

УДК 621.793.182

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НИТРИДА ВАНАДИЯ

Хабарова А.В.<sup>1</sup>, Кузнецова Т.А.<sup>1,2</sup>, Лапицкая В.А.<sup>1,2</sup>, Куприн А.С.<sup>3</sup>, Чижик С.А.<sup>1,2</sup>, Трухан Р.Э.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>ННЦ Харьковский физико-технический институт НАН Украины  
Харьков, Украина

Упрочняющие покрытия являются последние десятилетия неотъемлемой частью техники и применяются для защиты поверхностей деталей в самых различных областях. Перспективность применения нитридных, карбидных, карбонитридных, оксикарбонитридных покрытий на основе металлов IV–VI подгрупп Периодической системы элементов в качестве износостойких слоев определяется высокой твердостью при повышенных температурах, химической инертностью, жаро- и коррозионностойкостью. Наиболее часто используемыми в промышленности и наиболее исследованными являются нитриды титана, хрома и TiAlN. Одним из недостатков этих покрытий является достаточно высокий коэффициент трения, что вызывает их преждевременный износ. Одним из путей решения этой проблемы является легирования нитридных покрытий элементами, не образуют устойчивых оксидов (V, Mo, W). Неустойчивые оксиды образуют так называемые фазы Магнели (упорядоченные плоскости кристаллографического сдвига), которые выступают в качестве аналога твердой смазки.

Синтез и свойства магнетронных покрытий системы VN достаточно подробно изучены в работах [1–3]. Однако в патентной и научно-технической литературе отсутствуют сведения о комплексном анализе свойств вакуумно-дуговых нитридных и оксинитридных покрытий на основе переходных металлов (V, Nb, Zr), учитывающие локальные физико-механические свойства.

Целью выполнения работы является подбор оптимальных параметров нанесения износостойких покрытий нитрида ванадия вакуумно-дуговым осаждением для усовершенствования механических свойств покрытий.

Уникальные возможности вакуумно-дугового осаждения обусловлены особенностями используемой в нем вакуумной дуги как основного технологического инструмента. Разряд в парах металла, из которого изготовлен катод, генерирует потоки высокоионизованной плазмы с энергией ионов в десятки электронвольт. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность синтезировать покрытия с заданными физико-механическими, химическими и эксплуатационными характеристиками. Применение технологии вакуумно-дугового осаждения позволит

сформировать соединения VN широкого стехиометрического состава и наноразмерного масштаба. Это позволит получить покрытия с поверхностным слоем, состоящим из различных оксидных, нитридных, оксинитридных наноразмерных фаз, в том числе и фаз Магнели. Используемый подход даст более широкие возможности для изменения свойств поверхности под воздействием температуры при эксплуатации.

Износостойкие покрытия VN были сформированы и нанесены методом вакуумно-дугового осаждения в системе Булат 3-Т на подложки из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 32 мм. Химический состав подложки: С – 0,9 %, W – 6,4 %, Mo – 5%, V – 1,9 %, Cr – 4,2 %, Mn – 0,3 %, Si – 0,4 %, Fe – 80,9 %. Подложки полировали до Ra = 0,02 мкм, химически обезжировали и в течение 10 минут промывали в горячей щелочной ультразвуковой ванне. Затем сушили горячим воздухом. Диаметр чистых ванадиевых (99,99 %) катодов, расположенных на противоположных сторонах камеры, составлял 100 мм.

Подложку помещали во вращающийся держатель (30 об/мин) в вакуумной камере на расстоянии 30 см от источника дуги. Систему осаждения вакуумировали до давления  $2 \cdot 10^{-3}$  Па. Следующим этапом был дополнительный нагрев при ионной бомбардировке ионами аргона и ванадия в атмосфере чистого газообразного азота с давлением 0,5 Па. Ток дуги, отрицательное напряжение смещения подложки и время травления составляли: 90 А, –1 300 В и 3 мин соответственно. В начале осаждения тонкий слой ванадия (0,1 мкм) наносился в качестве адгезионного слоя при напряжении –100 В в течение 5 мин. Затем смесь технологических газов заменяли чистым азотом с контролируемым давлением: 0,001, 0,03, 0,07, 0,2, 0,5, 0,8, 1,5 и 3 Па. Покрытие VN наносилось с использованием тока дуги 90 А, отрицательного напряжения смещения подложки –100 В и времени осаждения 25 мин при температуре 400 °С. После чего образцы охлаждали до температуры около 100 °С.

