

УДК 621.9.025

А. С. Манохин, канд. техн. наук, В.А. Столбовой канд. техн. наук,
Закиев И. М., канд. техн. наук, С. А. Клименко, д-р. техн., наук,
Береснев В. М., д-р. техн., наук, С. Ан. Клименко, канд. техн. наук,
Найденко А.Г., канд. техн. наук, Закиев В. И.,
Ю. А. Мельничук, канд. техн. наук, М. Ю. Копейкина, канд. техн. наук,
Киев, Харьков, Украина

ВЛИЯНИЕ ПОДГОТОВКИ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН ИЗ $PcBN$ ПОД НАПЫЛЕНИЕ НА АДГЕЗИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ В СИСТЕМЕ «ПОКРЫТИЕ-ОСНОВА» И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНСТРУМЕНТА

Рассмотрено влияние подготовки режущих пластин под напыление на адгезионную прочность и эксплуатационные характеристики инструмента

Ключевые слова: режущие пластины, напыление покрытий, эксплуатационные характеристики

Розглянуто вплив підготовки ріжучих пластин під напилення на адгезійну міцність і експлуатаційні характеристики інструменту

Ключові слова: ріжучі пластини, напилення покриттів, експлуатаційні характеристики

The influence of the preparation of cutting inserts on the deposition on the adhesive strength and performance characteristics of the tool

Key words: cutting inserts, spraying of coatings, performance characteristics

Введение

Нанесение покрытий на режущий инструмент позволяет существенно увеличить стойкость и/или производительность режущих инструментов. В настоящее время подавляющее большинство сменных неперетачиваемых твердосплавных режущих пластин выпускается с различными типами PVD или CVD защитными покрытиями. Разработка и создание покрытий для режущих инструментов с рабочей частью из поликристаллического кубического нитрида бора ($PcBN$) также является актуальной задачей [1]. Учитывая, что покрытие должно снижать интенсивность изнашивания режущего инструмента из сверхтвердого композита вследствие абразивно-механического истирания его контактных поверхностей, твердость покрытия должна быть весьма высока. Перспективным методом получения покрытий с твердостью 40–80 ГПа является вакуумно-дуговое осаждение. Высокая твердость таких покрытий обусловлена, в первую очередь, их структурой с высокой плотностью межзеренных и межфазных границ и характерными размерами структурных элементов (зерен, слоёв и т.п.) не более 100 нм. При этом нанесение покрытий высокой твердости на режущие пластины из $PcBN$ связано с рядом проблем. В частности, адгезионная прочность покрытий,

нанесенных на основу из PсBN, при прочих равных условиях, более чем в два раза ниже, в сравнении с покрытиями, напыленными на основу из твердого сплава или стали [2]. Для повышения прочности адгезионной связи в качестве переходного подслоя между инструментальной основой и нитридным PVD-покрытием наносится слой Ti [3], TiN или CrN [4] (в зависимости от химического состава основного слоя покрытия) толщиной до 100 нм. Кроме того, металлический подслоя снижает внутренние напряжения в покрытии, а именно, при толщине подслоя Ti, равной 20 % от толщины покрытия TiN, внутренние напряжения в последнем уменьшаются в 2–3 раза [5], что повышает прочность сцепления с подложкой и снижает вероятность растрескивания покрытий с последующей их деламинацией. Также возможна предварительная обработка ионами металлов (например, Cr⁺) в газовой атмосфере (Ar) с образованием зоны имплантации в приповерхностном слое инструментальной основы при последующем нанесении базового нитридного слоя (CrN), соответствующего первому из слоев в многослойной системе основной части покрытия [6].

Целью настоящего исследования являлся анализ влияния способов подготовки поверхности режущих пластин из PсBN перед нанесением защитного покрытия на адгезионную прочность в системе «покрытие-основа» и эксплуатационные характеристики режущего инструмента с покрытием.

Для этого на режущие пластины из PсBN наносилось нанослойное покрытие (TiAlSiY)N/CrN. Перед нанесением покрытия производилась бомбардировка поверхностей пластин ионами азота или аргона, а также на них наносился подслоя хрома.

