

УДК:669.295.539.121

## ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ПЕРИОДА МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ MoN/CrN НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

**В. А. Столбовой**

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина*

Поступила в редакцию 30.09.2016

В работе рассмотрено влияние периода слоев на увеличение микротвердости до 39 ГПа многослойного вакуумно-дугового покрытия MoN/CrN. Показано, что ионная очистка хромом и молибденом поверхности подложки приводит к образованию зоны взаимной диффузии, улучшающей адгезионные свойства. Многослойные MoN/CrN покрытия при осаждении на поверхность подложки с потенциалом  $-20$  В приводят к образованию нетекстурированного покрытия с коэффициентом трения около 0,15. Производственные испытания показали увеличение ресурса работы инструмента с вакуумно-дуговым покрытием MoN/CrN до 6 раз по сравнению с инструментом без покрытия.

**Ключевые слова:** многослойное покрытие MoN/CrN, наноструктура, содержание азота, микротвердость, давление рабочего газа, упрочнение поверхности режущего инструмента.

## ВПЛИВ ТОВЩИНИ ПЕРІОДУ БАГАТОШАРОВОГО ПОКРИТТЯ MoN/CrN НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

**В. О. Столбовий**

У роботі розглянуто вплив періоду шарів на збільшення микротвердості до 39 ГПа багат шарового вакуумно-дугового покриття MoN/CrN. Показано, що іонне очищення хромом і молибденом поверхні підкладки призводить до утворення зони взаємної дифузії, яка поліпшує адгезійні властивості. Багат шарові MoN/CrN покриття при осадженні на поверхню підкладки з потенціалом  $-20$  В призводять до утворення нетекстурованого покриття з коефіцієнтом тертя близько 0,15. Виробничі випробування показали збільшення ресурсу роботи інструменту з вакуумно-дуговым покриттям MoN/CrN до 6 разів у порівнянні з інструментом без покриття.

**Ключові слова:** багат шарове покриття MoN/CrN, наноструктура, вміст азоту, микротвердість, тиск робочого газу, зміцнення поверхні ріжучого інструменту.

## EFFECT OF THICKNESS OF PERIOD MULTILAYER COATINGS MoN/CrN ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

**V. A. Stolbovoy**

The paper considers the influence of the period of the layers to increase the micro-hardness up to 39 GPa multilayer vacuum arc coating MoN/CrN. It is shown that ion cleaning of chromium and molybdenum substrate leads to the formation of the interdiffusion zone improves adhesion properties. Multilayer MoN/CrN coating deposited on the substrate surface potential of  $-20$  V to result in formation of non-oriented coating with a friction coefficient of about 0.15. Production tests have shown an increase in tool life with vacuum arc coating MoN/CrN to 6 times compared with the uncoated tool.

**Keywords:** multi-layer coating MoN/CrN, nanostructure, nitrogen, micro-hardness, working gas pressure, hardening of the surface of the cutting tool.

### ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие промышленности диктует новые требования по упрочнению и снижению износа деталей машин, узлов агрегатов и инструмента. Наиболее перспективным и широко применимым методом упрочнения поверхности является нанесение вакуумно-дуговых покрытий нитридов тугоплавких металлов. Этот метод позволяет производить предварительную очистку и активацию

поверхности деталей в вакууме, что в дальнейшем приводит к хорошей адгезии между покрытием и упрочняемой деталью [1]. Эти нитридные покрытия достигают твердости 25–32 ГПа и обладают хорошими износостойкими свойствами при резании [2–5]. Но такая твердость приводит к повышению хрупкости материала покрытия, и зачастую эти покрытия не работоспособны при ударных и знакопеременных нагрузках.

Для снижения хрупкости в дуговых покрытиях применяется методика нанесения слоистых систем с чередованием твердого и мягкого слоя либо нитридных слоев различных элементов. Многослойные вакуумно-дуговые покрытия позволяют уменьшить величину внутренних напряжений и снизить хрупкость, но микротвердость при этом не снижается относительно монослойных нитридных покрытий, а зачастую и несколько увеличивается до 40 ГПа [6, 7]

Наиболее успешными нитридными материалами в покрытиях, напыляемых на режущий инструмент, являются нитриды молибдена и хрома. До недавнего времени [8–11] такие многослойные покрытия практически не изучались, но в отдельности нитриды хрома и молибдена достаточно широко используются в производстве [1, 12, 13]. Поэтому исследования влияния режимов нанесения MoN/CrN на изменение физико-механических свойств в этих покрытиях является востребованным.

#### МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ MoN/CrN ПОКРЫТИЙ

Вакуумно-дуговые многослойные MoN/CrN покрытия были нанесены в модифицированной установке «БУЛАТ-6», принципиальная схема которой показана на рис. 1. Образцы были расположены на металлическом плоском подложкодержателе, который находится на расстоянии 200 мм от испарителей хрома и молибдена.

