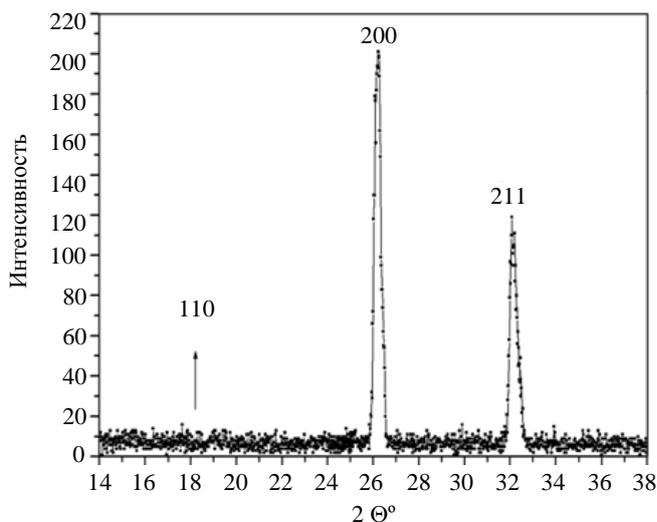


Рис. 7. Дифрактограмма плёночного образца W, $\lambda = 0,709 \text{ \AA}$

сталлитов. Эти расчёты показали, что положение максимума распределения при $\theta = 37^\circ$, наблюдаемого экспериментально, хорошо совпадает с расчётами для граней (110) и (112), однако вклад последней меньше и на рис. 3 не учтён. Максимум при 57° , характерный для грани (100), мал и в эксперименте не проявился. В то же время для всех граней характерен максимум при $\theta = 0$, однако он в эксперименте не наблюдался. Это, возможно, связано с погрешностью в определении углов, обусловленной конечностью размеров распыляемой мишени и марок, на которые собирался распылённый материал.

Таким образом, изготовление и обработка металлических образцов сильно влияют на угловое распределение распылённых атомов. В частности, обнаруженная анизотропия угловых распределений катаных образцов показала, что прокатка ориентирует зёрна поликристалла. Причиной такой ориентации может быть то, что низкоиндексные грани, имея меньший коэффициент трения, меньше поворачиваются при прокатке и больше представлены на поверхности, чем высокоиндексные грани, которые поворачиваются при прокатке. Этот механизм ориентации зёрен при прокатке свойственен только твёрдым и хрупким материалам, у которых при прокатке зёрна не деформируются.

При формировании слитков из расплава или методом порошковой металлургии, как в случае исследованного прутка, также происходит ориентация зёрен вдоль оси слитка, связанная с градиентом температуры при остывании.

Текстура материалов зависит от способа изготовления и метода обработки материала мишени и должна учитываться во всех случаях, когда важно знать угловое распределение распылённых атомов.

Полученные результаты показывают, что угловые распределения распылённых атомов дают информацию о структуре материала. Изучая угловые распределения распылённых атомов, можно определять текстуру поверхности. Для этого надо иметь базу данных по углам пятен Венера для основных граней данного материала, аналогичную базу данных, используемой при рентгеноструктурном анализе. Использование локального датчика для регистрации потоков распылённых атомов (например, пьезодатчика) с автоматической системой азимутального и полярного смещения существенно увеличит точность полученных результатов и сделает такой метод удобным для практического применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружена анизотропия углового распределения атомов, распыляемых из вольфрамовой и молибденовой фольг: в плоскости, перпендикулярной прокатке, наблюдается один максимум при $\theta = 0$, в плоскости, параллельной текстуре, имеются два максимума при $\theta = 0$ и $\theta \approx 57^\circ$ для Мо и при $\theta \approx 60^\circ$ для W.

В случае распыления образца, изготовленного из W-слитка в виде прутка, анизотропии обнаружено не было, однако угловое распределение имеет максимум при $\theta = 37^\circ$ в отличие от углового распределения для поликристалла с хаотическим распределением зёрен, для которого максимум распределения находится при $\theta = 0$.

