

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ ИОННО-ЛУЧЕВЫХ ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ

М. А. АНДРЕЕВ, Л. В. МАРКОВА

ГНУ «Институт порошковой металлургии». 220005, г. Минск, Республика Беларусь, ул. Платонова, 41

В работе исследованы структура и свойства покрытий, сформированных методом ионно-лучевого распыления в вакууме композиционных мишеней на основе хрома с добавками ультрадисперсных алмазов и нанодисперсных частиц Al_2O_3 и ZrO_2 . Показано, что метод ионно-лучевого распыления позволяет переносить материал мишени на изделие в виде покрытия с сохранением состава и стехиометрии соединения. Разработана структурная модель ионно-лучевых вакуумных покрытий на основе хрома с добавками ультрадисперсных алмазов, Al_2O_3 и ZrO_2 Библиогр. 1, рис. 5.

Ключевые слова: ионно-лучевые вакуумные покрытия, наноразмерные частицы, структура, свойства

Одно из актуальных направлений в области науки и техники — модификация поверхности конструкционных и инструментальных сталей с целью повышения эксплуатационных характеристик деталей машин и механизмов, работающих в условиях повышенного износа и агрессивных сред. Сегодня на предприятиях машиностроительной и металлообрабатывающей промышленности широко применяются различные методы модификации поверхности, такие как нанесение износостойких покрытий вакуумными физическими и химическими методами, различные виды химико-термической обработки.

Среди физических методов формирования функциональных покрытий метод ионно-лучевого распыления является наиболее эффективным для нанесения пленок многокомпонентных материалов. В настоящее время одним из наиболее перспективных путей повышения эффективности износостойких покрытий является добавка в мишень для распыления малого количества (до нескольких процентов) наноразмерных частиц оксидов некоторых металлов, а также ультрадисперсных алмазов (УДА). Поскольку при ионно-лучевом распылении состав и стехиометрия многокомпонентного материала распыляемой мишени практически полностью переносится в покрытие, этот метод можно использовать для получения тонких композиционных покрытий с добавками наноразмерных частиц, вводя вышеназванные материалы в мишень для распыления.

Материал и методика исследований. В качестве исследуемого материала были взяты ионно-лучевые покрытия на основе хрома с добавками 1 и 5 мас. % ZrO_2 и Al_2O_3 , соответственно [1], а также с добавками 1 и 5 мас. % УДА. Размер частиц ZrO_2 составлял 50 нм, размер частиц Al_2O_3 — 20 нм. Время напыления составляло 2 ч. Покрытия формировались на стали марки Ст3.

Исследование морфологии поверхности покрытий проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия), разрешающая способность которого составляет 1,7 нм (при 30 кВ) и 3,0 нм (при 5 кВ), а также на атомно-силовом микроскопе НТ-206 (ОДО «Микротестмашины», г. Гомель). Разрешение АСМ составляет: вертикальное — 0,2 нм, горизонтальное — 2 нм.

Фазовый состав ионно-лучевых покрытий исследовали методом дифракции обратно рассеянных электронов (ДОЭ или EBSD) с помощью приставки к сканирующему электронному микроскопу HKL. Принцип действия EBSD-анализа основан на формировании полос Кикучи в результате дифракции обратно рассеянных электронов.

Величина нагрузки на индентор типа Кнуппа при измерении микротвердости составляла 0,02...0,03 Н.

Адгезионная прочность определялась с использованием специального блока, в котором индентор типа Роквелл двигался по поверхности со скоростью 5 мм/мин с плавно возрастающей нагрузкой. Значение адгезионной прочности определялось по величине нормальной нагрузки, при которой происходит срыв покрытия по сигналу акустической эмиссии.

Износостойкость определяли при нагрузке на индентор 0,2 Н и пути 10 м. Индентор в виде шарика диаметром 3 мм совершал возвратно-поступательное движение по поверхности образца в отсутствие смазки. Длина единичного прохода по поверхности образца составляла 10 мм. В процессе испытаний на износостойкость определяли коэффициент трения.

Ионно-лучевые покрытия на основе хрома. Хром является материалом повышенной коррозионной стойкости. Технология, применяемая для получения данных покрытий, создает беспористую поверхность, которая практически недоступ-

