

ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИЙ CrN – (Cr,Al)N ИЗ СЕПАРИРОВАННЫХ ПОКОТКОВ КАТОДНО-ДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ

¹С.Д. Латушкина, ¹О.И.Посылкина, ²Д.С.Карпович, ¹И.М.Романов,
¹В.М.Комаровская, ¹С.К. Ших, ¹В.А. Шкробот

¹Физико-технический институт НАН Беларуси,
²Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Беларусь

Приведены результаты исследования структуры многослойных покрытий CrN – (Cr,Al)N, сформированных из сепарированной катодно-дуговой плазмы. На основе математического моделирования взаимосвязи между толщиной многослойного покрытия CrN – (Cr,Al)N, его отдельными слоями и физико-механическими свойствами установлена оптимальная толщина покрытия CrN – (Cr,Al)N и его отдельных слоев CrN, (Cr,Al)N, что обеспечивает их высокую адгезионную прочность с основой и микротвердость до 38 ГПа.

Ключевые слова: многослойные покрытия, микротвердость, адгезионное разрушение

FORMATION OF MULTILAYER CrN – (Cr,Al)N COMPOSITIONS FROM THE SEPARATED WAYS OF THE CATHODE-ARC PLASMA

¹S.D. Latushkina, ¹O.I. Posylkina, ²D.S. Karpovich, ¹I.M. Romanov,
¹V.M. Komarovskaya, ¹S.K. Shih, ¹V.A. Shkrobot

¹Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
²Belarusian State Technological University,
Minsk, Republic of Belarus

The results of studying the structure of CrN – (Cr,Al)N multilayer coatings formed from a separated cathode-arc plasma are presented. Based on mathematical modeling of the relationship between the thickness of the CrN/ Cr – Al – N multilayer coating, its individual layers and physicomechanical properties, the optimum thickness of the CrN / (Cr,Al)N coating and its individual CrN, (Cr,Al)N layers has been established, which ensures their high adhesive strength and microhardness up to 38 GPa.

Keywords: multilayer coatings, microhardness, adhesive failure

Высокоскоростные режимы резания в современном производстве требуют применения высоконадежного режущего инструмента, исключая простои станоч-

ного оборудования и повышенный расход дорогостоящих инструментальных материалов. Наиболее эффективным способом формирования требуемых свойств приповерхностных слоев инструментального материала без изменения заданных значений свойств, проявляющихся в геометрическом теле инструмента, является нанесение износостойких покрытий [1–4].

Для повышения эксплуатационных свойств инструмента необходимо совершенствование технологий нанесения износостойких покрытий и подбор требуемых свойств и химического состава покрытия для конкретной области применения. Развитие нанотехнологий открывает возможность нанесения сложных многослойных нанокompозитных покрытий, механические и адгезионные свойства которых существенно лучше применяемых ранее (однослойные многофазные покрытия (Ti,N), (Ti, C), (Cr,N), (Zr,N)), что требует дальнейшего изучения данного вопроса. Универсальные с точки зрения получения многослойных и композиционных нанопокpытий на основе нитридов, карбидов, карбонитридов, оксидов и других соединений методы физического осаждения, позволяют реализовать процессы нанесения при температурах 25–800 °С, обеспечивая возможность их применения как для твердых сплавов, так и для быстрорежущих сталей. PVD-покрытия позволяют получить сверхвысокую твердость при высокой вязкости; повышенную стойкость к пластическим деформациям и температурную стойкость, и в тоже время по мере повышения скорости резания и, соответственно, температуры в зоне резания значительно меньше теряют в твердости, чем покрытия, осаждаемые другими методами.

Твердосплавные пластины с вакуумно-плазменными PVD-покрытиями имеют ряд преимуществ. Максимальные прочностные характеристики, определяются как характером формируемой связи между покрытием и основой, так и благоприятным влиянием ионной бомбардировки на поверхностную структуру и дефекты твердого сплава. Особенно наглядно данное преимущество проявляется при прерывистом резании, а также при черновой обработке в тяжелых условиях (наличие корки, колебание припусков, нежесткость технологической системы и т.д.).

Основным недостатком вакуумно-плазменных покрытий является их столбчатая структура, которая обусловлена преимущественным ростом зерен в направлении по нормали к поверхности. К тому же осаждение покрытий происходит при температуре ~ 400–500 °С и после его охлаждения до комнатной температуры наибольшие механические напряжения концентрируются на границах зерен, увеличиваясь с ростом размера зерна. За счет уменьшения энергии химической связи между атомами различных зерен ухудшается прочность сцепления зерен друг с другом, что является причиной формирования пор в покрытии, а также повышения химической активности межзеренных границ, что оказывает негативное влияние на износостойкость покрытий [5].

