

УДК 621.793.1; 537.525.5

DOI: 10.17223/00213411/64/2/107

О.В. КРЫСИНА, Ю.Ф. ИВАНОВ, Н.А. ПРОКОПЕНКО, В.В. ШУГУРОВ, Е.А. ПЕТРИКОВА, О.С. ТОЛКАЧЕВ

ОДНОСЛОЙНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ МОЛИБДЕНА И ЕГО НИТРИДОВ, ФОРМИРУЕМЫЕ ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ МЕТОДОМ: СИНТЕЗ, СВОЙСТВА, СТРУКТУРА *

Синтезированы покрытия на основе молибдена и его нитридов вакуумно-дуговым методом без плазменного ассистирования и детально исследованы их свойства, состав и структура. Установлено влияние парциального давления азота в газовой смеси на концентрацию азота в покрытии и их свойства. Подробно изучены методами рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии структура и фазовый состав покрытий на основе молибдена, полученных при низком парциальном давлении.

Ключевые слова: вакуумно-дуговое осаждение, молибден, MoN-покрытия, дуговой разряд, свойства, структура, коэффициент трения, износостойкость.

Введение

Покрытия на основе нитрида молибдена, полученные PVD-методами (Physical Vapor Deposition), известны своей повышенной износостойкостью [1]. Высокие механические характеристики и хорошая адгезия к инструменту, а также химическая инертность по отношению к цветным металлам делают MoN-покрытия привлекательными для промышленных применений, например, для обработки цветных металлов. Однако, для синтеза нитрид-молибденовых покрытий необходимо присутствие атомарного азота у поверхности подложек при относительно низком давлении (≤ 0.1 Па), для чего нужно создать неравновесные условия его формирования и обеспечить диссоциацию молекул азота [1, 2].

Нитриды молибдена, осажденные вакуумно-дуговым способом [1], могут быть в виде низкотемпературной фазы β -Mo₂N с тетрагональной кристаллической решеткой ($a = 0.420$ нм, $c = 0.801$ нм, $a/c = 0.5243$), более высокотемпературной γ -Mo₂N с гранецентрированной кристаллической решеткой ($a = 0.415$ – 0.423 нм), фаз ξ -MoN с кубической кристаллической решеткой типа NaCl B1 ($a = 0.420$ – 0.419 нм) и δ -MoN с гексагональной кристаллической решеткой ($a = 0.572$ нм, $c = 0.5608$ нм, $a/c = 0.9697$).

Известно [2–7], что наилучшими характеристиками обладают покрытия, образованные одной фазой – δ -MoN с гексагональной кристаллической решеткой. MoN-покрытия необходимого фазового состава можно синтезировать несколькими способами.

Во-первых, этого можно достичь увеличением давления азота в рабочей камере [2, 4–7]. Во-вторых, преобладания в покрытии δ -MoN-фазы над Mo и γ -Mo₂N в [3] добивались увеличением парциального давления азота в рабочей газовой смеси при общем давлении 0.2 Па. В-третьих, изменения фазового состава можно добиться с помощью дополнительной ионной бомбардировки, в том числе и за счет увеличения энергии ионов, бомбардирующих поверхность растущего покрытия [2–4]. В-четвертых, температура подложки, на поверхности которой синтезируется MoN-покрытие, влияет на его фазовый состав [2]. При температурах 300–380 °C наблюдается только δ -MoN, при увеличении температуры до 410–510 °C – γ -Mo₂N.

Авторами на примере покрытий систем Ti–N, Ti–Al–N, Mo–N было показано [8–10], что концентрацию азота в покрытиях, получаемых вакуумно-дуговым методом, можно изменять с помощью увеличения доли ионов азота в газо-металлической плазме, для чего используется генератор газовой плазмы «ПИНК» на основе несамостоятельного дугового разряда с накаленным и полым катодом [11]. Конкретно для покрытий MoN были применены следующие параметры: рабочий газ – азот, давление газа $p_{N_2} = 0.2$ Па, ток дугового разряда с Mo-катодом $I_d = 150$ А, ток разряда генератора газовой плазмы варьировался так, чтобы отношение плотностей тока газовых к металлическим ионам j_p/j_d находилось в диапазоне 0–1 [10, 12]. Был продемонстрирован положительный эффект плазменного ассистирования на свойства покрытий на основе нитрида молибдена (увеличение твердости и износостойкости). Оптимальные режимы вакуумно-дугового осаждения

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-48-700016-p_a.