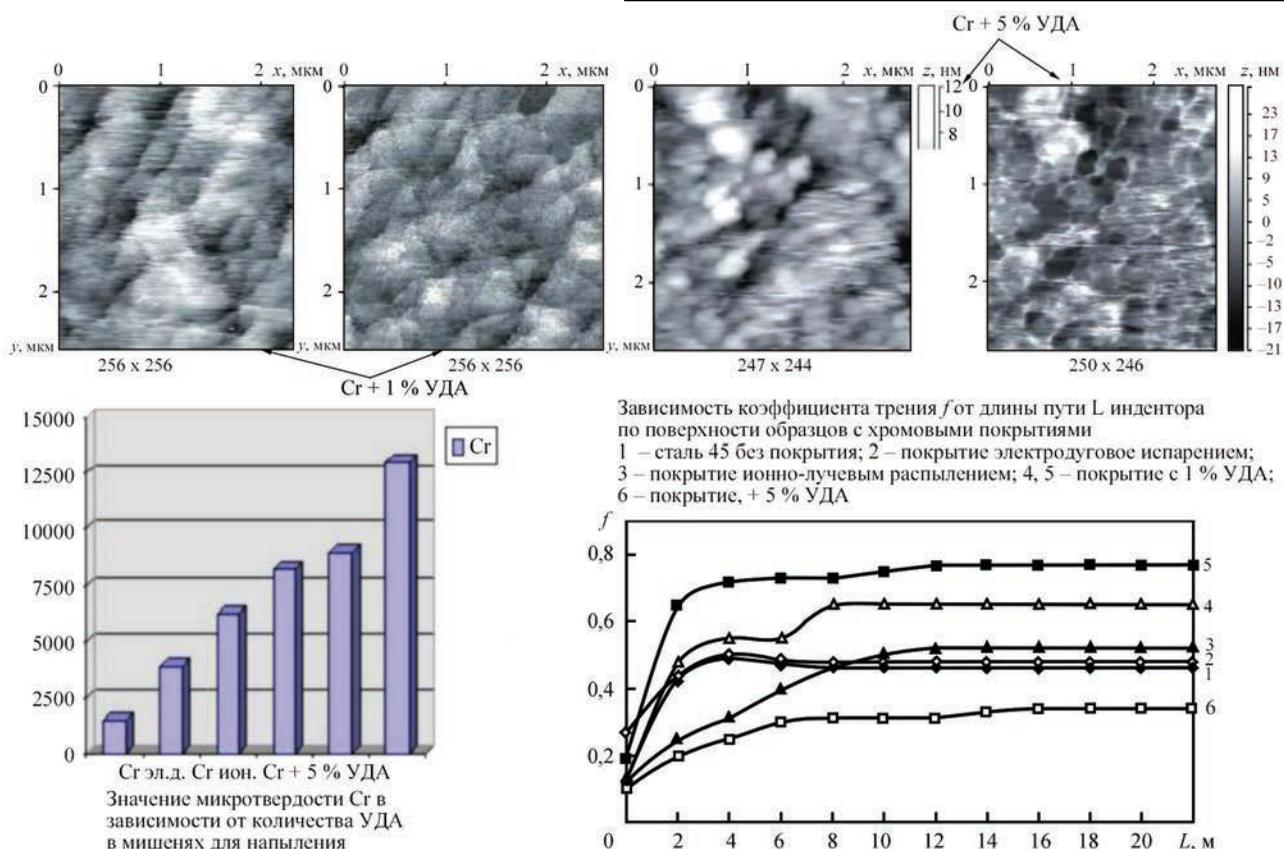


Рис. 1. Микроструктура, микротвердость и коэффициент трения металла ионно-лучевого покрытия на основе Cr с добавками 1 и 5 % УДА

на для воздействия даже самых жестких и агрессивных химических реагентов. Поэтому в данном случае для определения коррозионной стойкости покрытия использовался травитель следующего состава: 50 % HCl + 50 % HF.

Структура ионно-лучевого хромового покрытия представляет собой трехслойную композицию. Она состоит из очень тонкого поверхностного слоя, из среднего слоя, имеющего столбчатую разветвленную структуру, и сформировавшегося под ней слоя с зернистой структурой. Добавление 1 % УДА в мишень для распыления увеличивает стойкость покрытия к воздействию травителя. Только на отдельных участках появляются ямки травления, характеризующие области скопления дислокаций. На поверхности хромового покрытия с 1 % УДА практически полностью отсутствуют единичные ямки травления, но зато начинает проявляться мелкозернистая структура (рис. 1). Анализ поперечной структуры покрытия показал, что после введения уже 1 % УДА в поперечной структуре отсутствует явно видимая столбчатость.

Исследование морфологии поверхности ионно-лучевых покрытий на основе Cr + 5 % УДА еще сложнее. Даже при очень длительном травлении ямки травления появляются отдельными скоплениями в виде редких цепочек и отдельных точек. В отдельных случаях, когда травление по дефектам структуры прошло до самой

основы, удалось выявить поперечную структуру покрытия на основе хрома. На фотографиях структур (рис. 1) мы четко видим столбчатую структуру среднего слоя покрытия, причем столбчатая структура слоистая, но очень плотная. Дефекты в ней практически отсутствуют. Размер отдельных структурных составляющих не превышает 10 нм. На поверхности покрытия видна очень тонкая и абсолютно бесструктурная при разрешении СЭМ пленка. В нее как бы вращается столбчатая структура покрытия.

Морфология поверхности ионно-лучевого хромового покрытия, полученная на атомно-силовом микроскопе, имеет следующие характеристики: высота зерен не превышает 40 нм, а размер колеблется в пределах 100...150 нм (рис. 1).

Добавление 1 % УДА в хромовую мишень для распыления вызывает измельчение зернистой структуры покрытия. Средний размер зерна составляет 70 нм, а высота зерен не превышает 15...20 нм. Границы зерен выявляются слабо. При введении 5 % УДА в хромовую мишень для распыления более четко проявляются границы зерен у покрытия. Средний размер зерен уменьшается до 40...50 нм, а высота не превышает 10 нм. В этом случае хорошо видно упрочнение границ зерен при использовании режима фазового контраста (рис. 1).