В последнее время находят все большее применение многослойные покрытия, так как они повышают такие важные свойства инструментального материала как твердость, теплостойкость, износостойкость, физико-химическую пассивность по отношению к обрабатываемому материалу и, кроме того, способны хорошо сопротивляться хрупкому разрушению в условиях развития трещин или при сильных пластических деформациях режущей части. Для изделий, работающих в условиях повышенного износа и циклических термомеханических напряжений, многослойные покрытия в отличие от однослойных, способны удовлетворить ряду противоречивых требований к поверхностным (высокая твердость, износостойкость и антифрикционные свойства) и объемным (высокие прочность, ударная вязкость) свойствам конструкционных материалов. Структурные параметры и механические свойства многослойных покрытий во многом определяются их конструкцией: толщинами отдельных слоев и толщиной покрытия в целом [6, 7].

Полученные ранее результаты о влиянии элементного состава на структуру и особенности фазообразования, механические свойства многокомпонентных покрытий (Cr,Al)N позволили сделать предположение, что осаждение двухслойных покрытий CrN – (Cr,Al)N обеспечит повышение эксплуатационных свойств изделий из твердых сплавов [8, 9].

В работе исследовано влияние архитектуры многослойного покрытия, состоящего из слоя соединения хрома (CrN) и слоя на основе системы Cr – Al – N, на их структуру и механические свойства.

Методика эксперимента

Для получения покрытий на твердосплавных пластинах использовалась установка для нанесения упрочняющих покрытий 01ИИ-6–008, оснащенная сепаратором капельной фазы. Для формирования слоев использовалось распыление двух катодов (хрома и алюминия) при парциальном давлении азота в вакуумной камере $3,0 \cdot 10^{-2}$ Па при токах дугового разряда на испарителях: $I_{Cr} = 70$ А, $I_{Al} = 60$ А. Общая толщина покрытия варьировалась от 1 до 4 мкм, толщина слоев – от 0,2 до 2,5 мкм.

Рентгеноструктурный анализ покрытий проводился с помощью дифрактометра ДРОН-3М в интервале углов $30-120^\circ$ в фильтрованном Cu-K α -излучении. Морфология поверхности и структура пленок исследовалась на растровом электронном микроскопе РЭМ S-4800 Hitachi. Испытания на микротвердость (ГОСТ 9450–76) проводили на микротвердомере DURAMIN 5 при нагрузке до 25 г по пяти отпечаткам со свободным выбором места укола. Время нагружения индентора (пирамиды Виккерса) составляло 10 с. Адгезионная прочность определялась скретч-тестером JLST022 (J&L Tech). Для измерения адгезионной прочности покрытий на поверхность алмазным сферическим индентором типа «Роквелл С» с радиусом закругления 200 мкм наносились царапины при непрерывно нарастающей нагрузке до 80 Н и осуществлялась регистрация физических параметров: акустической эмиссии и коэффициента трения. Момент адгезионного и когезионного разрушения фиксировался после испытаний с помощью оптического микроскопа, а также по изменению кривых зависимости коэффициента трения и акустической эмиссии: $Lc1$ – момент появления первой трещины; $Lc2$ – отслаивание участка покрытия (адгезионное разрушение).

Результаты

Как показали исследования, при осаждении композиции CrN – (Cr,Al)N происходит формирование слоев с различной структурой: столбчатой – слой CrN и ультрамелкозернистой – слой (Cr,Al)N (рис. 1). Границы раздела между такими слоями могут служить препятствием для распространения трещин в материале покрытия.

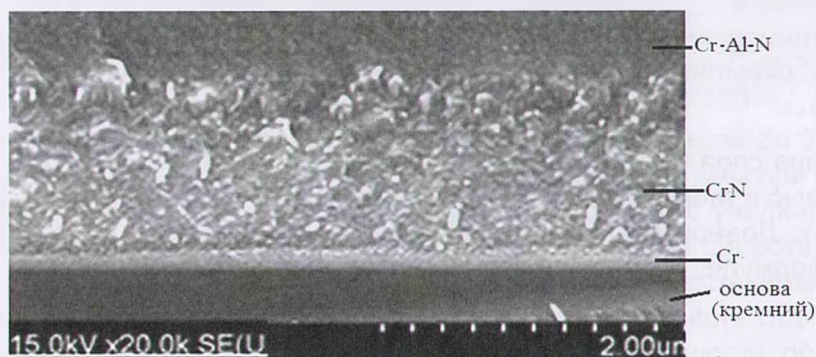


Рис. 1. Фрактограмма многослойного покрытия CrN – (Cr,Al)N

Для определения оптимальной толщины были проведены эксперименты. Согласно полученным результатам, структурные параметры и механические свойства многослойных покрытий во многом определяются их архитектурой: толщинами отдельных слоев и толщиной покрытия в целом (табл. 1).