без и с плазменным ассистированием могут быть использованы для формирования многослойных покрытий типа Me/MeN малоинерционным вакуумно-дуговым способом при постоянном рабочем давлении при варьировании параметров несамостоятельного дугового разряда источника «ПИНК». Однако подробных исследований влияния давления газа на свойства, элементный и фазовый состав, а также структурных исследований покрытий на основе молибдена и его нитридов, осажденных вакуумно-дуговым методом без и с применением плазменного ассистирования при относительно низком парциальном давлении азота (~ 0.01 Па), проведено не было. Режим без плазменного ассистирования может использоваться для получения металлического слоя при формировании многослойного покрытия типа Me/MeN малоинерционным вакуумно-дуговым методом с применением источника газовой плазмы.

Цель данной работы – исследование влияния состава газа на свойства молибденовых и нитрид-молибденовых покрытий, полученных вакуумно-дуговым методом, и детальное исследование структуры и фазового состава покрытий на основе молибдена и его нитридов, синтезированных в режиме без плазменного ассистирования.

Методика проведения экспериментов

Осаждение покрытий проводилось на специализированной ионно-плазменной установке «КВИНТА» для вакуумно-дугового плазменно-ассистированного напыления покрытий [13], оснащенной модернизированным электродуговым испарителем с молибденовым катодом $\varnothing 100$ мм и оригинальным плазменным источником газовой плазмы «ПИНК-П» на основе несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым и полым катодами протяженной конструкции [13, 14]. В качестве материала катода использовался молибденовый сплав МЧ (99.96% Мо), в качестве материала подложек был выбран твердый сплав ВК-8 (для исследования механических и трибологических свойств, элементного и фазового состава) и технически чистый титан ВТ1-0 (для ПЭМ-анализа).

Напыление покрытий велось в аргон-азотной смеси при общем давлении $p = 0.3$ Па. Парциальное давление азота (p_{N_2}) в Ar/N₂-смеси варьировалось от 0 до 0.3 Па. Ток дугового разряда с Мо-катодом составлял $I_d = 90$ А, напряжение смещения $U_b = -150$ А. В зависимости от режима скорость роста покрытия на основе Мо и его нитридов изменялась от 1 до 2 мкм/ч. Время осаждения покрытий было выбрано так, чтобы толщина сформированных покрытий составила 2 и 4 мкм.

Для исследования синтезированных покрытий использовались следующие методики и оборудование. Для измерения твердости (H), модуля Юнга (E), степени упругого восстановления (W), индекса пластичности (H/E) применяли ультрамикротестер Shimadzu DUH-211 ($P_n = 30$ мН). Анализ данных проводится известным методом по ГОСТ Р 8.748–2011. Стоит отметить, что глубина проникновения индентера в покрытие при выбранной нагрузке не превышала 0.3 мкм. Это значение составляет менее 10% от общей толщины покрытия в случае покрытия системы Мо–N толщиной 4 мкм, и соответственно все рассчитанные характеристики относятся непосредственно к самому нитриднему покрытию. В случае MoN-покрытий толщиной 2 мкм глубина проникновения индентера составляет 12–15%, поэтому имеет место влияние подложки и все перечисленные характеристики относятся к системе MoN-покрытие/ВК-8-подложка. Усреднение проводилось по десяти измерениям. Морфологию поверхности, структуру поперечных сколов и элементный состав Мо- и MoN-покрытий изучали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Philips SEM-515 с микроанализатором EDAX ECON IV. Фазовый состав, размер области когерентного рассеяния (ОКР), параметры и величину деформации кристаллической решетки ($\Delta d/d$) исследовали методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Shimadzu XRD-6000 в геометрии Брегга – Брентано. Анализ фазового состава был проведен с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4. Структуру, фазовый и элементный состав исследовали с помощью просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (ПЭМ) на приборе JEOL JEM-2100F. Трибологические измерения проводились с использованием трибометра Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester («TRIBOtechnic», Франция). Тест на износ проводился в геометрии «шарик-диск» при следующих параметрах: SiC-шарик диаметром 6 мм, нагрузка 10 Н, дистанция 800 м, радиус трека износа 3 мм, скорость перемещения шарика 25 мм/с. Данные параметры были выбраны на основе литературных данных для защитных ионно-плазменных покрытий на основе нитридов переходных металлов и характеристик прибора [15–17]. Шероховатость поверхности и профили треков износа покрытий оценивались с помощью кон-

тактного профилометра («TRIBOtechnic», Франция). Адгезионная прочность была исследована на приборе Micro-Scratch Tester MST-S-AX-0000 при следующих параметрах: длина трека 10 мм, скорость продольного перемещения образца относительно алмазной иглы 10 мм/мин, максимальная нагрузка 30 Н. Усреднение проводилось по трем трекам.