Интересные результаты получены при измерениях микротвердости хромовых ионно-лучевых

покрытий. Значения микротвердости хромовых ионно-лучевых покрытий с различным содержанием УДА составляют:

- в случае введения в мишень для распыления 1 % УДА микротвердость 16500 МПа;
- в случае с 5 % УДА микротвердость 25900 МПа (рис. 1).

Известно, что покрытия, полученные методом ионно-лучевого распыления, как правило, хрупкие. Высокая твердость покрытий может вызывать их растрескивание и последующее отслоение. Поэтому нами были проведены триботехнические испытания данных покрытий. Анализ зависимости коэффициента трения от длины пути, пройденного индентором по поверхности образцов с хромовыми покрытиями, показал (рис. 1), что их можно разделить на два этапа.

Первый этап соответствует приработке трущихся поверхностей. В это время у всех образцов наблюдается рост коэффициента трения. Это объясняется низкой шероховатостью исходной поверхности исследуемых покрытий. В процессе приработки гладкая исходная поверхность разрушается и формируется равновесная структура поверхностных слоев покрытия с шероховатостью, превышающей исходную.

Второй этап — установившееся изнашивание. Коэффициент трения на этом этапе не изменяется. Путь, пройденный индентором до выхода на установившееся изнашивание, может служить одним из критериев оценки износостойкости покрытия. Добавка УДА в мишень для распыления увеличивает длину пути до приработки, величина которого достигает максимума у покрытия, содержащего 5 % УДА. Данному покрытию соответствует и минимальный коэффициент трения. Классический, третий этап изменения коэффициента трения — разрушение покрытия и трение по подложке — у всех исследованных образцов после 22 м пути отсутствует.

Таким образом, исследования показали, что композиционные хромовые покрытия, сформированные методом ионно-лучевого распыления, отличаются достаточно хорошей износостойкостью. Важным показателем износостойкости является морфология поверхности износа в режиме установившегося трения. Большая часть поверхности износа покрытия, полученного распылением порошковой хромовой мишени с 1 % УДА, свободна от каких-либо следов воздействия индентора. В то же время на отдельных участках дорожек трения присутствуют довольно глубокие канавки, вероятно, являющиеся результатом внедрения отколовшихся частиц покрытия.

При введении в мишень для распыления УДА кроме прямого переноса алмазной фазы идет ча-

стичное ее разложение и образование карбидов хрома. Они располагаются по границам зерен и препятствуют выходу дислокаций на поверхность, одновременно повышая твердость покрытия. Увеличение алмазной фазы до 5 % позволяет образовать сетку практически по всей поверхности покрытия. Это полностью перекрывает возможность выхода дислокаций на поверхность. Процессы диффузионного переползания дислокаций из основы в покрытие по межфазным границам и процессы образования дислокаций роста не прекращаются при формировании покрытия. Образование дислокационных сеток дополнительно упрочняет покрытие. Это подтверждается данными микротвердости.

В покрытии с 5 % УДА $H_{\mu} = 25\,900$ МПа. Однако кроме дислокационных процессов и образования сетки на значение микротвердости влияет степень измельчения структурных составляющих.

Для ионно-лучевых покрытий на основе хрома с добавкой 1 % частиц ZrO_2 размером 50 нм в мишень для распыления характерен развитый рельеф поверхности (рис. 2). Наблюдается зеренная структура, причем размер зерен колеблется от 50 до 200 нм. После травления в смеси кислот (HNO_3 , HF , HCl) хорошо видим столбчатую структуру покрытия, причем она более плотная в верхних слоях и более рыхлая у основания.

Если сравнить покрытия, сформированные с добавкой 5 % частиц ZrO_2 того же размера (50 нм), то здесь наблюдается более дисперсная структура, размер зерна уменьшается и становится более однородным (рис. 2). Размер зерна колеблется в пределах 20...30 нм. Съемка в характеристическом рентгеновском излучении свидетельствует о том, что ZrO_2 , в основном, располагается по границам зерен.

Распыление мишеней с 5 % ZrO_2 приводит к уменьшению размера зерна. Четко видно, что в обоих случаях диоксид циркония располагается, в основном, по границам зерен.

Измерения микротвердости покрытий показали: 17759 МПа — для мишеней с 1 % ZrO_2 и 17800 МПа — для мишеней с 5 % ZrO_2 .

Исследование поверхности методом атомно-силовой микроскопии проводили для образцов, сформированных из хромовых мишеней, содержащих ZrO_2 , (рис. 2), а также из мишеней, содержащих добавки оксида алюминия (рис. 3).

Как показало проведенное исследование, однородную структуру с малым размером зерна дает распыление хромовой мишени с 5 % ZrO_2 . Однородность структуры подтверждается изображением в режиме латеральных сил. Размер зерна колеблется от 60 до 100 нм (рис. 2).