Компьютерное моделирование и рентгеновский анализ показали, что обнаруженные особенности угловых распределений обусловлены преимущественной ориентацией кристаллитов в образцах. На поверхности катаных фольг наиболее представлены кристаллиты с плоскостями (100) и (211), ориентированные направлением $\langle 110 \rangle$ вдоль прокатки, причём кристаллиты сильно сжаты в направлении поперёк прокатки. На поверхности образца из слитка—прутка наиболее представлены грани (110) и (211).

При усовершенствовании оборудования для измерения трёхмерных угловых распределений распылённых атомов и создании базы данных зависимости угловых распределений от типа текстуры для разных материалов обнаруженный эффект анизотропии угловых распределений может быть использован для анализа наличия регулярной текстуры и структуры текстурированного приповерхностного слоя.

Применительно к задачам термоядерного синтеза измерение угловых распределений может быть использовано, например, для выявления выделенного направления текстуры в отражающем слое полированных или напылённых металлических зеркал. Наличие выделенного направления текстуры в отражающем слое металлического зеркала может привести к анизотропии его оптических свойств даже при малой глубине распыления, что неизбежно приведёт к искажению и снижению достоверности оптических измерений в ИТЭР.

REFERENCES

1. **Rogov A.V., Vukolov K.Yu.** — ZhTF (JTPh), 2006, vol. 76, issue 4, № 4, pp. 109—11 (in Russian).
2. **Rogov A.V., Vukolov K.Yu., Gorshkov F.V., Gureev V.M.** — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2005, issue 2, pp. 39—55 (in Russian).
3. **Yamamura Y., Takiguchi T., Tawara H.** Data Compilation of Angular Distributions of Sputtered Atoms/National Institute for Fusion Science. Report NIFS-DATA-1, Chikusa-ku, Nagoya, Japan. 1990. 183 p.
4. **Mashkova E.S., Molchanov V.A.** — Poverkhnost', Rentgen., Sinkhrotr. i neytr. issled. (Surface. Roentgen., synchrotr. and neutr. research), 1995, № 3, pp. 5—25 (in Russian).
5. **Mashkova E.S., Molchanov V.A.** — In the same place, 1997, № 12, pp. 73—90 (in Russian).
6. **Ekshteyn V.** Computer simulation of particles interaction with the solid surface. — M.: Mir (World), 1995. 319 p. (in Russian).
7. **Molybdenum.** Collection. Edited by A.K. Natanson. — M.: Inostr. lit-ra (For. lit.), 1959, pp. 38—39 (in Russian).
8. **Material science.** Manual for high schools. Under the general editorship of B.N. Arzamasov and G. G. Mukhin. — M.: Pub.house of N.E. Bauman MSTU, 2002, pp. 74—76 (in Russian).
9. **Kashtanov P.V., Smirnov B.M., Khippler R.** — UFN (APhS), 2007, vol. 177, № 5, p. 486 (in Russian).
10. **Shulga I.** — Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., 2000, vol. B 164—165, pp. 733—747.
11. **Shulga V.I., Sigmund P.** — Ibid., 1996, vol. B 119, pp. 359—374.
12. **Shulga V.I., Eckstein W.** — Ibid., 1998, vol. B 145, pp. 492—502.
13. **Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U.** The Stopping and Range of Ions in Solids. Ed. by J.F. Ziegler. Vol. 1. — New York: Pergamon Press, 1985 (new edition in 1996).
14. **Jackson D.P.** — Surf. Sci., 1974, vol. 43, pp. 431—440.

AUTHORS

Rogov A.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; alex-rogov@yandex.ru.

Martynenko Yu.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia.

Belova N.E. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia.

Shulga V.I. Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University; 1(2), Leninskie gory, GSP-1, 119991 Moscow, Russia.

Received 20 June 2011
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2011, issue 4, pp. 65—71.