Методика

На рис. 1. показана схема модернизированной вакуумно-дуговой установки типа «БУЛАТ-6» с устройством для получения нанослойных покрытий (рис. 1). Для этого вакуумная камера 1 обеспечена системой автоматического поддержания давления азота (аргона) 5 и испарителями 2, 8, 12. На поворотном устройстве камеры размещался держатель 4. В центре держателя размещались напыляемые режущие пластины 6. В установке установлен источник постоянного напряжения 10. Размер отрицательного постоянного напряжения, подаваемого на напыляемые пластины регулировался от 20 до 1300 В.

Поворотная система держателя и источника питания дуги в испарителях 8, 12 связаны с устройством для автоматического управления нанесением многослойных нанокompозитных покрытий 11. Устройство обеспечивает два режима работы, которые соответствуют алгоритмам управления испарителями, а также имеется электродвигатель вращения держателя [7].

Напыление производилось на режущие пластины типоразмера RNUN-070300 из PсBN «борсинит» – (95–97) % cBN+(3–5) % Si₃N₄.

Пластини попередньо промивали щелочним розчином в ультразвуковій ванні, а потім нефрасом С2-80/120. Вакуумну камеру 1 откачували до тиску $P = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па і проводили іонну очистку з активацією поверхні пластин бомбардування іонами азоту (аргону) в газовій плазмі двохступінчатого розряду. РсВN являється діелектриком, тому очистка і нагрів в вакуумі виконувалися за рахунок газової плазми, для чого використовувався газовий двохступінчатий розряд.

Для створення газового розряду в робочому об'ємі камери включений випарник 2, що створює газо-металічну плазму, яка через екран 3 являється емітером електронів для газового розряду в об'ємі робочої камери 1. При подачі на корпус вакуумно-дугового випарника 7 позитивного потенціалу перемикачем 9 від джерела живлення дуги в присутності азоту (аргону) при тиску 0,05–0,50 Па в робочому об'ємі камери виникає газовий двохступінчатий розряд.

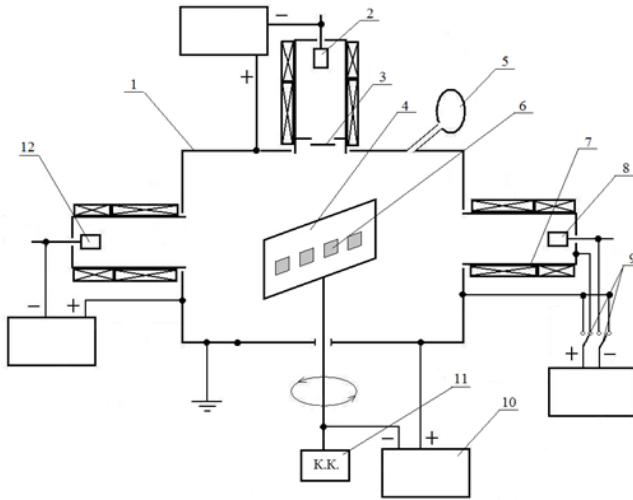


Рисунок 1 – Принципіальна схема вакуумно-дугової установки типу «БУЛІАТ-6»:
 1 – вакуумна камера; 2 – вакуумно-дуговий випарник; 3 – металічний екран;
 4 – екран-держатель; 5 – регулятор тиску азоту; 6 – напыляемі пластини;
 7 – корпус вакуумно-дугового випарника – анод для газового розряду; 8 – катод Сг;
 9 – реле перемикачів; 10 – джерело постійного напруги;
 11 – командо-контроллер; 12 – катод TiAlSiY

При подачі на підложку 4, а відповідно, і на зразки 6 високого негативного потенціалу $-(500-1300)$ В відбувається її розігрів за рахунок бомбардування іонами азоту (аргону) до температури $(480-540)$ °С, що забезпечує процеси очистки і нагріву напыляемих пластин. Їх температура в подальшому підтримується зміною величини негативних