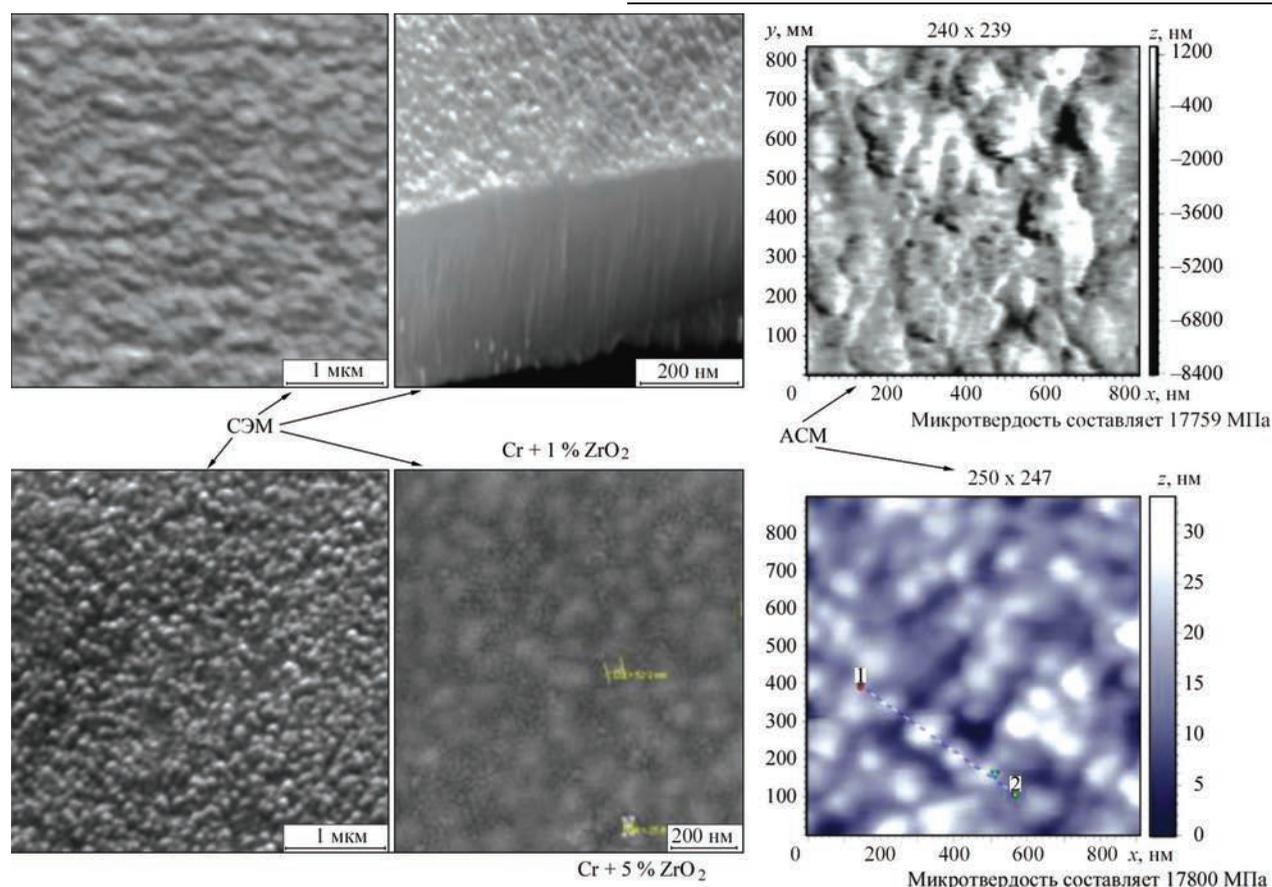


Рис. 2. Микроструктура ионно-лучевого покрытия на основе Cr с добавками 1 и 5 % ZrO_2

Уменьшение содержания ZrO_2 до 1 % приводит к увеличению зерна хромового покрытия. Размер зерен в покрытии из мишени с частицами ZrO_2 размером 50 нм колеблется от 50 до 200 нм (рис. 2). При этом у него наибольшая неоднородность поверхности в режиме латеральных сил. В структуре поверхности присутствуют две фазы, причем одна из них делится на субзерна размером 40 нм. Зеренная структура для покрытия, сформированного с использованием хромовой мишени, содержащей 5 % частиц ZrO_2 размером 50 нм, однородная, размер зерна колеблется в пределах 50...100 нм.

Полученные данные можно объяснить следующим образом. Размер зерна в хромовом ионно-лучевом покрытии зависит от плотности центров зародышеобразования при кристаллизации покрытия, к которым, в числе прочих, относятся и частицы ZrO_2 .

Размерный диапазон частиц ZrO_2 в количестве 5 % формирует оптимальные условия для формирования однородной наноразмерной структуры с размером зерна 60...100 нм. Содержание оксида ZrO_2 1 % уже не обеспечивает достаточное количество центров зародышеобразования для формирования наноразмерного зерна в покрытии.

Исследование поверхности ионно-лучевого покрытия, сформированного распылением хромовой

мишени с добавкой 5 % Al_2O_3 , показало, что она имеет зеренную структуру. Размер зерен колеблется от 50 до 70 нм. После травления в смеси кислот проявилось столбчатое строение покрытия.

При исследовании покрытия, сформированного с помощью мишени Cr + 5 % Al_2O_3 , на поле 4×4 мкм удается установить, что рельеф сформирован множеством углублений, шероховатость R_a составляет 9,1 нм. На поле 2×2 мкм выявили, что поверхность сформирована углублениями диаметром 100...400 нм и отдельными выступами диаметром 100...200 нм. В режиме «Torsion» поверхность одного цвета, следовательно, она однофазная.