Контроль механических свойств износостойких покрытий проводили путем внедрения алмазной пирамиды Берковича с непрерывной регистрацией деформационных кривых на наноинденторе модели 750 Ubi (Hysitron, США) в

режиме «10 с нагружение, 10 с разгрузку». В качестве параметров механических свойств покрытий определялись модуль упругости  $E$ , микротвердость  $H$ , упругая и пластическая составляющие деформации (%), индекс пластичности  $H/E$  и сопротивление пластической деформации  $H^3/E^2$ . Упругая и пластическая составляющие деформации были получены как отношение площади, ограниченной кривыми нагрузки и разгрузки, к полной работе индентирования. Данные получены на основе кривых наноиндентирования (рисунок 1).

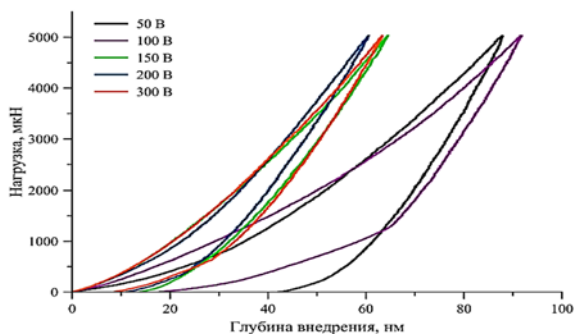


Рисунок 1 – Вид упругого восстановления для покрытий VN, полученных при различном отрицательном напряжении смещения на подложке

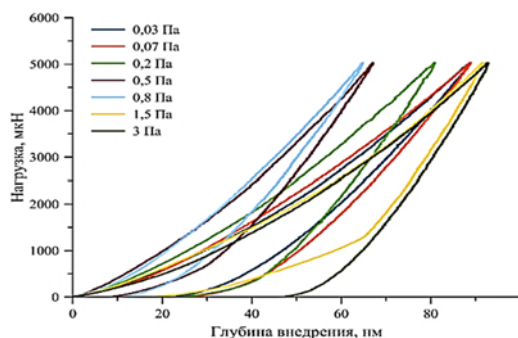


Рисунок 2 – Вид упругого восстановления для покрытий VN, полученных при различном давлении азота в камере

Износостойкое покрытие VN, полученное при параметрах  $P_{N_2} = 0,5$  Па и  $U = -100$  В, имеет самое высокое среди исследованных образцов значение микротвердости  $H = 41,42 \pm 6,17$  ГПа, индекс пластичности  $H/E = 0,107$  и сопротивление пластической деформации  $H^3/E^2 = 0,470$ , при толщине покрытия 3,7 мкм. Соотношение  $H/E$  характеризует устойчивость материала к упругой деформации. Более высокое значение соотношения  $H^3/E^2$  позволяет оценить способность мате-

риала рассеивать энергию при пластической деформации во время нагружения.

Следует отметить, что деформационное поведение покрытия VN, полученного при значении  $N_2 = 0,001$  Па, имеет высокое значение глубины внедрения и малые  $H/E = 0,021$  и  $H^3/E^2 = 0,0002$ , что соответствует вариантам покрытий с высоким показателем пластичности  $\eta_{\text{plast}} = 83,21 \pm 8,32$  %, но с малой прочностью  $H = 0,48 \pm 0,23$  ГПа и  $E = 22,58 \pm 25,71$  ГПа.

Оптимизация режимов нанесения выполнялась по комплексу механических свойств покрытий с элементами серого реляционного анализа. Помимо традиционной микротвердости в комплекс параметров для оценки режимов нанесения входили характеристики пластичности, которые позволяют снизить напряжения в покрытии и избежать катастрофического распространения трещин под воздействием нагрузки.

На основании полученных экспериментальных результатов механических свойств покрытий была проведена оптимизация режимов напыления (давления газа в камере  $P_{N_2}$ , величины напряжения смещения на подложке  $U$ ) по критерию: «чем выше  $E$ ,  $H$ ,  $H/E$ ,  $H^3/E^2$  и пластическое восстановление, тем лучше». Дополнительным критерием было выбрано: «чем меньше толщина покрытия, тем лучше».

Результаты расчетов показывают, что оптимальными режимами напыления покрытия является: давление азота в камере  $P_{N_2} = 0,5$  Па и напряжение смещения на подложке  $U = -100$  В. Толщина покрытия при этом составляет  $h = 3,7$  мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Т20УКА-030.

#### Литература

1. Fangfang Ge. Achieving very low wear rates in binary transition-metal nitrides: The case of magnetron sputtered dense and highly oriented VN coatings / Fangfang Ge, Ping Zhu, Fanping Meng, Qunji Xue, Feng Huang // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 248. – P. 81–90.
2. Voevodin A.A. Hard coatings with high temperature adaptive lubrication and contact thermal management: review / A.A.Voevodin, C.Muratore, S.M.Aouadi // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 257. – P. 247–265.
3. Franz R. Vanadium containing self-adaptive low-friction hard coatings for high-temperature applications: A review / R. Franz, Ch. Mitterer // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 228. – P. 1–13.