Табл. 1

**Влияние толщины многослойного покрытия и его слоев
на механические свойства покрытия CrN – (Cr,Al)N**

Толщина слоя, h , мкм		Полуширина рентгеновской линии β_{111} , град	Микротвердость, ГПа	Адгезионное разрушение $Lc2$, Н
Cr – Al – N	Cr N			
$h_n = 1$ мкм				
0,2	0,8	1,45	28,91	42,0
0,4	0,6	1,45	29,95	42,2
0,6	0,4	1,50	31,15	42,0
0,8	0,2	1,62	32,10	42,3
$h_n = 2$ мкм				
0,4	1,6	1,23	29,20	53,0
0,6	1,4	1,34	31,20	53,5
0,8	1,2	1,45	32,00	55,0
1,0	1,0	1,52	34,20	55,3
1,5	0,5	1,75	35,61	50,0
$h_n = 3$ мкм				
0,5	2,5	1,31	30,4	51,5
0,8	2,2	1,49	33,6	52,9
1,0	2,0	1,66	35,3	54,8
1,5	1,5	1,76	36,4	54,6
2,0	1,0	1,80	38,2	52,3
$h_n = 4$ мкм				
0,5	3,5	1,26	30,40	35,1
1,0	3,0	1,25	28,22	35,3
1,5	2,5	1,25	27,69	34,8
2,0	2,0	1,23	26,82	32,6
2,5	1,5	1,18	27,80	33,0

Для оптимизации процесса проведено моделирование влияния толщины слоев на параметры покрытия на основе параметрической модели вида:

$$z(x, y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2, \quad (1)$$

где x – толщина слоя Cr – Al – N, мкм; y – толщина слоя CrN, мкм; $z(x,y)$ – параметры, представленные в табл. 1. Расчет проводился в пакете Matlab с использованием Curve Fitting Toolbox. Доверительные интервалы для параметров модели вычислялись по следующей формуле:

$$C = b \pm t\sqrt{S}, \quad (2)$$

где b – найденные значения параметров, t – обратная функция для функции распределения Стьюдента, S – вектор из диагональных элементов матрицы $sX^T X$, где X – ма-

трица плана, s – среднеквадратичная ошибка. После приближения данных параметрической моделью была проведена оценка качества приближения с использованием различных критериев пригодности приближения: SSE (сумма квадратов ошибок), R -square (критерий R -квадрат), Adjusted R -square (уточненный R -квадрат), $RSME$ (корень из среднего для квадрата ошибки).

Полуширина рентгеновской линии β_m является критерием наноструктурности сформированных слоев, поэтому необходимо было изучить взаимосвязь полуширины рентгеновской линии β_m от толщины слоев ($h_{Cr-Al-N}$ и h_{CrN}) многослойного покрытия $CrN-(Cr-Al-N)$. В данном случае рассчитанная модель имела вид:

$$\beta_m(h_{Cr-Al-N}, h_{CrN}) = 0,941 + 1,298h_{Cr-Al-N} + 1,808h_{CrN} - 0,4912h_{Cr-Al-N}^2 - 3,85h_{Cr-Al-N}h_{CrN} - 1,675 \cdot h_{CrN}^2 + 0,06492h_{Cr-Al-N}^3 + 1,727 \cdot h_{Cr-Al-N}^2 \cdot h_{CrN} + 2,444 \cdot h_{Cr-Al-N} \cdot h_{CrN}^2 + 0,4698 \cdot h_{CrN}^3 - 0,2512 \cdot h_{Cr-Al-N} \cdot h_{CrN}^3 - 0,5427 \cdot h_{Cr-Al-N}^2 \cdot h_{CrN}^2 - 0,3859 \cdot h_{Cr-Al-N} \cdot h_{CrN}^3 - 0,03905 \cdot h_{CrN}^4$$

Анализ показал, что рост толщины слоя $Cr-Al-N$ в покрытии приводит к увеличению полуширины рентгеновской линии β_m для покрытий почти всех толщин (рис. 2). Причем, рост общей толщины покрытий до 4 мкм приводит к снижению значений полуширины рентгеновских линий.