В качестве образцов использовались полированные подложки из нержавеющей стали 12Х18Н9Т с размерами  $18 \times 18 \times 3$  мм, которые предварительно промывали щелочным раствором в ультразвуковой ванне и затем нефрасом С2-80/120. Вакуумную камеру откачивали до давления  $P = 0,3 \cdot 10^{-3}$  Па. и производили ионную очистку и активацию поверхности подложек бомбардировкой ионами металлов, подавая отрицательный потенциал  $-1300$  В на подложку. Ток дуги для молибдена составлял 120 А, а для хрома — 100 А. Процесс очистки производился 10–15 минут при непрерывном вращении подложкодержателя. После очистки в вакууме

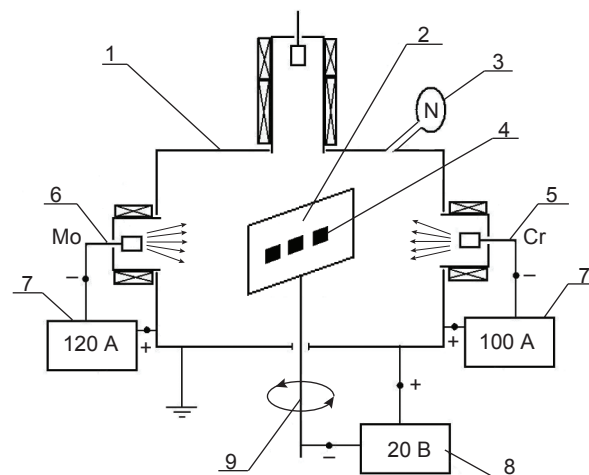


Рис. 1. 1 — вакуумная камера, 2 — металлический экран, 3 — натекагель азота, 4 — напыляемые образцы, 5 — испаритель хрома, 6 — испаритель молибдена, 7 — источники питания дуги, 8 — источник питания подложки, 9 — поворотный механизм

и разогрева образцов производили нанесение слоя чистого материала катода в течение 1 мин. Затем производили осаждение многослойных покрытий в течение 1 часа. Для этого экран располагали перпендикулярно плазменным потокам от катодов. Давление азота в вакуумной камере при осаждении покрытий составляло 0,4 Па. Токи дуги составляли 120 А для молибдена и 100 А для хрома. Отрицательный потенциал на подложке составлял 20 В. Скорость осаждения многослойных покрытий в среднем составляла 3 нм/с. Время напыления многослойных MoN/CrN покрытий составляло 1 час.

Для управления процессом нанесения многослойных покрытий использовали командо-контроллер [14]. Командо-контроллер одновременно включает оба испарителя, происходит осаждение с одной стороны экрана слоя MoN, а с другой стороны слоя CrN. Время напыления каждого слоя составляло 300 с, 150 с, 80 с, 40 с. После нанесения первого слоя оба испарителя выключаются, поворотный механизм разворачивает экран на  $180^\circ$ , и снова включаются оба испарителя. Такой режим осаждения продолжается в течение 1 часа.

Фазово-структурный анализ проводился методом рентгеновской дифрактометрии в излучении  $\text{Cu-K}\alpha$ . Разделение профилей на составляющие осуществлялось с использованием пакета программ «NewProfile». Элементный состав

исследовался энергодисперсионным методом на растровом электронном микроскопе FEI NovaNanoSEM 450. Твердость измерялась методом микроиндентирования с пирамидой Виккерса в качестве индентора при нагрузках 50 и 100 г. Исследование производилось на микротвердомере ДМ-8.

Фотографии поперечных срезов многослойных покрытий были получены на микроскопе Quanta 200 3D с использованием детектора вторичных электронов, который обладает наибольшим латеральным разрешением (до 3,5 нм). Съемка изображений проводилась в режиме высокого вакуума.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для улучшения адгезионных свойств между поверхностью подложки и напыляемым покрытием применяется ионная очистка, приводящая к образованию переходной зоны (рис. 2), показанной серым цветом на материале подложки. Т. к. очистка металлическими ионами происходит в высоком вакууме  $p = 0,001$  Па и при отрицательном потенциале на подложке 1300 В, это приводит к бомбардировке поверхности ионами Mo и Cr и, как следствие, к разогреву подложки и ее частичному распылению.

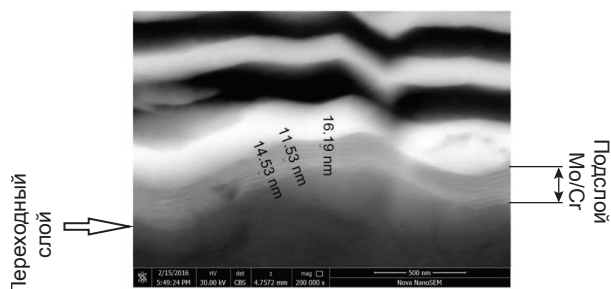


Рис. 2. Поперечный срез на границе подложка — многослойное покрытие

Однако небольшое количество материала катода все же осаждается на поверхности подложки и может диффундировать на небольшую глубину материала, таким образом происходит формирование переходного слоя между покрытием и подложкой (рис. 2).

Выше над переходным слоем указан подслои чистого хрома и молибдена с взаимным перемешиванием. Толщина слоев составляет 14–16 нм для Mo и 10–12 нм для Cr. Столь малая толщина слоев связана с тем, что после очистки на прямом пучке осажается

небольшой слой при непрерывном испарении катодов с непрерывно вращающимся подложкодержателем (рис. 2).