Результаты и их обсуждение

Результаты растровой электронной микроскопии показали, что все осажденные покрытия на основе молибдена и его нитридов являются сплошными, на их поверхности не наблюдается отколов и трещин; они содержат небольшую долю капельной фракции. Размер капель не превышает 1 мкм, что связано с высокой температурой плавления молибдена ($T_m = 2623^\circ\text{C}$) и использованием модернизированной конструкции электродугового испарителя с улучшенным водяным охлаждением [13].

Выявлено методом энергодисперсионного анализа, что концентрация азота в покрытии на основе Мо и его нитридов увеличивается от 0 до 45.12 ат. % с увеличением парциального давления азота от 0 до 0.3 Па. Причем она возрастает более чем в 3.5 раза при увеличении p_{N_2} от 0.03 до 0.3 Па (табл. 1).

Таблица 1

Элементный состав покрытий Мо и MoN ($h = 2$ мкм), полученных вакуумно-дуговым методом, в зависимости от парциального давления азота в рабочей смеси Ar/N₂

p_{N_2} , Па	C_{Mo} , вес. %	C_N , вес. %	C_{Mo} , ат. %	C_N , ат. %
0	100	0	100	0
0.03	98.01	1.99	87.78	12.22
0.06	96.19	3.81	80.81	19.19
0.15	93.51	6.49	70.42	29.58
0.30	87.95	12.05	54.88	45.12

Примечание. p_{N_2} – парциальное давление азота в газовой смеси; C – концентрация.

Лучшие результаты по твердости (33 ГПа), степени упругого восстановления ($\geq 50\%$), шероховатости ($R_a = 0.03$ мкм), коэффициенту трения (0.26) и параметру износа ($4.59 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$) соответствуют MoN-покрытию, синтезированному при $p_{N_2} = 0.15$ Па (табл. 2). Для образцов, сформированных при $p_{N_2} = 0.06$ и 0.15 Па, также характерны высокие значения твердости (≈ 30 ГПа), высокая износостойкость (параметр износа $\approx 6 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$), относительно низкий коэффициент трения (≈ 0.3) по сравнению с характеристиками Мо-покрытия ($HV_{0.03} \approx 15$ ГПа; $V = 120 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; $\mu = 0.7$), напыленного в чистом аргоне.

Таблица 2

Свойства покрытий Мо и MoN ($h = 2$ мкм), полученных вакуумно-дуговым методом, в зависимости от парциального давления азота в рабочей смеси Ar/N₂

p_{N_2} , Па	$HV_{0.03}$, ГПа	E , ГПа	W , %	R_a , мкм	R_z , мкм	μ	$V \cdot 10^6$, $\text{мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$
0	15.4	391	30	0.034	0.372	0.66	120.45
0.06	30.3	454	48	0.042	0.414	0.34	0.617
0.15	32.8	472	51	0.031	0.319	0.26	0.459
0.3	29.5	496	47	0.040	0.430	0.36	0.630

Примечание. HV – твердость; E – модуль Юнга; W – степень упругого восстановления; R_a и R_z – среднеарифметическое отклонение профиля и высота неровностей профиля по десяти точкам соответственно; μ – среднее значение коэффициента трения; V – параметр износа.

Были проведены аналогичные эксперименты по напылению покрытий на основе молибдена в режимах без плазменного ассистирования ($p_{N_2} = 0.06$ Па; $p = 0.3$ Па), но с большей длительностью процесса осаждения. Толщина покрытий была увеличена в 2 раза и составила 4 мкм (табл. 3). Элементный состав при увеличении толщины не поменялся, концентрация азота осталась прежней (≈ 19 ат. %). Уменьшение твердости покрытий толщиной 4 мкм по сравнению с твердостью аналогичных покрытий с толщиной 2 мкм произошло из-за температурного влияния. При более длительной ионной бомбардировке растущего покрытия вследствие увеличения длительности про-

цесса осаждения наблюдалось повышение температуры образца с 350 до 450 °С, что способствует релаксации внутренних напряжений и росту кристаллитов, из которых состоит покрытие на основе молибдена. Это, в свою очередь, приводит к снижению твердости. Об этом также косвенно свидетельствует уменьшение модуля Юнга (≈ 386 ГПа).