Добавление в хромовую мишень для распыления 5 % Al_2O_3 позволяет повысить микротвердость покрытий до 29640 МПа. Для этих покрытий результаты микротвердости отличаются хорошей стабильностью.

Ионно-лучевые хромовые покрытия без добавок различных материалов в мишень для распыления имеют значения микротвердости порядка 7600 МПа. Введение оксидов алюминия в мишень для распыления позволяет сформировать на поверхности образцов покрытия, имеющие микротвердость почти в два-три раза выше.

Методом царапания определена адгезионная прочность титановых покрытий. Нормальная на-

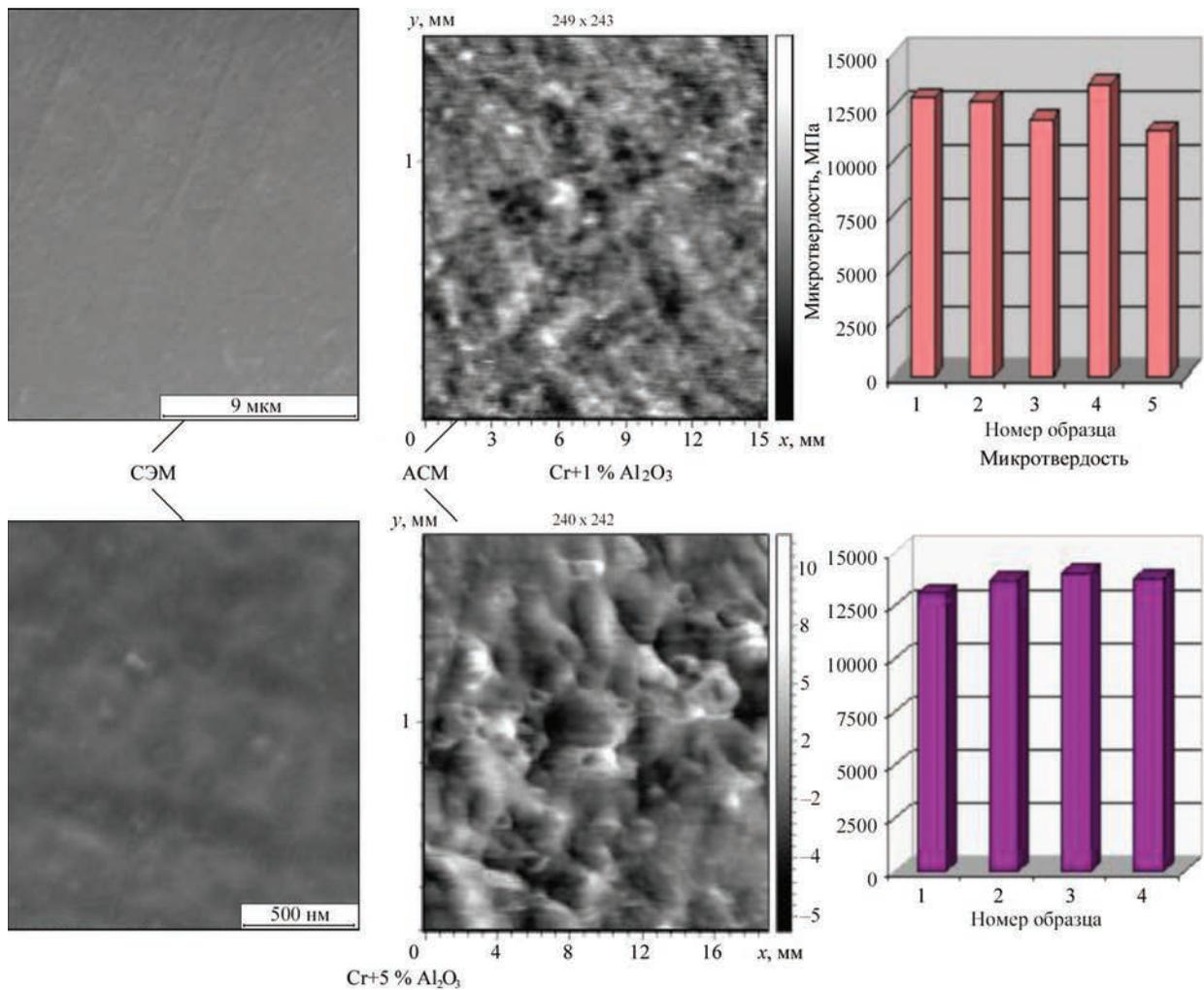


Рис. 3. Микроструктура и микротвердость ионно-лучевого покрытия на основе Cr с добавками 1 и 5 % Al₂O₃

грузка на индентор в царапине возрастала от 0 до 90 Н, скорость движения индентора по поверхности составляла 5 и 10 мм/мин. Износостойкость оценивалась по величине износа, который определялся по площади лунки на профилограммах поперек дорожек трения. Наибольший износ зафиксирован у покрытий из мишени «Cr + 1 % ZrO₂ размером частиц 50 нм», для которого был установлен $K_{тр} = 0,7$. Высокое значение износа и $K_{тр}$, также как и низкое значение адгезионной прочности, объясняется разрушением покрытия. Наилучшие результаты были зафиксированы для покрытий, сформированных из мишени «Cr + 5 % ZrO₂ с размером частиц 50 нм», в данном случае $K_{тр} = 0,17$. Отсутствие ярко выраженных лунок износа для большинства покрытий свидетельствует об образовании в зоне трения перенесенных слоев.