Управление условиями нанесения толщинами нитридных слоев в многослойном покрытии MoN/CrN приводит и к изменению механических характеристик. При нанесении относительно толстых периодов  $h \approx 2,5$  мкм в многослойном покрытии MoN/CrN формируются слои с разными толщинами рис. 3 (а, б) при интервале осаждения 300 с.

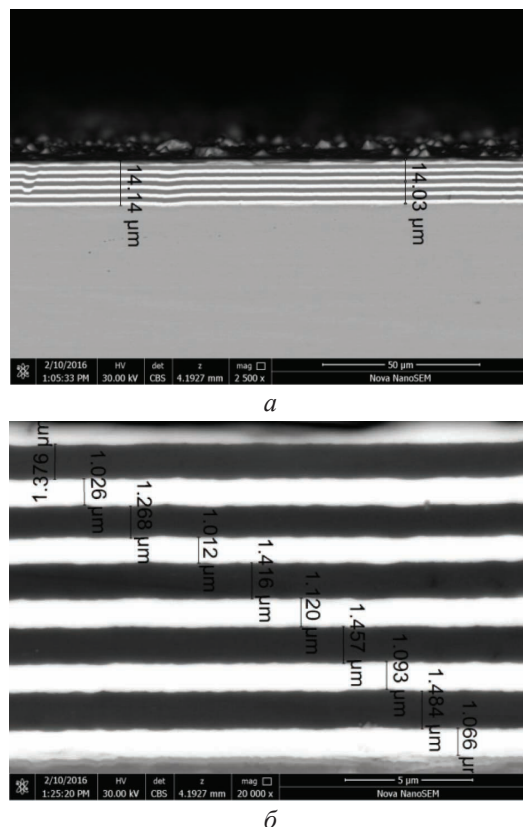


Рис. 3. Вакуумно-дуговое многослойное (11 слоев) MoN/CrN покрытие с интервалом 300 с

Общая толщина покрытия (рис. 3а) составляет приблизительно 14,1 мкм. Неточность связана с толщиной переходной зоны между покрытием и подложкой и неровностью за счет капельной фазы на поверхности покрытий. Черные слои на рис. 3 это слои MoN, а светлые — CrN. Толщина MoN несколько выше, чем CrN. Это связано с тем, что скорости осаждения разные (для хрома 3 нм/с, для молибдена 4,5 нм/с). Микротвердость такого покрытия составляет  $H = 26$  ГПа. Эта микротвердость соответствует микротвердости для однослойных покрытий на основе хрома.

Уменьшение толщины периода  $h \approx 1$  мкм приводит и к существенному уменьшению



общей толщины покрытия до 13,3 мкм, рис. 4 (а, б). Это связано с увеличением количества срабатываний поворотного механизма при отключении испарителей Mo и Cr. Микротвердость покрытия возрастает до  $H = 28$  ГПа.

При большем увеличении (рис. 4в) в многослойном покрытии видны четкие границы слоев и не заметно взаимное перемешивание. Капельная фаза, присутствующая внутри

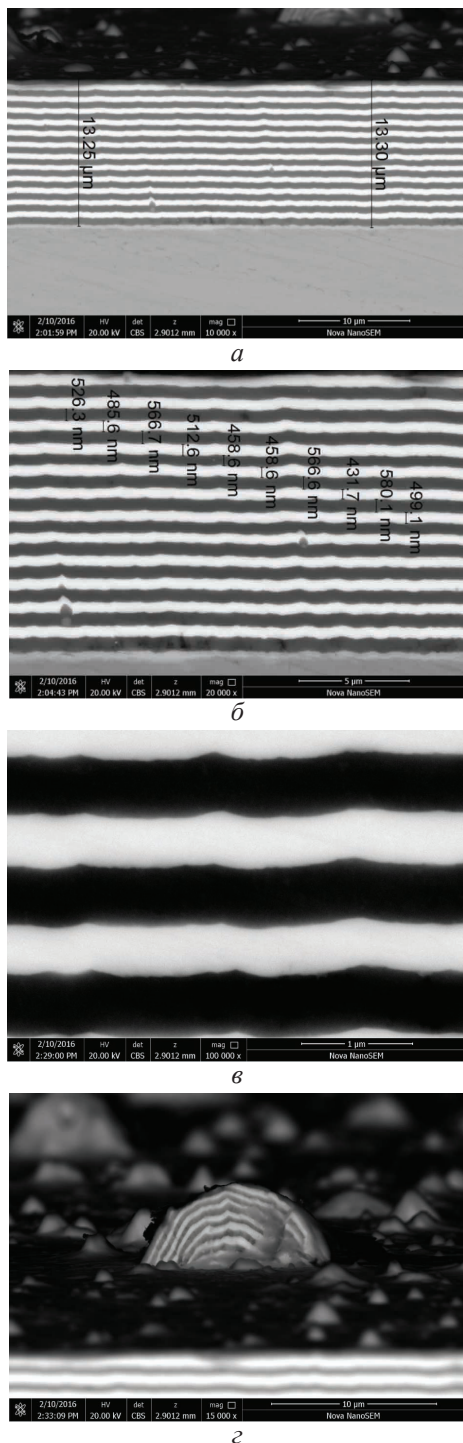


Рис. 4. Вакуумно-дуговое многослойное (24 слоя) MoN/CrN покрытие с интервалом 150 с

слоев, приводит к смещению и неровностям следующего слоя, но через 1–3 слоя искажения в слоях исчезают. Однако если капли достаточно большие и расположены на поверхности (рис. 4з), то количество слоев, необходимое для выравнивания слоев, увеличивается.