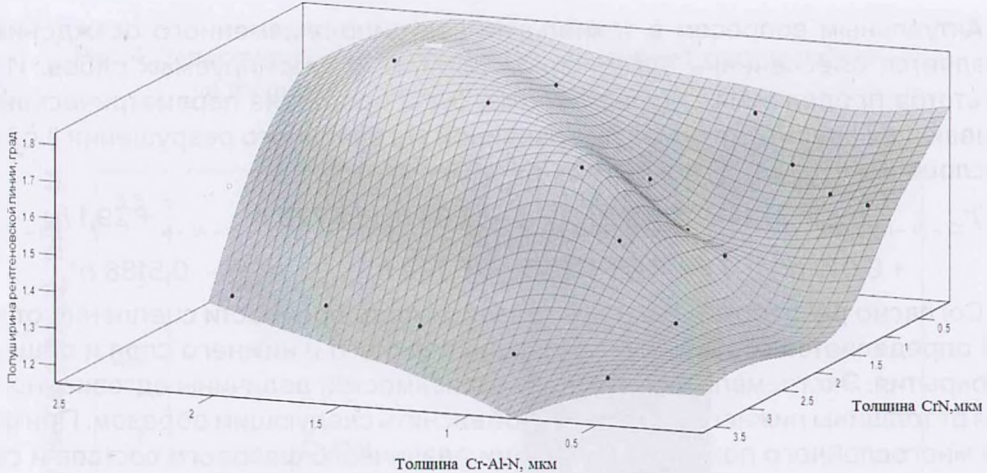


Рис. 2. Зависимости между полушириной рентгеновской линии β и толщиной слоев многослойного покрытия

Полученные результаты находятся в соответствии с моделью изменения микротвердости (H) от толщины слоев ($h_{Cr-Al-N}$ и h_{CrN}) покрытий $CrN-(Cr-Al-N)$:

$$H(h_{Cr-Al-N}, h_{CrN}) = 29,43 + 4,276 \cdot h_{Cr-Al-N} + 1,054 \cdot h_{CrN} - 1,313 \cdot h_{Cr-Al-N}^2 - 8,694 \cdot h_{Cr-Al-N} \cdot h_{CrN} - 4,619 \cdot h_{CrN}^2 + 0,9875 \cdot h_{Cr-Al-N}^3 + 6,236 \cdot h_{Cr-Al-N}^2 \cdot h_{CrN} + 12,76 \cdot h_{Cr-Al-N} \cdot h_{CrN}^2 + 1,268 \cdot h_{CrN}^3 + 0,1996 \cdot h_{Cr-Al-N}^4 - 2,571 \cdot h_{Cr-Al-N}^3 \cdot h_{CrN} - 2,541 \cdot h_{Cr-Al-N}^2 \cdot h_{CrN}^2 - 2,889 \cdot h_{Cr-Al-N} \cdot h_{CrN}^3$$

Так, установлено, что наибольшие значения микротвердости до 38 ГПа имеют многослойные покрытия $CrN-(Cr-Al-N)$ общей толщиной 2–3 мкм при больших толщинах многокомпонентного слоя покрытия (рис. 3). Причем, с увеличением общей толщины многослойного покрытия влияние верхнего слоя на сопротивление изнашиванию многослойного покрытия возрастает. Такая зависимость, имеющая экстремальный характер, объясняется различием механических свойств отдельных слоев многослойного покрытия. Известен механизм повышения твердости, обусловленный формированием наноструктуры покрытий. Это связано с тем, что при размерах зерна до 15 нм невозможны генерация и распространение дислокаций, подавлено распро-

странение трещин и скольжение границ зерен, а предел текучести имеет значения, близкие к теоретическому сопротивлению сдвига [9].

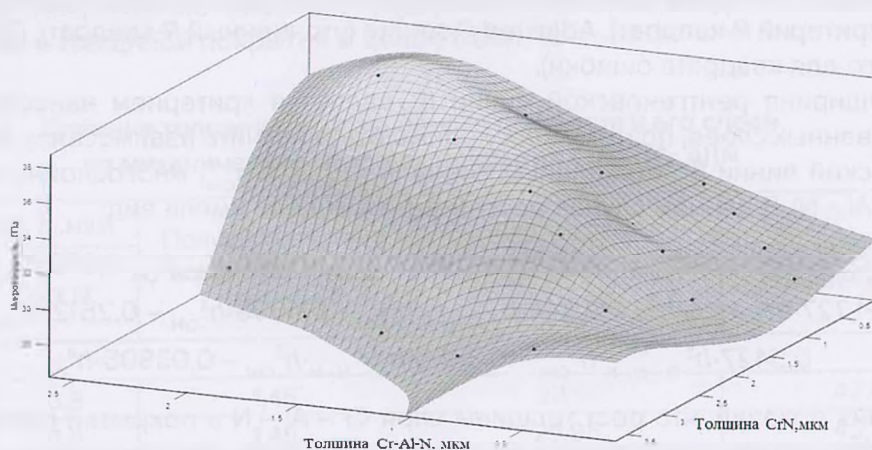


Рис. 3. Зависимости микротвердости H_{μ} многослойного покрытия от толщины слоев

Актуальным вопросом в технологии вакуумно-плазменного осаждения покрытий является обеспечение адгезионной прочности формируемых слоев. Исходя из результатов проведенных экспериментов, была построена параметрическая модель, описывающая взаимосвязь между величиной адгезионного разрушения (Lc_2) и толщинами слоев ($h_{Cr-Al-N}$ и h_{CrN}) покрытий CrN – (Cr – Al – N):