потенциалов (постоянного 10 и импульсного 12). Продолжительность процесса ионной очистки в газовой плазме зависит от необходимого времени для активации очистки поверхности и нагрева пластин. После очистки, для улучшения адгезионных свойств системы «покрытие-основа», на поверхность пластин наносился подслоя хрома. После этого одновременным включением испарителей и подачи в камеру азота на напыляемые пластины подавался постоянный потенциал -280 В и наносился первый слой CrN с одной стороны, а с противоположной – TiAlSiYN. Время обработки каждого слоя – 2 сек, общее время напыления – 1 час. Ток дуги в процессе осаждения составлял 90 А, давление азота в камере 0,465 Па, расстояние от испарителя к подложке – 500 мм, температура пластин (450–520)°С. Варианты подготовки режущих пластин под напыление представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Подготовка режущих пластин из PcBN под напыление

Вариант			
1	2	3	4
Ионная очистка в газовой плазме азота (20 мин); нанесение подслоя хрома (50 нм)	Ионная очистка в газовой плазме азота (20 мин)	Ионная очистка в плазме хрома (20 мин); нанесение подслоя хрома (50 нм)	Ионная очистка в газовой плазме аргона (20 мин); нанесение подслоя хрома (50 нм)

Для измерения адгезионной прочности в системе «покрытие-основа» использовался универсальный hardness/scratch тестер «Micron-gamma», блок-схема которого показана на рис. 2 [8].

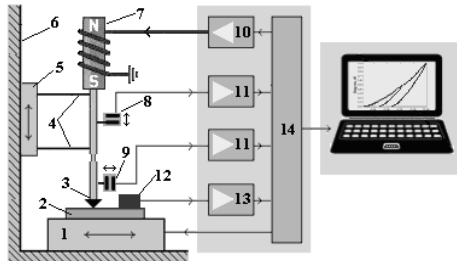


Рисунок 2 – Блок-схема универсального hardness/scratch тестера «Micron-gamma»

Прибор «Micron-gamma» предназначен для оценки микромеханических характеристик материалов методами непрерывного вдавливания и царапания индентором и состоит из моторизованного предметного стола 1, на котором устанавливается исследуемый образец 2. Стол перемещается с постоянной скоростью 22 мкм/с относительно индентора 3. Индентор 3 со штоком прикреплен посредством двух мягких плоских пружин 4 к направляющей 5,

которая может перемещаться по вертикали относительно корпуса 6. Нагружается индентор электромагнитным нагрузителем 7, который подключен к ЦАП 10. Нормальные и тангенциальные перемещения индентора измеряются, соответственно, датчиками 8 и 9, которые подключены к АЦП 11. Дополнительно, на предметный стол может устанавливаться пьезоэлектрический датчик 12 с усилителем 13 для регистрации акустических сигналов. Регистрация и управление осуществляется микроконтроллером 14, подключенным к компьютеру. Чувствительность датчиков составляет 5 нм. Максимальная нагрузка на индентор, развиваемая нагрузителем 7, составляет 5 Н (500 гс).

Прибор позволяет задавать любой закон нагружения при одновременном перемещении образца. Для регистрации профилограммы поверхности нагрузка на индентор минимальна ($P = 0,1$ г, рис. 3, а, в). При прогрессивном царапании, когда нагрузка P плавно увеличивается, а затем плавно уменьшается (рис. 3, б), можно регистрировать нормальную и тангенциальную составляющие перемещения индентора. В режиме линейного царапания поверхность образца подвергается постоянной нагрузке ($P = \text{const}$, рис. 3, г).

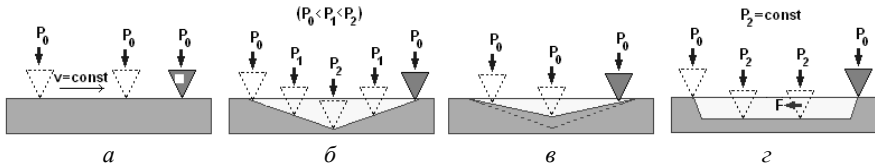


Рисунок 3 – Модельная схема, поясняющая режимы царапания образцов

Испытания инструментов, оснащенных режущими пластинами с наноструктурными покрытиями, проводились при продольном безударном точении заготовок из стали ХВГ, закаленной до 53 ± 2 HRC. Режимы резания: $S = 0,14$ мм/об, $t = 0,2$ мм, $v = 110$ м/мин; геометрические параметры инструмента: $\gamma = -10^\circ$, $\alpha = 10^\circ$. После каждого прохода (3 минуты), износ инструмента по задней поверхности фиксировался USB-микроскопом, установленным на станине станка.