На (рис. 5а, б, в) показана общая толщина покрытия, нанесенного при интервале осаждения 80 с. Общая толщина при таком режиме осаждения за 1 час уменьшается до 12,2 мкм (рис. 5а). Толщина периода составляет 526 нм, и, как видно из рис. 4б, слои MoN так же больше, чем CrN.

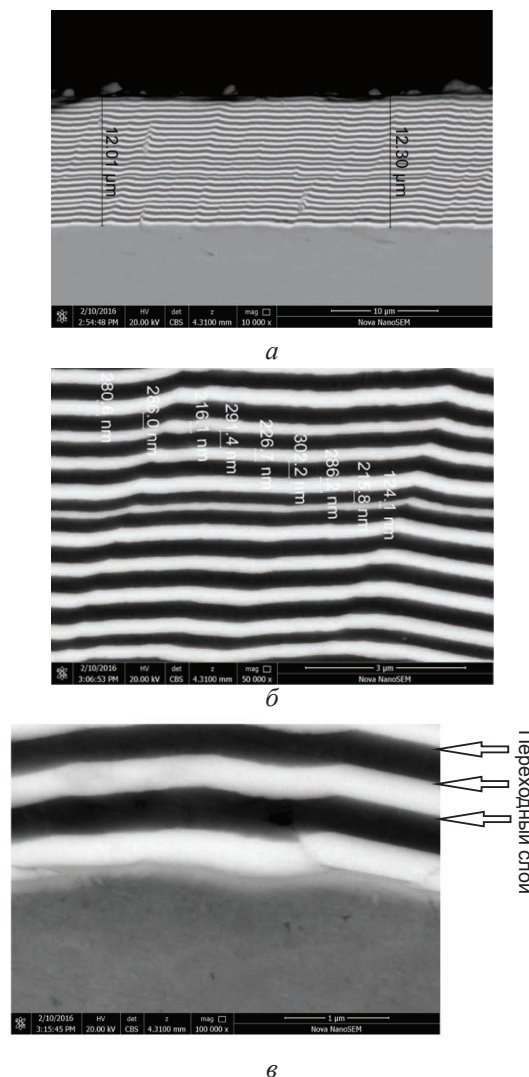


Рис. 5. Вакуумно-дуговое многослойное (44 слоя) MoN/CrN покрытие с интервалом 80 с

Слоистая структура полностью повторяет рельеф поверхности материала подложки, но через определенное количество периодов покрытие и слои, в частности, становятся более ровными. При большем увеличении

(рис. 5в) замечена взаимная диффузия и образование переходных слоев на границах разных элементов покрытия MoN и CrN. Такие изменения в структуре покрытия приводят к увеличению микротвердости до  $H = 30$  ГПа.

Снижение интервала напыления до 40 секунд на один слой приводит к уменьшению общей толщины покрытия до 11,7 мкм (рис. 6а). Снижение периода слоев до 273 нм приводит к увеличению размытости на границах слоев (рис. 6в) и увеличению микротвердости до  $H = 32$  ГПа.