Таблица 3

Элементный состав и свойства покрытий MoN ($h = 4$ мкм), полученных вакуумно-дуговым методом в режиме без плазменного ассистирования ($p_{N_2} = 0.06$ Па; $p = 0.3$ Па)

C_{Mo} , вес. %	C_N , вес. %	C_{Mo} , ат. %	C_N , ат. %	$HV_{0.03}$, ГПа	E , ГПа	W , %	R_a , мкм	R_z , мкм	μ	$V \cdot 10^7$, $мм^3 \cdot Н^{-1} \cdot м^{-1}$
96.46	03.54	81.38	18.62	28.2	386	49	0.058	0.560	0.52	4.96

Степень упругого восстановления осталась на том же уровне ($\approx 50\%$). Увеличение длительности процесса, а следовательно, повышение доли капельной фракции в покрытии сопровождается увеличением параметров шероховатости ($R_a \approx 0.06$ мкм; $R_z \approx 0.6$ мкм). Коэффициент трения покрытий повысился в 1.5 раза, хотя износостойкость выросла в 1.2 раза.

Результаты рентгеноструктурного анализа показали (рис. 1, табл. 4), что покрытия на основе молибдена и его нитридов толщиной 4 мкм, осажденные при парциальном давлении азота 0.06 Па при общем давлении смеси Ar/N₂ 0.3 Па вакуумно-дуговым методом без плазменного ассистирования, содержат кристаллиты Mo с ОЦК-кристаллической решеткой (> 55 вес. %), нитриды молибдена: β -Mo₂N с тетрагональной кристаллической решеткой (> 38 вес. %) и γ -Mo₂N с кубической кристаллической решеткой (> 2 вес. %). Стоит отметить, что параметр кристаллической ре-

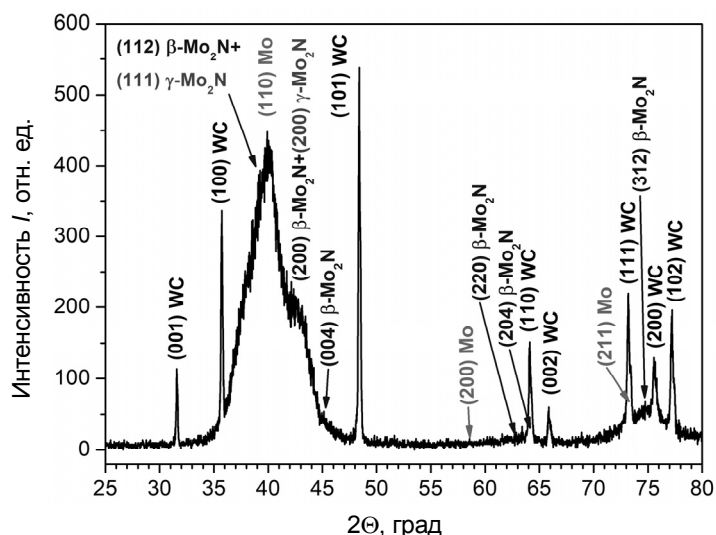


Рис. 1. Участок рентгенограммы покрытия на основе молибдена на твердосплавной подложке из ВК-8, сформированного в режиме вакуумно-дугового осаждения без плазменного ассистирования ($p_{N_2} = 0.06$ Па)

Таблица 4

Результаты рентгеноструктурного анализа покрытия на основе молибдена на твердосплавной подложке из ВК-8, сформированного в режиме вакуумно-дугового осаждения без плазменного ассистирования ($p_{N_2} = 0.06$ Па)

Обнаруженные фазы, вид кристаллической решетки	Содержание фаз, вес. %	Параметры решетки, Å	Размер ОКР, нм	$\Delta d/d \cdot 10^{-3}$
Mo, ОЦК	55.2	$a = 3.1488$	4.20	8.631
Mo ₂ N, тетрагональная	38.4	$a = 4.1877$ $c = 8.0024$	3.81	8.854
Mo ₂ N, кубическая	2.3	$a = 4.2042$	2.97	8.216
WC, гексагональная	4.1	$a = 2.8976$ $c = 2.8293$	-	-