Экспериментальные результаты

Микротвердость и модуль Юнга покрытий измеряли методом непрерывного внедрения в напыленные пластины индентора Берковича при нагрузке 50 гс со скоростью нагружения 5 гс/с. Усредненные по 10-ти измерениям диаграммы приведены на рис. 4. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Для измерения адгезионной прочности покрытия производилось его прогрессивное царапание в три этапа с одновременной регистрацией вертикальных перемещений индентора.

На первом, при нагрузке 0,1 гс, регистрировался исходный профиль поверхности (рис. 5, кривая 1).

Вернувшись в исходную позицию, производилось прогрессивное царапание с регистрацией диаграммы вертикальных перемещений индентора (рис. 5, кривая 2) – склерограммы. Максимальная нагрузка в середине трассы ~240 гс (рис. 5, кривая 4). Для точного определения момента разрушения одновременно регистрировался акустический сигнал (рис. 5, осциллограмма 5), возникающий при нагружении покрытия индентором.

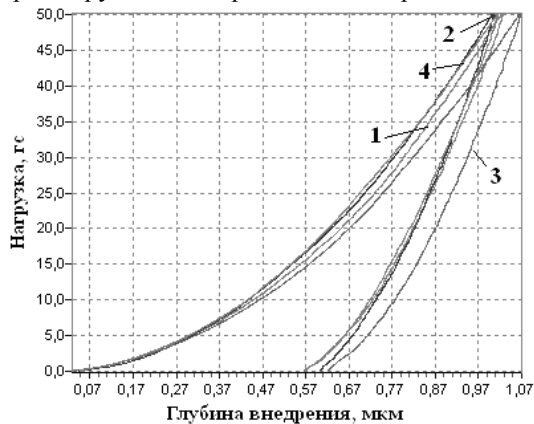


Рисунок 4 – Диаграммы внедрения индентора Берковича в покрытия на пластинах, подготовленных по вариантам, представленным в табл. 1

В заключение, из исходной позиции регистрировалась профилограмма царапины, образовавшейся при нагрузке 0,1 гс (рис. 5, кривая 3).

Как видно из рис. 5, определение величины адгезионной прочности покрытия по координате начала зоны хрупкого разрушения на микрофотографии не позволяет получить достоверный результат, поскольку сама зона разрушения распространяется в направлении, обратном перемещению индентора, по уже нагруженному участку царапины. Для оценке адгезионной прочности покрытий высокой твердости при прогрессивном сканировании индентором критическое значение нагрузки может быть определено в результате анализа сигнала акустической эмиссии.

Для оценки толщины покрытия выполнены исследования по изнашиванию напыленных пластин стальным шариком диаметром 24 мм в суспензии масла, содержащей 20 % алмазного порошка АСМ 2/1, методом «calo-test» [9]. Двухмерное изображение участка перехода «покрытие-пластина РсBN» лунки износа, полученное на бесконтактном интерференционном профилометре «Micron-alpha» [10], приведены на рис. 6. Ступенчатый характер разрушения имеет место для пластин с покрытиями, подготовленных под напыление по вариантам 1 и 3 (рис. 6, б), тогда как у

пластин с покрытиями, подготовленных по вариантам 2 и 4, износ плавный (рис. 6, в), почти нет ступеньки перехода на краю покрытия, что свидетельствует о хорошей адгезии.