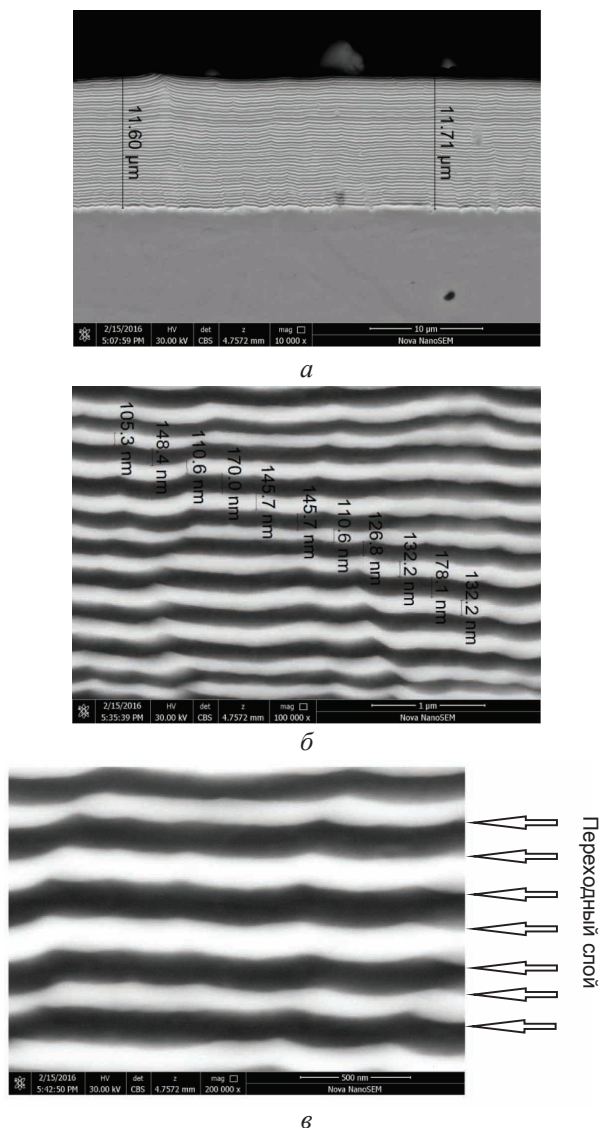


Рис. 6. Вакуумно-дуговое многослойное (88 слоев) MoN/CrN покрытие с интервалом 40 с

Дальнейшее уменьшение толщины периода до  $h = 25$  нм и меньше в многослойном покрытии MoN/CrN приводит к существенному увеличению микротвердости до  $H = 39$  ГПа и уменьшению дифракционных пиков рис. 7.

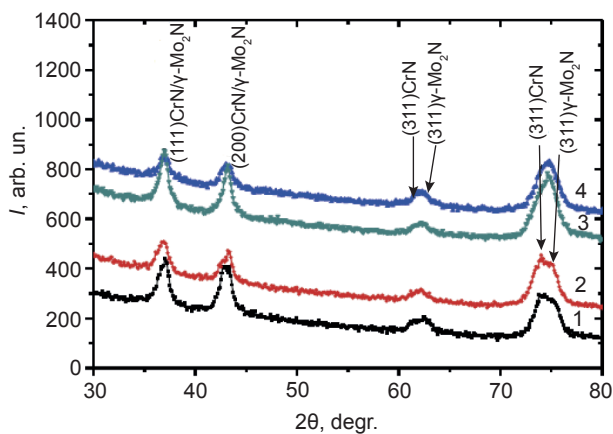


Рис. 7. Участки дифракционных спектров покрытий, полученных при отрицательном потенциале на подложке 20 В и давлении азота 0,4 Па при разной толщине слоев: 1 — 300 нм, 2 — 70 нм, 3 — 20 нм, 4 — 12 нм [9]

Осаждение многослойных покрытий с небольшим отрицательным потенциалом на подложке 20 В приводит к формированию одинакового типа кристаллической решетки структурного типа B1 (ГЦК типа NaCl). Преимущественная ориентация роста кристаллитов с осью [311], перпендикулярной плоскости роста, связана с относительным усилением интенсивности соответствующего рефлекса. При этом в слоях CrN такой тип текстуры более выраженный. Содержание азота в покрытии составляет порядка 19 ат. % [8].

Увеличение микротвердости при уменьшении периода слоев в многослойном вакуумно-дуговом покрытии полностью согласуется с моделями и теориями, выдвинутыми J. S. Koehler [15], в которых показано, что улучшение механических свойств многослойных покрытий при уменьшении каждого из слоев до уровня 1–20 нм связано с переходом в нанометровую область толщин чередующихся слоёв, что, в свою очередь, подавляет формирование дислокаций, а разница в модулях упругости разных элементов соседних слоёв подавляет мобильность дислокаций. Veprek S. несколько дополнил эффекты упрочнения таких многослойных структур и связал их со следствием бомбардировки энергичными ионами в процессе осаждения слоёв при отрицательном напряжении смещения на образце, приводящем к уплотнению границ слоёв и повышению остаточных напряжений [16, 17].

Создание многослойных покрытий с нанометровым периодом слоев приводит к улучшению прочностных характеристик самого покрытия. На рис. 8 показаны возможные механизмы, влияющие на прочность покрытия. В первую очередь возникшая трещина расщепляется на границах зерен и, как следствие, происходит смещение трещины в переходном слое на границах разных слоев. В переходном слое происходит снижение внутренних напряжений покрытия, а если толщина периода слоя десятки нанометров, то может возникнуть так называемая нанопластичность, описанная Н. Hollek в [18, 19].