сетки фазы Mo ($a = 3.1488 \text{ \AA}$) отличается от табличного значения ($a = 3.147 \text{ \AA}$). Увеличение параметра может быть связано с внедрением атомов азота в междоузлия кристаллической решетки молибдена (радиус атома Mo равен 139 пм, радиус атома N – 92 пм). По величине деформации кристаллической решетки ($\Delta d/d = (8.2\text{--}8.9) \cdot 10^{-3}$) видно, что покрытие является напряженным. Так как рентгеноструктурный анализ проводили на покрытиях толщиной 4 мкм (рис. 1, табл. 4), синтезированных на образцах из сплава ВК-8, то на рентгенограммах также наблюдаются рефлексы карбида вольфрама (4 вес. %).

Анализируемое ПЭМ-методами покрытие на основе молибдена (рис. 2 и 3), синтезированное по режиму без плазменного ассистирования, является двухфазным. Были обнаружены Mo_2N и Mo. Нитрид Mo_2N присутствует в двух модификациях: $\gamma\text{-Mo}_2\text{N}$ с кубической кристаллической решеткой и $\beta\text{-Mo}_2\text{N}$ с тетрагональной кристаллической решеткой. Параметры кристаллических решеток этих двух нитридов близки, на электронограммах можно разделить рефлексы только с большими индексами типа (311) и (113) (рис. 2, б). Рефлексы с малыми индексами имеют близкие значения радиус-векторов, поэтому трудно разделимы. Темнопольные изображения получить отдельно в таких рефлексах невозможно.

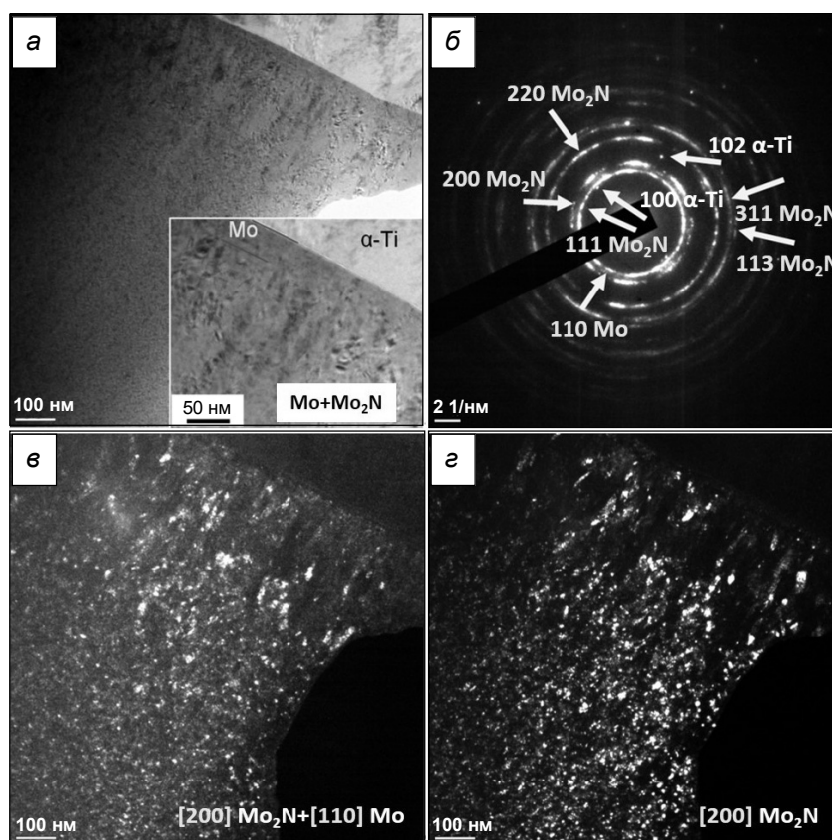


Рис. 2. ПЭМ-изображение структуры покрытия, осажденного вакуумно-дуговым методом без плазменного ассистирования, в области контакта с подложкой: а – светлое поле; б – микроэлектронограмма; в, г – темные поля, полученные в рефлексах $[200]\text{Mo}_2\text{N} + [110]\text{Mo}$, $[200]\text{Mo}_2\text{N}$