Анализ фазовой структуры ионно-лучевых покрытий проводили методом дифракции обратно рассеянных электронов (ДОЭ или EBSD) с помощью приставки к сканирующему электронному микроскопу HKL. Принцип действия EBSD-анализа основан на формировании дифракционной картины, которая образуется в результате диф-

ракции отраженных электронов. Информация, заложенная в дифракционной картине, содержит данные о симметрии кристалла и его ориентации. Поскольку углы между плоскостями и осями зоны однозначно определены симметрией кристалла и параметрами его решетки, то информация, которая извлекается из дифракционной картины, используется для определения фаз, содержащихся в образце.

Результаты точечного рентгенофазового исследования ионно-лучевых покрытий представлены на рис. 4. Полосам Кикучи присвоены индексы Миллера в соответствии с кристаллическими плоскостями, которые их сформировали, а точки пересечения полос обозначены символами осей зоны. Структура покрытий исследовалась в нескольких точках (участках) покрытий.

На первом этапе происходит столкновение частиц из газовой фазы с поверхностью подложки, после чего частицы могут прочно закрепиться на подложке, либо через некоторое время испариться, либо упруго оттолкнуться от поверхности.

Согласно результатам рентгенофазового анализа, в процессе формирования ионно-лучевых по-

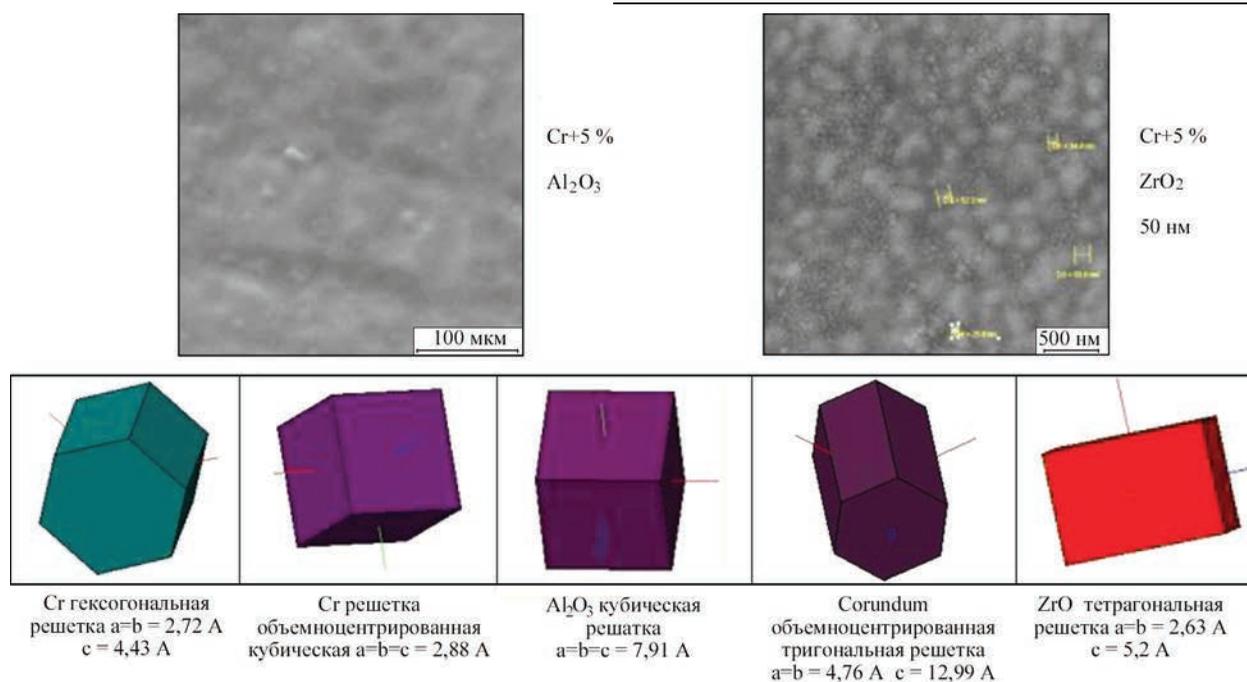


Рис. 4. Морфология поверхности ионно-лучевого покрытия на основе Cr с различными добавками (данные HKL)

крытий могут образовываться различные фазы как металла мишени, так и нанодисперсных добавок.

Так, например, при распылении мишеней с добавкой ZrO_2 хром и титан могут образовывать гексагональную, кубическую или тетрагональную решетку.

Кристаллическая решетка ZrO_2 в покрытии может быть ромбической и моноклинной. Al_2O_3 образует гранецентрированную кубическую решетку или объемноцентрированную тригональную решетку, возможно образование и ромбической решетки.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что в процессе ионно-лучевого распыления, независимо от состава и количества добавок хром образует три вида кристаллических решеток: кубическую, гексагональную и кубическую объемноцентрированную. Кроме того, установлено, что обычная кубическая решетка и объемноцентрированная кубическая решетка имеют разные межплоскостные расстояния — 0,288 нм для простой кубической и 0,459 нм для объемноцентрированной. Гексагональная решетка имеет $a = b = 0,272$ нм, $c = 0,443$ нм (рис. 4).

