

УДК 67.02

А.А. Верещака

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА АССИСТИРУЕМОГО ФИЛЬТРУЕМОГО ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАЖДЕНИЯ

Разработан процесс ассистируемого фильтруемого вакуумно-дугового осаждения наноструктурированных многослойных покрытий. Использован источник ассистирующих высокоэнергетических ионов, оснащаемый различными катодами (Cr, Mo). Исследованы основные параметры покрытий, включающие состав, структуру, толщину, твердость, адгезию по отношению к субстрату в зависимости от условий ассистирующей импульсной ионной имплантации. Разработана феноменологическая (физическая) модель процесса вакуумно-дугового осаждения покрытий, ассистируемого высокоэнергетическими ионами (AFCVAD), позволяющая прогнозировать свойства формируемых покрытий на основе бинарных соединений.

Ключевые слова: ассистируемое фильтруемое вакуумно-дуговое осаждение, АФВДО, ионная имплантация, износостойкие покрытия.

Многие проблемы повышения эффективности режущего инструмента решаются путем нанесения покрытий при использовании плазменных технологий. Наряду с формированием стандартных свойств покрытий такая технология может быть применена для получения наноструктур тонких покрытий или поверхностных слоев со специальными свойствами. При использовании комбинированных процессов воздействия (модификации) поверхностей режущего инструмента, когда интегрируются эффекты целенаправленной бомбардировки высокоэнергетическими ионами и процессы ионно-плазменного осаждения покрытия, возможно формирование таких его свойств, которые не могут быть получены с помощью стандартных процессов [1-6]. При этом не только вид частиц, но и их энергия обуславливают ряд положительных эффектов:

- внедрение (имплантация) высокоэнергетических ионов в осаждаемый конденсат увеличивает плотность покрытия;
- повышенная подвижность имплантируемых высокоэнергетических ионов позволяет модифицировать формируемое покрытие в начальной стадии, активно и направленно воздействуя на границы системы «покрытие - субстрат»;
- направленное формирование определенной морфологии поверхности покрытия посредством воздействия на процесс его формирования или на дефекты кристаллической решетки позволяет создавать всевозможные высокоэффективные структуры, например аморфные структуры;
- смешивание материалов покрытия и субстрата в граничной зоне путем бомбардировки высокоэнергетическими ионами инициирует граничную диффузию и позволяет формировать прочные адгезионные связи в системе «покрытие - субстрат».

При ионной имплантации происходит бомбардировка поверхности субстрата или покрытия частицами (ионами) с достаточно высокой энергией, что приводит к изменениям в переходной зоне субстрат/покрытие или в самих субстрате и покрытии. Исследования последних лет [3-11] показали, что бомбардировка высокоэнергетическими ионами воздействует не только на электрические свойства твердого тела, но и на большое количество других физических и химических свойств приповерхностных слоев как самого покрытия, так и субстрата (инструментального материала). Вследствие этого ионная имплантация делает возможным образование граничных слоев с параметрами, которые отличаются от параметров субстрата. В качестве субстратов в этом случае возможно использование не только металлов, но и керамики, стекла и полимеров.

Ионная имплантация позволяет в широких пределах изменять химический состав и структуру приповерхностных областей на глубину до 1...3 мкм без возникновения проблем с адгезией, увеличением радиуса округления режущей кромки, допусками на размер и т.д. При этом решающим является тот факт, что при ионной бомбардировке температура не поднимается выше 150 °С, что невозможно реализовать при использовании других методов, которые работают вблизи области термодинамического равновесия. Некоторые параметры процесса ионной имплантации:

Температура субстрата, °С	Рабочее давление, Па	Глубина имплантации, мкм	Энергия ионов, кэВ
<150	$10^{-1} \dots 10^{-3}$	До 3	До 200

Таким образом, интеграция эффектов фильтруемого вакуумно-дугового осаждения и ассистирующей ионной имплантации может привести к получению высокоэффективных износостойких комплексов с новыми свойствами и областями использования.

Обоснование процесса ассистируемого фильтруемого вакуумно-дугового осаждения (АФВДО). Формирование нанометрической структуры покрытий, получаемых при использовании вакуумно-дуговых процессов КИБ-МеVVA, наиболее целесообразно осуществлять путем ассистирующего (параллельного) воздействия на формируемое покрытие ионами с энергией порядка 20-50 кэВ. При осаждении покрытий с непрерывной или импульсной бомбардировкой конденсата высокоэнергетическими ионами (в мировой практике метод получил наименование Ion Beam Assisted Deposition - IBAD) может быть достигнут значительный положительный эффект за счет оптимальной подготовки поверхности, эффективной активации процессов формирования покрытия, а также воздействия на систему «покрытие - субстрат» в целом. Ассистируемый синтез покрытий имеет ряд преимуществ, которые связаны с перемешиванием конденсируемых слоев высокоэнергетическими ионами и проявляются в виде следующих эффектов:

- нанесение плотных покрытий с однородной структурой и высокой прочностью адгезионной связи в системе «покрытие - субстрат», включая композитные и многослойные покрытия, происходит без внешнего нагрева при умеренной температуре, что наиболее эффективно сдерживает коагуляцию зерен и стимулирует формирование наноразмерных зерен, исключает отпуск и коробление режущих кромок инструмента;
- уменьшаются внутренние напряжения в покрытии и на границе с субстратом;
- осуществляется непрерывное легирование формируемого покрытия на всю толщину, что позволяет, в частности, увеличить пластичность покрытия при сохранении его высокой твердости.

Разработка феноменологической модели процесса АФВДО. Для установления феномена влияния импульсного воздействия на осаждаемый конденсат высокоэнергетическими ионами металлов (*Cr, Mo, Zr, V* и др.) рассмотрен феноменологический подход к взаимодействию имплантируемых ионов и осаждаемого конденсата, формируемого в процессе вакуумно-дугового синтеза покрытий (рисунок).

Если F_{Cr} является потоком бомбардирующих атомов *Cr*, а F_{Me-N} – поток конденсируемых атомов F_{Me-N} , то функция отношения R_a , характеризующая параметры бомбардировки, определится как

$$R_a = F_{Cr}/F_{Me-N}.$$

$$F_{Me-N} = Q Cr_i \gamma_c,$$

где Q – интенсивность осаждения пара, мм²/с; Cr_i – атомная плотность имплантируемых в покрытие ионов хрома (атом/см³); γ_c – безразмерный коэффициент.

Величина F_{Me-N} может быть определена по формуле

$$F_{Me-N} = J_0/e \sum n_i \varepsilon_i \gamma_i,$$

где J_0 – плотность тока; e – степень заряженности электронов; ε_i – количество атомов/ионов (N^+ , N_2^+ и т.д.); n_i – фракционный компонент каждой разновидности.

Статистическая природа эффектов процесса ионного тока такая же, как и у процессов адсорбции света, и может быть определена зависимостью

$$J = J_0 \exp(-ad),$$

где a – коэффициент адсорбции; d – расстояние.

При давлении реакционного газа p и температуре T измеренная текущая плотность тока J_F может быть связана с плотностью тока J_0 зависимостью

$$J_0 = J_F \exp[(ap\gamma_p / K_B T)l],$$

где l – расстояние от источника до цилиндра Фарадея; K_B – постоянная Больцмана; γ_p – безразмерный коэффициент давления, учитывающий разницу между измеренным с помощью датчиков давлением и действительным давлением вдоль пути ионов между ионной пушкой (ионный источник) и режущим инструментом, подлежащим обработке. При этом коэффициент a , характеризующий процессы адсорбции, заменяется выражением $ap\gamma_p / K_B T$. Обычно параметр $1 + \beta = \exp(ap\gamma_p / K_B T)$ определяется таким образом, чтобы $J_0 = J_F(1 + \beta)$.

С учетом влияния всех рассмотренных факторов ионный поток можно охарактеризовать зависимостью

$$F_{Cr} = J_F / e \sum n_i \varepsilon_i \gamma_i (1 + \beta_i),$$

где индекс i составляющей β позволяет учитывать возможное различие в обменной нагрузке поперечного сечения различных участков ионного потока.