Покрытие состоит из нескольких слоев (рис. 2): у подложки ($\alpha\text{-Ti}$) располагается подслои молибдена, имеющий нанокристаллическую структуру (рис. 2, а). Толщина Mo-подслоя равна 30–35 нм. Он формируется на этапе высокоэнергетической бомбардировки поверхности подложки ионами молибдена при отрицательном напряжении смещения 1 кВ. Размер кристаллитов Mo находится в диапазоне $d = 1.6\text{--}5.8 \text{ нм}$, средний размер составляет 2.9 нм (рис. 2, в). Далее располагается двухфазный слой ($\text{Mo} + \text{Mo}_2\text{N}$). Второй подслои с учетом режима осаждения соответствует адгезионному подслою молибдена, осаждаемому в аргоне. Образование Mo_2N , по-видимому, связано с последующей диффузией азота из верхнего основного нитридного слоя. У подложки этот слой имеет явно выраженное столбчатое строение (рис. 2, в, г). Толщина данного подслоя $\approx 200 \text{ нм}$. Поперечные размеры столбиков колеблются от 7.6 до 23.0 нм, среднее значение их поперечного

размера – 13.4 нм, высота столбиков ограничена толщиной данного подслоя и находится в пределах 22.3–188.6 нм. Размеры кристаллитов Mo_2N , из которых состоят столбики, находятся в диапазоне 1.8–5.5 нм, их средний размер составляет 3.0 нм.

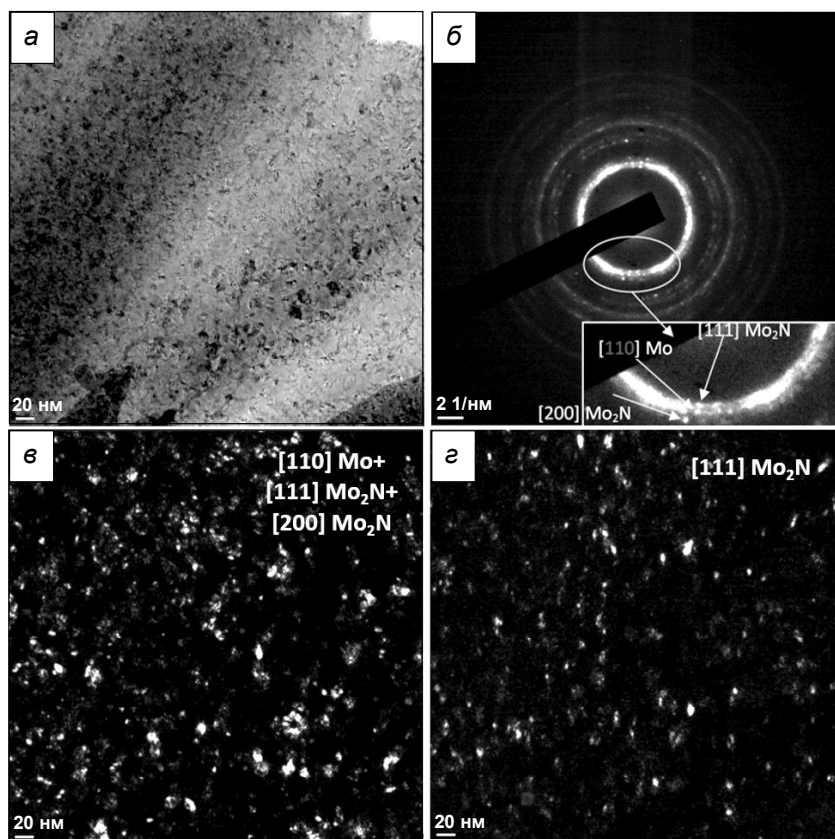


Рис. 3. ПЭМ-изображение структуры средней зоны покрытия, осажденного вакуумно-дуговым методом без плазменного ассистирования: *а* – светлое поле; *б* – микроэлектронограмма; *в*, *г* – темные поля, полученные в рефлексах $[110]\text{Mo}+[111]\text{Mo}_2\text{N}+[200]\text{Mo}_2\text{N}$, $[111]\text{Mo}_2\text{N}$

Столбчатая структура у основного третьего слоя покрытия просматривается слабо (рис. 2 и 3). В основном слое размеры кристаллитов Mo_2N находятся в диапазоне 1.8–7.6 нм, их средний размер составляет 3.6 нм (рис. 2, *г* и 3, *д*). Гистограмма размеров Mo_2N -кристаллитов представлена на рис. 4. Нет выраженной зависимости размера кристаллитов по толщине покрытия. Размеры