$$Lc_2(h_{Cr-Al-N}, h_{CrN}) = 37,14 - 10,48 h_{Cr-Al-N} - 18,04 h_{CrN} + 4,729 h_{Cr-Al-N}^2 + 29,1 h_{Cr-Al-N} h_{CrN} + 6,019 h_{CrN}^2 - 7,825 h_{Cr-Al-N}^2 h_{CrN} - 5,792 h_{Cr-Al-N} h_{CrN}^2 - 0,5188 h_{CrN}^3$$

Согласно разработанной модели зависимость прочности сцепления от толщины слоев определяется соотношением толщин верхнего и нижнего слоя и общей толщиной покрытия. Экстремальный характер зависимостей величины адгезионного разрушения от толщины нижнего слоя можно объяснить следующим образом. При формировании многослойного покрытия со слоями различного фазового состава и структуры возникают как температурные напряжения, так и структурные, оказывающие влияние на адгезионную прочность слоев. Как показали эксперименты, при малой толщине верхнего слоя Cr – Al – N напряжения, действующие в покрытии, формируются в условиях значительного влияния материала нижнего слоя CrN и возрастают по мере роста его толщины. Увеличение толщины верхнего слоя приводит к ухудшению адгезионной прочности многослойного покрытия вследствие высоких структурных напряжений в нем. Кроме того, снижению адгезии способствует и повышение общей толщины многослойного покрытия, что отражается снижением силы адгезионного разрушения (Lc_2). Так, максимальная адгезия характерна для покрытий с толщиной 2–3 мкм при соотношении толщины верхнего слоя Cr – Al – N к нижнему CrN равному 0,5–1,0 (рис. 4).

Испытания на износ твердосплавных неперетачиваемых пластин из сплава BK8 с многослойным покрытием на деревообрабатывающем центре с ЧПУ (рис. 5) при фрезеровании древесностружечной плиты показало, что использование многослойных покрытий CrN – (Cr – Al – N) позволило увеличить ресурс работы инструмента до 2 раз в сравнении с инструментом, упрочненным многокомпонентным покрытием системы Cr – Al – N. Увеличение ресурса работы инструмента может быть обусловлено более высокой трещиностойкостью многослойных покрытий, обусловленной снижением структурных напряжений покрытия и различием механических характеристик слоев.

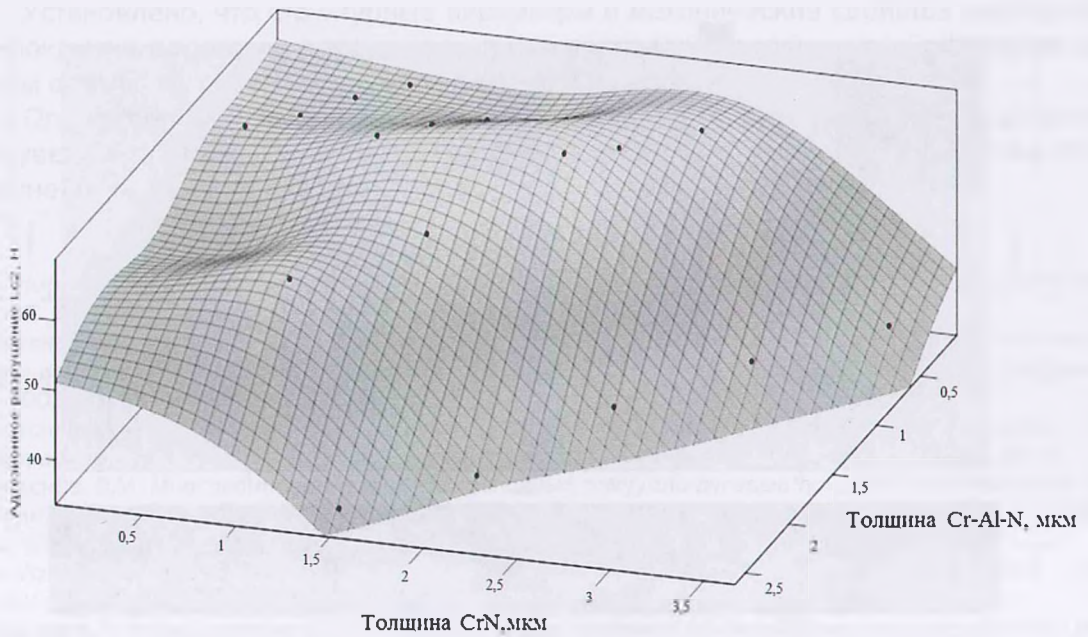


Рис. 4. Зависимость между величиной адгезионного разрушения и толщиной слоев многослойного покрытия