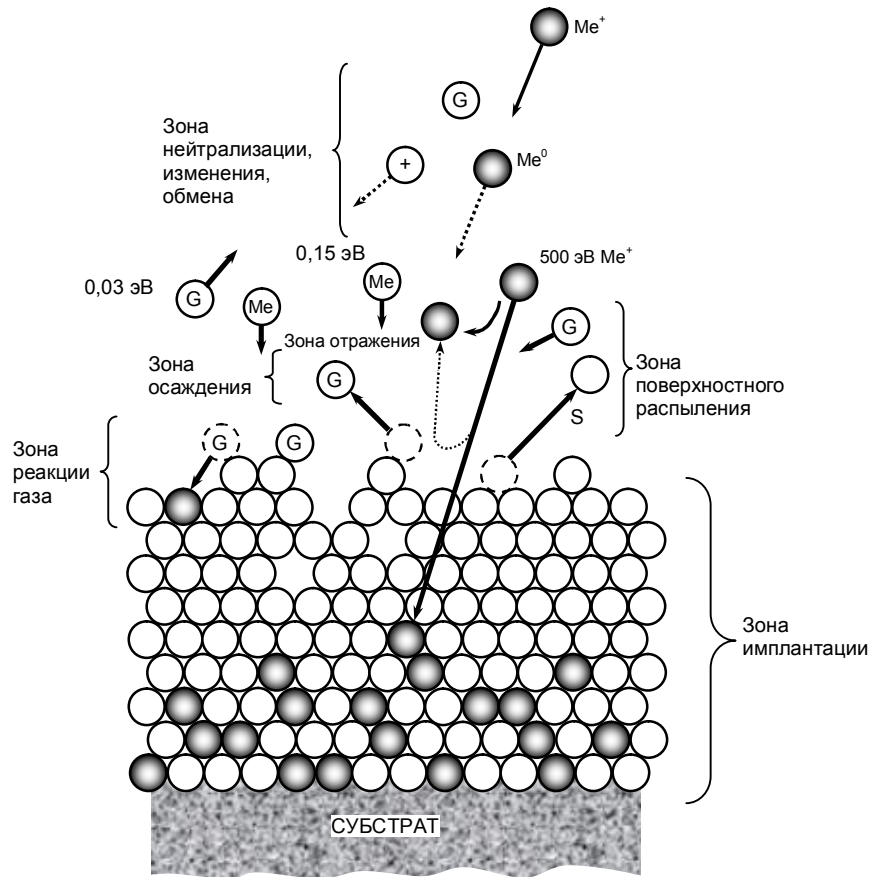


Рис. Физическая модель процесса вакуумно-дугового осаждения покрытий, ассистированного высокоэнергетическими ионами (IBAD)

Анализ полученной модели процесса ассистированного вакуумно-дугового осаждения с сепарацией пароионного потока позволяет оценить основные возможности процессов ассистированного вакуумно-дугового синтеза по сравнению со стандартными процессами. Процессы ассистированного вакуумно-дугового синтеза позволяют:

- легировать покрытие любыми элементами (внедрения) с образованием структур (сплавов), не предсказываемых равновесными диаграммами состояния;
- создавать условия для обеспечения прочных адгезионных

связей в системе «субстрат - покрытие» и, таким образом, повышать качественные характеристики инструмента с покрытием;

- резко снизить температуру рабочих процессов синтеза покрытий, различных по составу и структуре, что заметно расширяет номенклатуру инструментальных материалов, на которые возможно наносить покрытия;

- проводить легирование покрытий с контролируемыми параметрами и свойствами.

Таким образом, феноменологическая (физическая) модель процесса вакуумно-дугового осаждения покрытий, ассистируемого высокоэнергетическими ионами (IBAD), позволяет прогнозировать свойства формируемых покрытий на основе бинарных соединений как функцию отношения R_a , характеризующую параметры ионной имплантации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Panckow, A. Surf. Coat. Technol / A. Panckow, D. Sladkov, Panan K. Singh, C. Genzel. – 2004. - P. 214.
2. Верещака, А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака. – М.: Машиностроение, 1993. - 336 с.
3. Vereshchaka, A.S. Development of technology for the synthesis of vacuum arc coating assisting by a high-energy ions / A.S. Vereshchaka, O.I. Obrezkov, L. Dubner // Proceedings of the Int. Scient.Conf. «Protec-02». – 2002. - V.1. – P. 139.
4. Верещака, А.С. Функциональные покрытия для режущего инструмента / А.С. Верещака, А.А. Верещака // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. - № 6. – С.28-43.
5. Vereschaka, A.S. Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multilayered coating / A.S. Vereschaka, A.A. Vereschaka, A.K. Kirillov // Key Eng. Materials. - 2012. - Vol.496. – P. 67.
6. Metel, A. Cutting tools nitriding in plasma produced by a fast neutral molecule beam / A. Metel, S. Grigoriev, Y. Melnik // Japanese Journal of Applied Physics. – 2011. - V. 50. - № 8.
7. Grigoriev, S.N. Cutting tools made of layered composite ceramics with nano-scale multilayered coatings / S.N. Grigoriev, A.A. Vereschaka, A.S. Vereschaka, A.A. Kutin // Procedia CIRP. – 2012. - P. 318 – 323.
8. Genzel, Ch. Adv. X-ray Anal / Ch. Genzel. – 2001. - P. 247.
9. Fox-Robinovich, G.S. Surf. Coat. Technol / G.S. Fox-Robinovich, A. Kovalev, M.H. Aguirre. – 2009. - P. 489.
10. Metel, A.S. Glow discharge with electrostatic confinement of electrons in a chamber bombardment by fast electrons / A.S. Metel, C.N. Grigoriev, Yu.A. Melnik // Plasma physics reports. – 2011. - Vol.37. - № 7. – P. 628.
11. Vereshchaka, A.S. Development of the method of obtaining nanostructured functional coatings / A.S. Vereshchaka, B. Karpuschewski, L. Dubner // Proceedings of the Intern.Scient.Conf. «Production.Technology». – 2008. - V.1. – P. 62.

Материал поступил в редколлегию 18.07.14.