Использование метода EBSD позволило доказать, что в процессе ионно-лучевого распыления ZrO_2 и Al_2O_3 переносится из мишени на покрытия в виде кластерных кристаллических структур. Так, ZrO_2 в покрытиях на основе хрома выявлен в виде трех кристаллических решеток: тетрагональной с межплоскостными расстояниями $a = b = 0,363$ нм, $c = 0,520$ нм и ромбической с аналогичными межплоскостными расстояниями. Al_2O_3 в составе покрытия имеет три кристаллических решетки: гранецентрированную кубическую, ромби-

ческую и объемноцентрированную тригональную решетку, характерную для корунда (рис. 4).

Причины образования различных кристаллических фаз в процессе формирования ионно-лучевых покрытий требуют дальнейшего исследования.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что методом модификации поверхности твердых тел, применяя способ нанесения покрытий ионно-лучевым распылением, возможно в широких пределах целенаправленно изменять поверхностные свойства конструкционных и инструментальных материалов.

Проведенные исследования ионно-лучевых покрытий на основе хрома с добавками ультрадисперсных алмазов позволили предложить концепцию механизма формирования данных покрытий. Исследование ионно-лучевых покрытий на основе хрома с добавками оксидов металлов подтверждают предложенный механизм. Остановимся кратко на основных стадиях формирования ионно-лучевых покрытий.

Процесс формирования тонких пленок независимо от метода переноса материала и его химического состава проходит в несколько стадий (рис. 5):

- зарождение частиц новой фазы;
- рост размера частиц без изменения их числа;
- образование островков и дальнейшее увеличение размеров островков;
- слияние островков в сплошную пленку.

На первом этапе происходит столкновение частиц из газовой фазы с поверхностью подложки,

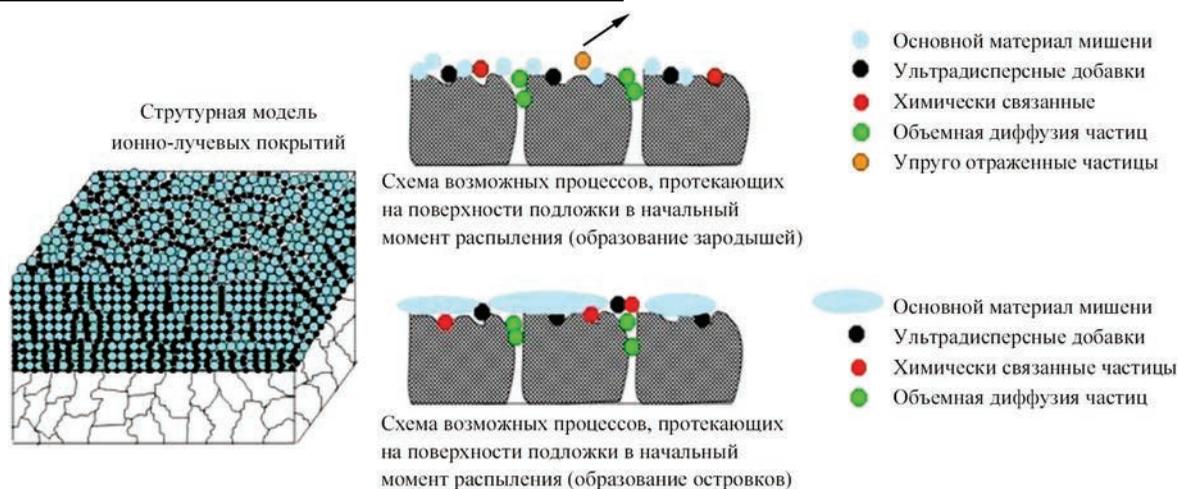


Рис. 5. Структурная модель ионно-лучевых покрытий, сформированных на основе хрома с добавками УДА, Al_2O_3 и ZrO_2

после чего частицы могут прочно закрепиться на подложке, либо через некоторое время испариться, либо упруго отразиться от поверхности.

Подложка перед формированием покрытия подвергается очистке ионным пучком, вследствие этого на ней появляются дефекты, которые и определяют поведение частиц, попавших на поверхность в процессе распыления. Это так называемые дислокационные трубки (области скопления дислокаций), располагающиеся, как правило, по границам зерен. Частицы распыленного материала, попавшие в такие трубки, проникают вглубь подложки, и в этом случае имеет место, так называемая, объемная диффузия. Часть частиц удерживается на подложке за счет поверхностных сил притяжения, часть частиц образует химическую связь с материалом покрытия. Часть частиц может упруго отразиться от поверхности основы.

Рост тонких пленок после образования зародышей может идти по трем возможным механизмам: послойный, островковый или смешанный.

Послойный рост — это последовательное заполнение подложки монокластерными слоями. Островковый рост происходит, если связь частиц в островках больше, чем с частицами соседних островков, что приводит к преимущественному росту островков вверх. Процессам послойного и островкового роста можно дать простую физическую интерпретацию.