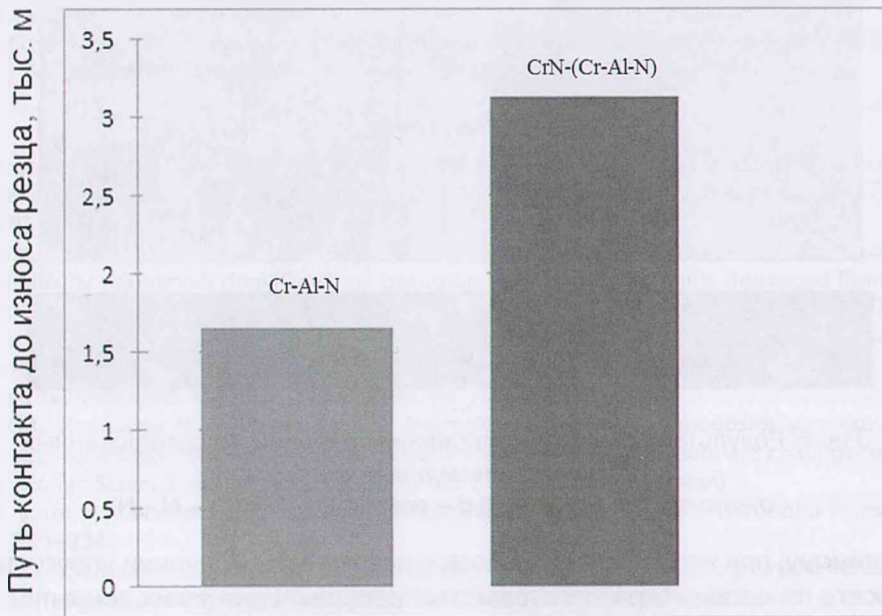


Рис. 5. Фактический путь контакта до износа резца с покрытием Cr – Al – N и с покрытием CrN – (Cr – Al – N)

Изучение графиков адгезионного разрушения однослойного покрытия Cr – Al – N (рис. 6, а) и многослойного покрытия CrN – (Cr – Al – N) (рис. 6, б) показало, что для многослойного покрытия нагрузка ($Lc1$), при которой появляется первая трещина (соответствующая увеличению пика акустической эмиссии) выше в 2 раза в сравнении с однослойным покрытием.