Рис. 9. Конусная фреза с многослойным вакуумно-дуговым покрытием MoN/CrN

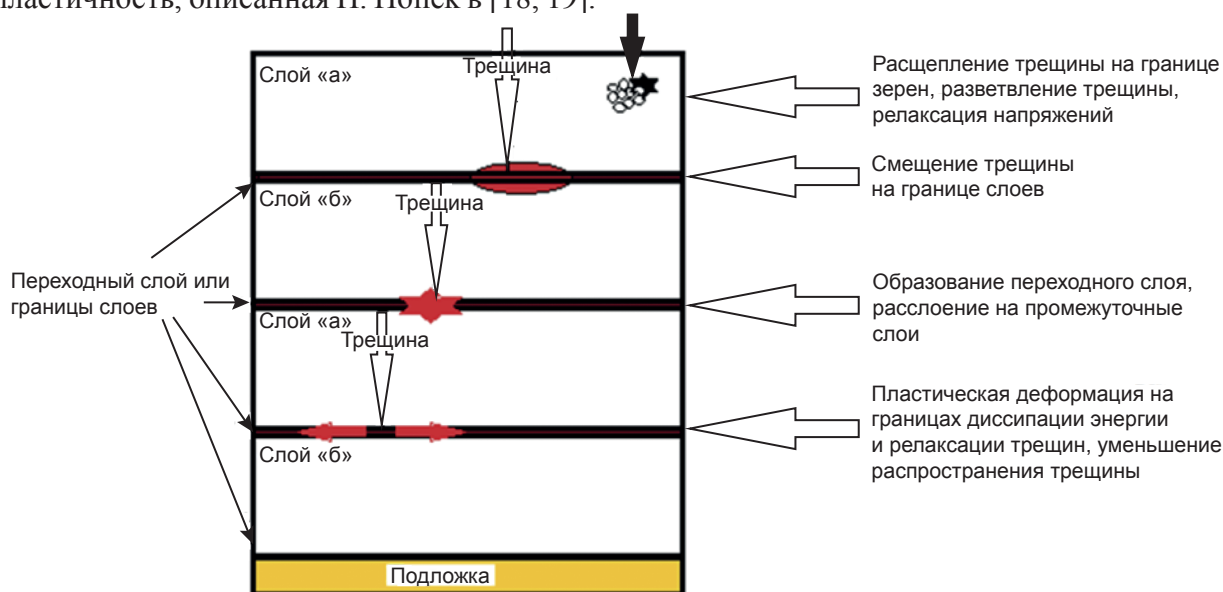


Рис. 8. Механизмы повышения прочности в многослойных нитридных покрытиях

Наибольшая микротвердость при наименьших толщинах периода слоя позволяет использовать такое покрытие для упрочнения поверхности инструмента, работающего по труднообрабатываемым материалам, а небольшой коэффициент трения около 0,15 [8] позволяет снизить наволакивание и прилипание металла к режущей поверхности инструмента. В частности, на рис. 9, показаны конусные фрезы (торец  $\varnothing 3,0$  и  $\varnothing 3,4$  мм) из твердого сплава (YL10,2) с многослойным MoN/CrN покрытием и наименьшими периодом слоев 10–20 нм.

Работоспособность фрезы с многослойным покрытием MoN/CrN при обработке деталей из легированной конструкционной стали 18ХГТ (HRC 20–22) увеличивается до 1200 деталей по сравнению с 200 деталями при работе фрезы без покрытия.

## ВЫВОДЫ

1. Используемая в работе методика ионной очистки упрочняемых деталей приводит к внедрению атомов хрома и молибдена в материал подложки и образованию зоны взаимной диффузии, улучшающей адгезионные свойства.

2. Уменьшение периода слоев в многослойном вакуумно-дуговом MoN/CrN покрытии приводит к увеличению микротвердости до 39 ГПа, однако коэффициент трения практически не изменяется и составляет около 0,15.

3. В многослойных вакуумно-дуговых покрытиях MoN/CrN с толщиной периода слоя от 600 нм и ниже обнаруживается в промежутках между слоями переходная зона; показано ее влияние на прочностные характеристики самого покрытия.



4. Такая методика подготовки поверхности и нанесения многослойного покрытия дала возможность решить проблему увеличения ресурса работы твердосплавного инструмента до 6 раз.