В первом случае происходит полное смачивание поверхности. Присоединение частиц к боковым граням зародыша термодинамически предпочтительнее вплоть до полного заполнения первого слоя.

Во втором случае зародышу выгодно собраться в каплю. В процессе роста условия хорошего смачивания могут нарушаться, и тогда произойдет смена послойного режима на островковый.

После того, как островки, состоящие из двух-четырех адсорбированных частиц на по-

верхности покрытия, приближаются к химически связанным частицам и частицам, попавшим в дислокационные трубки, происходит их слияние и образование крупных островков. Следующим этапом является образование монослоя покрытия. В дальнейшем на этом слое начинают расти следующие слои. Установлено, что ионно-лучевые покрытия имеют смешанный режим роста. Это значит, что после какого-то начального времени распыления (10...20 с) связь между частицами в островках становится больше, чем между частицами соседних островков. В этом случае островки начинают расти вверх, и формируется столбчатая структура. Кроме того, сами столбчатые структурные составляющие имеют слоистость. Наличие столбчатой структуры может вызвать появление нанопористости покрытия.

Нанодисперсные частицы оксидов циркония и алюминия, введенные в хромовые мишени для распыления, адсорбируются на поверхности подложки. Нанодисперсные частицы оксидов препятствуют слиянию частиц хрома в крупные структурные составляющие, а это, в свою очередь, ведет к измельчению структуры покрытия. Часть нанодисперсных частиц располагается по дефектам кристаллов напыляемых материалов, часть — по границам зерен хрома. Проведенные исследования с использованием метода EBSD (дифракция обратно рассеянных электронов) показали, что в процессе формирования ионно-лучевых покрытий наблюдается полный перенос материала мишени в покрытие.

Список литературы/References

- Ильющенко А. Ф., Андреев М. А., Маркова Л. В., Коледа В. В. (2010) Исследование влияния размера частиц ZrO_2 в мишени для распыления на структуру ионно-лучевых покрытий на основе титана и хрома. Новые материалы и технологии: Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка. *Материалы докладов 9-й Международной научно-технической конференции*, ГНПО ИМ НАН Беларуси, Минск, 2010, 29–30 сентября, сс. 204–207.

Пыльчак, А.Ф., Андреев, М.А., Маркова, Л.В., Коледа, В.В. (2010) Examination of influence of ZrO_2 particles size in target for spray gun on structure of ion beam coatings based on titanium and chromium. In Proc. of 9th Int. Sci.-

Techn Conf. on New Materials and Technologies: Powder Metallurgy, Composite Materials, Protective Coatings, Welding (Minsk Belarus, 29-30 September 2010). Minsk SRPPMA, 204-207 [in Russian].

СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ЗНОСОСТІЙКИХ ІОННО-ПРОМЕНЕВИХ ВАКУУМНИХ ПОКРИТТІВ

М. А. АНДРЕЄВ, Л. В. МАРКОВА

ДНУ «Інститут порошкової металургії». 220005, м. Мінськ, Республіка Білорусь, вул. Платонова, 41

В роботі досліджено структуру та властивості покриттів, сформованих методом іонно-променевого розпилення в вакуумі композиційних мішеней на основі хрому з добавками ультрадисперсних алмазів і нанодисперсних частинок Al_2O_3 та ZrO_2 . Показано, що метод іонно-променевого розпилення дозволяє переносити матеріал мішені на виріб у вигляді покриття зі збереженням складу і стехіометрії з'єднання. Розроблено структурну модель іонно-променевих вакуумних покриттів на основі хрому з добавками ультрадисперсних алмазів, Al_2O_3 і ZrO_2 . Бібліогр. 1, рис. 5.

Ключові слова: іонно-променеві вакуумні покриття, нанорозмірні частинки, структура, властивості

STRUCTURE AND PROPERTIES OF WEAR-RESISTANT ION-BEAM VACUUM COATINGS

M. A. ANDREEV, L. V. MARKOVA

SSI «Powder Metallurgy Institute» 41 Platonov Str., 220005, Minsk, Belarus

The work provides the investigations of structure and properties of coatings, formed by ion-beam spraying in vacuum of composite target based on chromium with addition of ultradisperse diamonds and nanodispersed particles of Al_2O_3 and ZrO_2 . It is shown that ion beam spraying allows transfer target material onto the product in form of coating keeping its composition and stoichiometry of the compound. Structural model of ion-beam vacuum coatings based on chromium with addition of ultradisperse diamonds Al_2O_3 and ZrO_2 was developed. Ref. 1, Figures 5.

Keywords: ion-beam vacuum coatings, nanosized particles, structure, properties

Поступила в редакцію 10.07.2018

ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАННЯ ПРИБОРАМИ ІЭС ім. Е.О. Патона

Лаборатории центра:

- ◆ лаборатория мокрой химии;
- ◆ лаборатория спектрального анализа;
- ◆ лаборатория анализа газов в металлах;
- ◆ металлографическая лаборатория;
- ◆ лаборатория рентгеноструктурного анализа;
- ◆ лаборатория электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа;
- ◆ лаборатория анализа поверхности



JAMP-9500F (Japan) — электронный сканирующий микроскоп и Оже-спектрометр



Gleeble 3800 (DSI, USA) — высокотехнологический комплекс для имитации процессов сварки