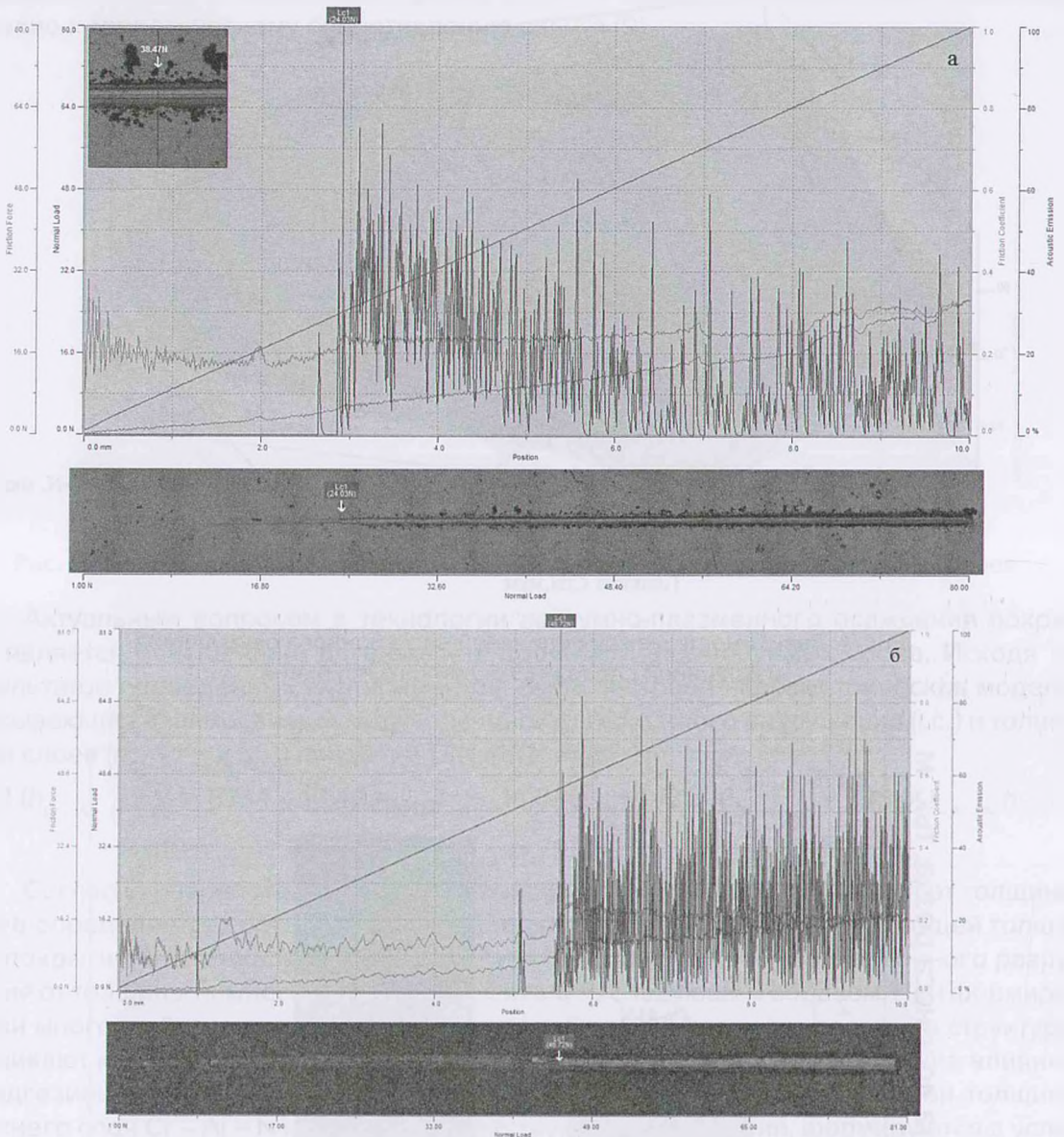


Рис. 6. Результаты скретч-тестирования покрытий, сформированных вакуумно-плазменным методом:
 а – покрытие Cr – Al – N, б – покрытие CrN – (Cr – Al – N)

По-видимому, при использовании слоев с различными модулями упругости ограничивается скорость генерации и распространения трещины и для таких покрытий характерен механизм послойного разрушения, что существенно замедляет процесс изнашивания покрытия.

Выводы

На основе математического моделирования взаимосвязи между толщиной многослойного покрытия CrN/Cr – Al – N, его отдельными слоями и физико-механическими свойствами установлена оптимальная толщина покрытия CrN/Cr – Al – N (2–3 мкм) и соотношение толщины верхнего слоя Cr – Al – N к нижнему CrN равному 0,5–1,0, обеспечивающая высокую адгезионную прочность с основой и микротвердость.

Установлено, что структурные параметры и механические свойства многослойных покрытий во многом определяются их конструкцией: толщинами и фазовым составом отдельных слоев и толщиной покрытия в целом.

Определено, что использование многослойных покрытий CrN – (Cr – Al – N) позволяет увеличить стойкость работы инструмента до 2 раз в сравнении с инструментом, упрочненным многокомпонентным покрытием системы Cr – Al – N.

ЛИТЕРАТУРА

1. Некоторые методологические принципы создания функциональных покрытий для режущих инструментов / А.С. Верещака [и др.]. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – С. 210–231.
2. Береснев, В.М. Покрытия на основе тугоплавких соединений, осаждаемых из потоков металлической плазмы вакуумной дуги / В.М. Береснев, В.Т. Толок, В.И. Гриценко // Физическая инженерия поверхности. – 2003. – Т.1, № 3–4. – С. 237–257.
3. Береснев, В.М. Факторы, влияющие на формирование многокомпонентных покрытий на основе TiN / В.М. Береснев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 4/2 (16). – С. 76–78.
4. Береснев, В.М. Многокомпонентные и многослойные вакуумно-дуговые покрытия для режущего инструмента / В.М. Береснев, М.Ю. Копейкина, С.А. Клименко // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – №1. С. 152–158.
5. Localized deformation of multicomponent thin films / D.V. Shtansky [et al.]. – Thin Solid Films, 2004. – Vol. 429–421. – P. 339–334.
6. Табаков, В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента / В.П. Табаков. – М. Машиностроение, 2008. – 311 с.
7. Смыслов, А.М. Механические свойства и уровень внутренних напряжений многослойных ионно-плазменных покрытий Ti-TiN и Ti-TiVN для деталей из титановых сплавов / А.М. Смыслов, Ю.М. Дыбленко, К.С. Селиванов, В.С. Жернаков, А.И. Дубин // Вестник УГАТУ 2019. Т. 23, No4(86). С.42–49.
8. Veprek, S. and all. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites / S. Veprek // Thin Solid Films. – 2005. – Vol. 476. – P. 1–29.
9. Табаков, В.П. Износостойкие покрытия режущего инструмента, работающего в условиях непрерывного резания / В.П. Табаков, А.В. Чихранов. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 255 с.