Автор выражает благодарность доктору технических наук, старшему научному сотруднику Бересневу Вячеславу Мартыновичу.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев А. А., Саблев Л. П., Григорьев С. Н. Вакуумно-дуговые покрытия. — Харьков: ННЦ ХФТИ, 2010 — 318 с.
2. Андреев А. А., Соболев О. В., Горбань В. Ф., Столбовой В. А., Сердюк И. В. Влияние режимов вакуумно-дугового осаждения в среде азота на фазовый состав, субструктурные характеристики и механические свойства нанокристаллических покрытий системы Mo-N // Физическая инженерия поверхности. — 2010, Т. 8, № 3–4. — С. 179–183.
3. Андреев А. А., Соболев О. В., Горбань В. Ф., Столбовой В. А., Сердюк И. В. Получение вакуумно-дуговых высокотвердых Mo-N покрытий // Физическая инженерия поверхности. — 2011. — Т. 9, № 1. — С. 4–9.
4. Соболев О. В., Андреев А. А., Столбовой В. А., Фильчиков В. Е. О возможности управления фазово-структурным и напряженным состояниями вакуумно-дуговых наноструктурных покрытий системы Mo-N путем подачи потенциала смещения на подложку в процессе осаждения // Письма в ЖТФ. — 2012. — Т. 38, № 4. — С. 26–33.
5. Соболев О. В., Андреев А. А., Столбовой В. А., Пинчук Н. В., Мейлехов А. А. Закономерности формирования структуры покрытий CrN, полученных вакуумно-дуговым испарением в атмосфере азота // Журнал нано- та электронной физики. — 2015. — Т. 7, № 1.
6. Соболев О. В., Андреев А. А., Григорьев С. Н., Горбань В. Ф., Столбовой В. А., Сердюк И. В., Фильчиков В. А. Закономерности структурообразования при вакуумно-дуговом осаждении многослойных наноструктурных TiN-MoN покрытий // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2011. — № 6/5 (50). — С. 4–9.
7. Pogrebnyak A. D., Bondar O. V., Erdybaeva N. K., Plotnikov S. V., Turbin P. V., Grankin S. S., Stolbovoy V. A., Sobol O. V., Kolesnikov D. A., Kozak S. Influence of thermal annealing and deposition conditions on structure and physical-mechanical properties of multilayered nanosized TiN/ZrN coatings // Przegląd elektrotechniczny. — 2015. — Vol. 2015, No. 12. — P. 228–233.
8. Береснев В. М., Соболев О. В., Погребняк А. Д., Гранкин С. С., Столбовой В. А., Турбин П. В., Мейлехов А. А., Арсенок М. Ю. Структурная инженерия вакуумно-дуговых покрытий системы MoN-CrN // Письма в ЖТФ. — 2016. — Т. 42, вып. 10. — С. 70–77.
9. Береснев В. М., Соболев О. В., Столбовой В. А., Литовченко С. В., Колесников Д. А., Немченко У. С., Мейлехов А. А., Постельник А. А. Влияние на механические характеристики толщины слоев в многослойных покрытиях MoN/CrN, осаждаемых под действием отрицательного потенциала смещения // Журнал нано- та электронной физики. — 2016. — Т. 8, № 1. — P. 01043 (5 с).
10. Гранкин С. С., Береснев В. М., Соболев О. В., Литовченко С. В., Столбовой В. А., Колесников Д. А., Мейлехов А. А., Постельник А. А., Торьяник И. Н. Влияние высоковольтного постоянного потенциала смещения на структуру и свойства многослойного композиционного материала MoN/CrN с разной толщиной слоев // ВАНТ. — 2016. — № 1(101). — С. 154–159.
11. Beresnev V. M., Klimenko S. A., Sobol' O. V., Grankin S. S., Stolbovoi V. A., Turbin P. V., Novikov V. V., Meilekhov A. A., Litovchenko S. V., Malikova L. V. Effect of the deposition parameters on the phase-structure state, hardness, and tribological characteristics of Mo<sub>2</sub>N/CrN vacuum-arc multilayer coatings // Journal of Superhard Materials. — 2016. — Vol. 38, Issue 2. — P. 114–122.
12. Аксенов И. И., Аксенов Д. С., Андреев А. А., Белоус В. А., Соболев О. В. Вакуумно-дуговые покрытия технологи, материалы, структура, свойства. — Харьков: ННЦ ХФТИ, 2015. — 379 с.
13. Аксенов И. И., Андреев А. А., Белоус В. А., Стрельницкий В. Е., Хороших В. М. Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение

- покрытий, поверхностное модифицирование ННЦ ХФТИ. — Киев: Наукова думка, 2012. — 727 с.
14. Руденко В. П., Столбовой В. А., Сердюк И. В., Карتماзов К. Г. Система управления нанесением сверхтвердых нанослойных вакуумно-дуговых покрытий // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2010. — Т. 6/1(48). — С. 66–69.
  15. Koehler J. S. Attempt to design a strong solid // *Phys. Rev. B*, 2. — 1970. — P. 547–551.
  16. Veprek S., Reiprich S. A concept for the design of novel superhard coatings // *TSF*. — 1995. — Vol. 268. — P. 64–71.
  17. Nanostructured Coatings for High Performance Tools // *Werkzeug Technik*, 2003. — Vol. 77.
  18. Hollek H., Schulz H. Advanced layer material constitution // *TSF*. — 1987. — Vol. 153. — P. 11–17.
  19. Hollek H., Shier V. Multilayer PVD coatings for wear protection // *SCT*. — 1995. — Vol. 76–77. — P. 328–336.
- #### LITERATURA
1. Andreev A. A., Sablev L. P., Grigor'ev S. N. Vakuumno-dugovye pokrytiya. — Har'kov: NNC HFTI, 2010 — 318 p.
  2. Andreev A. A., Sobol' O. V., Gorban' V. F., Stolbovoj V. A., Serdyuk I. V. Vliyanie rezhimov vakuumno-dugovogo osazhdeniya v srede azota na fazovyy sostav, substrukturnye harakteristiki i mehanicheskie svojstva nanokristallicheskih pokrytij sistemy Mo-N // *Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti*. — 2010. — Vol. 8, No. 3–4. — P. 179–183.
  3. Andreev A. A., Sobol' O. V., Gorban' V. F., Stolbovoj V. A., Serdyuk I. V. Poluchenie vakuumno-dugovykh vysokotverdykh Mo-N pokrytij // *Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti*. — 2011. — Vol. 9, No. 1. — P. 4–9.
  4. Sobol' O. V., Andreev A. A., Stolbovoj V. A., Fil'chikov V. E. O vozmozhnosti upravleniya fazovo-strukturnym i napryazhennym sostoyaniyami vakuumno-dugovykh nanostrukturnykh pokrytij sistemy Mo-N putem podachi potenciala smescheniya na podlozhku v processe osazhdeniya // *Pis'ma v ZhTF*. — 2012. — Vol. 38, No. 4. — P. 26–33.
  5. Sobol' O. V., Andreev A. A., Stolbovoj V. A., Pinchuk N. V., Mejlehov A. A. Zakonomernosti formirovaniya struktury pokrytij CrN, poluchennykh vakuumno-dugovym ispareniem v atmosfere azota // *Zhurnal nano- ta elektronnoï fiziki*. — 2015. — Vol. 7, No. 1.
  6. Sobol' O. V., Andreev A. A., Grigor'ev S. N., Gorban' V. F., Stolbovoj V. A., Serdyuk I. V., Fil'chikov V. A. Zakonomernosti strukturoobrazovaniya pri vakuumno-dugovom osazhdenii mnogoslujnykh nanostrukturnykh TiN-MoN pokrytij // *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovykh tehnologij*. — 2011. — No. 6/5 (50). — P. 4–9.
  7. Pogrebnyak A. D., Bondar O. V., Erdybaeva N. K., Plotnikov S. V., Turbin P. V., Grankin S. S., Stolbovoj V. A., Sobol' O. V., Kolesnikov D. A., Kozak C. Influence of thermal annealing and deposition conditions on structure and physical-mechanical properties of multilayered nanosized TiN/ZrN coatings // *Przeglad elektrotechniczny* — 2015. — Vol. 2015, No. 12. — P. 228–233.
  8. Beresnev V. M., Sobol' O. V., Pogrebnyak A. D., Grankin S. S., Stolbovoj V. A., Turbin P. V., Mejlehov A. A., Arsenko M. Yu. Strukturnaya inzheneriya vakuumno-dugovykh pokrytij sistemy MoN-CrN // *Pis'ma v ZhTF*. — 2016. — Vol. 42, vyp. 10. — P. 70–77.
  9. Beresnev V. M., Sobol' O. V., Stolbovoj V. A., Litovchenko S. V., Kolesnikov D. A., Nemchenko U. S., Mejlehov A. A., Postel'nik A. A. Vliyanie na mehanicheskie harakteristiki tolschiny sloev v mnogoslujnykh pokrytijah MoN/CrN, osazhdaemykh pod dejstviem otricatel'nogo potenciala smescheniya // *Zhurnal nano- ta elektronnoï fiziki*. — 2016. — Vol. 8, No. 1. — P. 01043 (5 p).
  10. Grankin S. S., Beresnev V. M., Sobol' O. V., Litovchenko S. V., Stolbovoj V. A., Kolesnikov D. A., Mejlehov A. A., Postel'nik A. A., Toryanik I. N. Vliyanie vysokovol'tnogo postoyannogo potenciala smescheniya na strukturu i svojstva mnogoslujnogo kompozicionnogo materiala MoN/CrN s raznoj tolschinoj sloev // *VANT*. — 2016. — No. 1(101). — P. 154–159.
  11. Beresnev V. M., Klimentenko S. A., Sobol' O. V., Grankin S. S., Stolbovoj V. A., Turbin P. V., Novikov V. V., Meilekhov A. A., Litovchenko S. V., Malikova L. V. Effect of the deposition parameters on the phase-structure state, hardness, and tribological characteristics



- of Mo<sub>2</sub>N/CrN vacuum-arc multilayer coatings. // *Journal of Superhard Materials*. — 2016. — Vol. 38, Issue 2. — P. 114–122.
12. Aksenov I. I., Aksenov D. S., Andreev A. A., Belous V. A., Sobol' O. V. Vakuumno-dugovye pokrytiya tehnologi, materialy, struktura, svojstva. — Har'kov: NNC HFTI, 2015. — 379 p.
  13. Aksenov I. I., Andreev A. A., Belous V. A., Strel'nickij V. E., Horoshih V. M. Vakuumnaya duga: istochniki plazmy, osazhdenie pokritij, poverhnostnoe modifitsirovanie NNC HFTI. — Kiev: Naukova dumka, 2012. — 727 p.
  14. Rudenko V. P., Stolbovoj V. A., Serdyuk I. V., Kartmazov K. G. Sistema upravleniya naneseniem sverhtverdyh nanoslojnyh vakuumno-dugovyh pokrytij // *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*. — 2010. — Vol. 6/1(48). — P. 66–69.
  15. Koehler J. S. Attempt to design a strong solid // *Phys. Rev. B*, 2. — 1970. — P. 547–551.
  16. Veprek S., Reiprich S. A concept for the design of novel superhard coatings // *TSF*. — 1995. — Vol. 268. — P. 64–71.
  17. Nanostructured Coatings for High Performance Tools // *Werkzeug Technik*, 2003. — Vol. 77.
  18. Hollek H., Schulz H. Advanced layer material constitution // *TSF*. — 1987. — Vol. 153. — P. 11–17.
  19. Hollek H., Shier V. Multilayer PVD coatings for wear protection // *SCT*. — 1995. — Vol. 76–77. — P. 328–336.