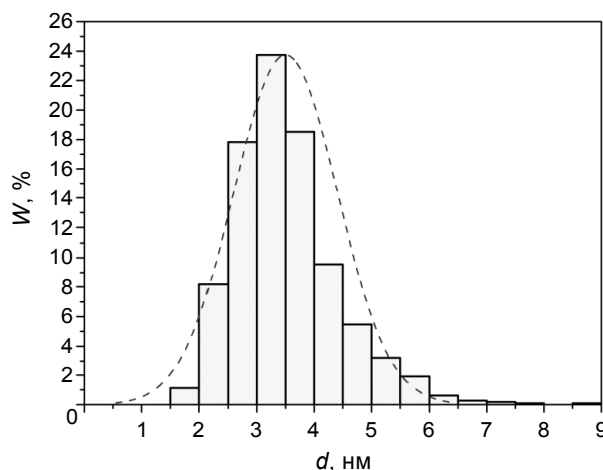


Рис. 4. Гистограмма размеров Mo_2N -зерен покрытия на основе молибдена и его нитридов, полученного вакуумно-дуговым методом без плазменного ассистирования

Мо-кристаллитов находятся в диапазоне 1.6–5.3 нм, их средний размер составляет 2.8 нм (рис. 2, в и 3, в). Гистограмма размеров Мо-кристаллитов представлена на рис. 5.

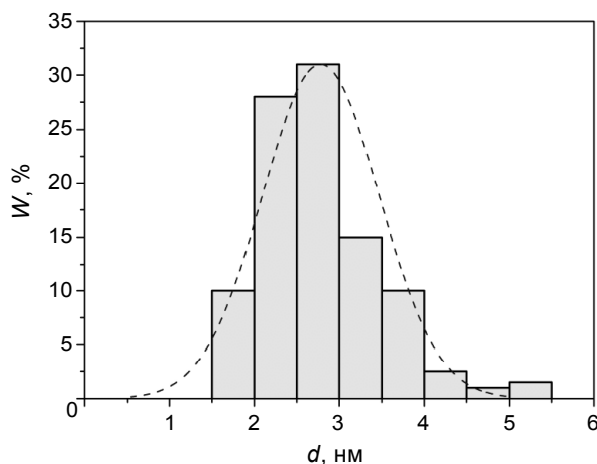


Рис. 5. Гистограмма размеров Мо-зерен покрытия на основе молибдена и его нитридов, полученного вакуумно-дуговым методом без плазменного ассистирования

Закключение

Вакуумно-дуговым методом были получены покрытия на основе молибдена и его нитридов. Увеличение концентрации азота в покрытии было достигнуто увеличением парциального давления азота в аргон-азотной смеси в диапазоне от 0 до 0.3 Па при общем давлении 0.3 Па.

Установлено, что для MoN-покрытий характерны высокие значения твердости (≈ 30 ГПа), высокая износостойкость (параметр износа $\sim 10^{-7}$ мм³·Н⁻¹·м⁻¹), относительно низкий коэффициент трения (≈ 0.3) по сравнению с характеристиками Мо-покрытия ($HV_{0.03} \approx 15$ ГПа, $V = 120 \cdot 10^{-6}$ мм³·Н⁻¹·м⁻¹, $\mu = 0.7$), напыленного в чистом аргоне. Лучшие результаты по твердости (33 ГПа), степени упругого восстановления ($\geq 50\%$), шероховатости ($R_a = 0.03$ мкм), коэффициенту трения (0.26) и параметру износа ($4.59 \cdot 10^{-7}$ мм³·Н⁻¹·м⁻¹) соответствуют MoN-покрытию, синтезированному при $p_{N_2} = 0.15$ Па.