REFERENCES

1. Nekotorye metodologicheskie principy sozdaniya funktsional'nyh pokrytij dlya rezhushchih instrumentov [Some methodological principles of creating functional coatings for cutting tools] / A. Vereshchaka [and others]. – Kharkov: NTU "KhPI", 2007. pp. 210–231. (in Russian)
2. Beresnev V.M., Tolok V.T., Gritsenko V.I. Pokrytiya na osnove tugoplavkikh soedinenij, osazhdaemykh iz potokov metallicheskoj plazmy vakuumnoj dugi [Coatings based on refractory compounds deposited from metal plasma flows of a vacuum arc] // Physical engineering of the surface. 2003. Vol. 1, No. 3–4. pp. 237–257. (in Russian)
3. Beresnev V.M. Faktory, vliyayushchie na formirovanie mnogokomponentnykh pokrytij na osnove TiN / V.M. Beresnev [Factors influencing the formation of multicomponent coatings based on TiN] // Eastern European Journal of Advanced Technologies. – 2005. – No. 4/2 (16). pp. 76–78. (in Russian)
4. Beresnev V.M., Kopeikina M.Yu., Klivenko S.A. Mnogokomponentnye i mnogoslojnye vakuumno-dugovye pokrytiya dlya rezhushchego instrumenta [Multicomponent and multilayer vacuum-arc coatings for cutting tools] // Problems of Atomic Science and Technology. 2008. No. 1 P. 152–158. (in Russian)
5. Shtansky D.V. [et al.] Localized deformation of multicomponent thin films / – Thin Solid Films, 2004. – Vol. 429–421. – P. 339–334.
6. Tabakov V.P. Formirovanie iznosostojkikh ionno-plazmennyykh pokrytij rezhushchego instrumenta [Formation of wear-resistant ion-plasma coatings of cutting tools] / M. Mechanical Engineering, 2008. 311 p. (in Russian)
7. Smyslov A.M., Dyblenko Yu.M., Selivanov K.S., Zhernakov V.S., Dubin A.I. ekhanicheskie svojstva i uroven' vnutrennih napryazhenij mnogoslojnykh ionno-plazmennyykh pokrytij Ti-TiN i Ti-TiVN dlya detalej iz titanovykh splavov [Mechanical properties and the level of internal stresses of multilayer ion-plasma coatings Ti-TiN and Ti-TiVN for parts made of titanium alloys] // Bulletin of USATU 2019. Vol. 23, No4 (86). Pp. 42–49. (in Russian)
8. Veprek, S. and all. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites // Thin Solid Films. – 2005. – Vol. 476. P. 1–29.
9. Tabakov V.P., Chikhranov A.V. Iznosostojkie pokrytiya rezhushchego instrumenta, rabotayushchego v usloviyah nepreryvnogo rezaniya [Wear-resistant coatings of cutting tools operating under continuous cutting conditions] // Ulyanovsk: UISTU, 2007. 255 p. (in Russian)

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 15.07.2020

microcircuits by magnetron sputtering]. Ves. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. navuk. 2020. V. 65. №1. pp. 35–42. (in Russian)

7. Mel'nik N.Yu. Vysokokremnistyj rezistivnyj splav sistemy Si-Cr-Co-Y-Nb-CeO₂ [High-silicon resistive alloy of Si-Cr-Co-Y-Nb-CeO₂ system]. Sbornik materialov LXII Mezhdunarodnaya konferenciya «Aktual'nye problemy prochnosti». 2020. pp. 207–209. (in Russian)

8. Smirnova K.I. Tonkie plenki v mikroelektronike [The thin films in microelectronics]. Uchebnoe posobie. – Tomsk: Tomskij gosudarstvennyj universitet sistem upravleniya i radioelektroniki. 2007. pp. 94. (in Russian)

9. Majssela L. Tekhnologiya tonkih plenek [The technology of thin films]. N'yu-jork. – 1970. Per. s angl. pod red. Elinsona M.I., Smolko G.G. – V.2. Moscow, Sovetskoe radio. 1977. pp. 768. (in Russian)

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 13.07.2020