Выявлено, что покрытие на основе молибдена и его нитридов, осажденное традиционным вакуумно-дуговым методом без плазменного ассистирования в смеси Ar/N₂ при парциальном давлении азота 0.06 Па, в основном содержит кристаллиты Мо с ОЦК-кристаллической решеткой (> 55 вес. %), а также β -Mo₂N с тетрагональной кристаллической решеткой (> 38 вес. %) и γ -Mo₂N с кубической кристаллической решеткой (> 2 вес. %). Параметр кристаллической решетки у выявленной фазы Мо ($a = 3.1488$ Å) отличается от табличного значения ($a = 3.147$ Å), что может быть связано с внедрением атомов азота в междоузлия кристаллической решетки молибдена. Покрытие является напряженным ($\Delta d/d = (8.2\text{--}8.9) \cdot 10^{-3}$). Размеры кристаллитов Mo₂N находятся в диапазоне 1.8–7.6 нм, средний размер составляет 3.6 нм. Размеры Мо-кристаллитов находятся в диапазоне 1.6–5.3 нм, средний размер составляет 2.8 нм.

Результаты растровой электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа получены с использованием оборудования ЦКП НОЦ ТГУ «Физика и химия высокоэнергетических систем». Результаты наноиндентации и ПЭМ-анализа получены на базе Научно-образовательного инновационного центра «Наноматериалы и нанотехнологии» НИ ТПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А.А., Саблев Л.П., Григорьев С.Н. Вакуумно-дуговые покрытия. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2010. – 318 с.
2. Kazmanli M.K., Urgen M., and Cakir A.F. // Surf. Coat. Technol. – 2003. – V. 167. – P. 77–82.
3. Xiaodong Zhu, Di Yue, Chen Shang, et al. // Surf. Coat. Technol. – 2013. – V. 228. – P. S184–S189.
4. Gilewicz A., Warcholinski B., and Murzynski D. // Surf. Coat. Technol. – 2013. – V. 236. – P. 149–158.
5. Jian-Ying Xiang and Fan-Bean Wu. // Surf. Coat. Technol. – 2017. – V. 332. – P. 161–167.
6. Tao Wang, Guojun Zhang, Shuai Ren, and Bailing Jiang // J. Alloys Compounds. – 2017. – V. 701. – P. 1–8.

7. Sarioglu C., Demirler Ugur, Kursat Kazmanli M., and Urgen M. // Surf. Coat. Technol. – 2005. – V. 190. – P. 238–243.
8. Крысина О.В., Коваль Н.Н., Лопатин И.В., Шугуров В.В. // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 11/3. – С. 88–92.
9. Krysin O.V., Koval N.N., Lopatin I.V., et al. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2016. – V. 669. – P. 012032.
10. Krysin O.V., Shugurov V.V., Prokopenko N.A., and Petrikova E.A. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2018. – V. 1115. – P. 032075.
11. Винтизенко Л.Г., Григорьев С.В., Коваль Н.Н. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2001. – Т. 44. – № 9. – С. 28–35.
12. Krysin O., Shugurov V., Koval N., and Prokopenko N. // Key Eng. Mater. – 2016. – V. 712. – P. 9–14.
13. Shugurov V.V., Koval N.N., Krysin O.V., and Prokopenko N.A. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2019. – V. 1393. – P. 012131.
14. Kalushevich A.A., Koval N.N., Denisov V.V., Yakovlev V.V., Shugurov V.V. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 12/3. – С. 118–122.
15. Jian Wang, Paul Munroe, Zhifeng Zhou, and Zonghan Xie. // Thin Solid Films. – 2019. – V. 682. – P. 82–92.
16. Wang J., Yazdi M.A.P., et al. // Surf. Coat. Technol. – 2017. – V. 320. – P. 441–446.
17. Pogrebnjak A.D., Beresnev V.M., Bondar O.V., et al. // Mater. Design. – 2018. – V. 153. – P. 47–59.

Поступила в редакцию 11.06.2020,
после доработки – 27.10.2020.

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Крысина Ольга Васильевна, к.т.н., ст. науч. сотр. ИСЭ СО РАН, e-mail: krysina_82@mail.ru;
Иванов Юрий Федорович, д.-ф.м.н., гл. науч. сотр. ИСЭ СО РАН, e-mail: yufi55@mail.ru;
Прокопенко Никита Андреевич, аспирант, инженер ИСЭ СО РАН, e-mail: nick08_phantom@mail.ru;
Шугуров Владимир Викторович, мл. науч. сотр. ИСЭ СО РАН, e-mail: shugurov@opee.hcei.tsc.ru;
Петрикова Елизавета Алексеевна, мл. науч. сотр. ИСЭ СО РАН, e-mail: elizmarkova@yahoo.com;
Толкачев Олег Сергеевич, мл. науч. сотр. ИСЭ СО РАН, e-mail: ost4@tpu.ru.