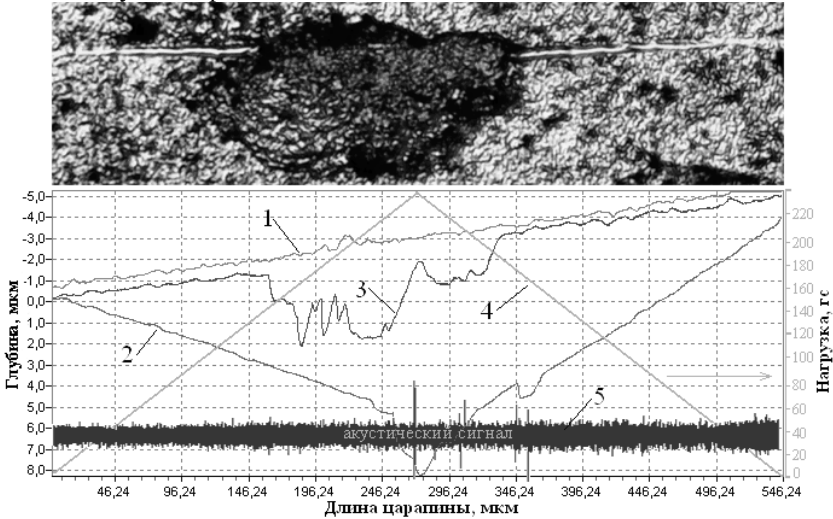


Рисунок 5 – Кривые прогрессивного сканирования покрытия индентором Берковича и микрофотография царапины: 1 – профилограмма исходной поверхности; 2 – склерограмма при максимальной нагрузке 240 гс; 3 – профилограмма образовавшейся царапины; 4 – кривая нагружения; 5 – осциллограмма акустического сигнала

Толщины исследованных покрытий приведены в табл. 2.

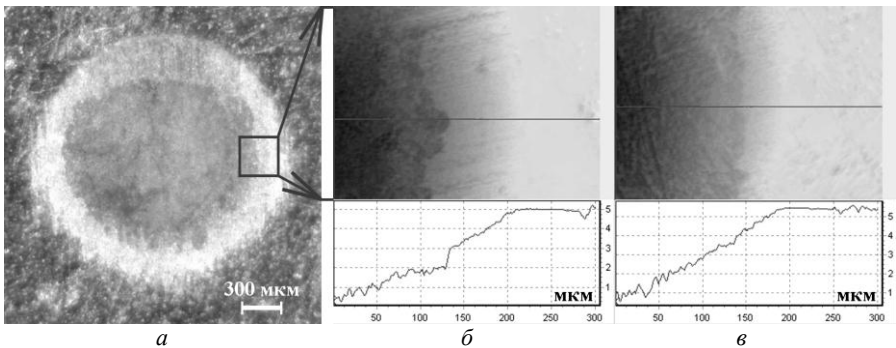


Рисунок 6 – Характерный вид лунки износа на пластине с покрытием после испытаний методом «calo-test» и 2D топографии с профилограммами края лунки износа: а – микрофотография лунки; б, в – пластины, подготовленные под напыление по вариантам 1, 3 и 2, 4 соответственно

Внешний вид инструментов с изношенными контактными участками показан на рис. 7. Наибольшие участки деламинации покрытия, выходящие далеко за пределы контактных зон инструмента со стружкой и обрабатываемым изделием, наблюдаются на инструменте, оснащённом пластиной, подготовленной под напыление по варианту 1, при этом покрытие скалывается с передней и задней поверхностями инструмента (рис. 7 и 8 а, б). В случае подготовки пластины по варианту 3, площадь сколов покрытия несколько меньше. Покрытия на пластинах из PсBN, подготовленных под напыление по вариантам 2 и 4, при нагружении инструмента в зоне резания демонстрируют наилучшее сцепление с основой – площадки разрушения покрытий ограничены только контактными участками инструментов и соответствуют минимальной ширине их фасок износа h_3 .

Как видно, для инструментов, оснащённых пластинами, подготовленными под напыление по вариантам 1 и 3, величина адгезионного сцепления покрытия с основой из PсBN явно недостаточна, чтобы противостоять касательным контактным напряжениям на рабочих участках, и большие участки покрытия удаляются с поверхности пластины уже на начальном этапе обработки (рис. 7 а, б).

Таблица 2 – Результаты измерений

Вариант	Микротвердость H , ГПа	Модуль Юнга E , ГПа	Адгезионная прочность P , гс	Толщина покрытия h , мкм
1	31,8	350	170	4,0±0,1
2	32,3	391	210	4,1±0,1
3	28,7	335	180	3,9±0,1
4	32,9	351	200	4,0±0,1

Очевидно, что в связи с деламинацией покрытий на пластинах, подготовленных под напыление по этим вариантам, величина стойкости инструмента с покрытием соответствует стойкости инструмента из PсBN без покрытия. Напротив, инструменты, оснащённые пластинами с покрытиями, подготовленными под напыление по вариантам 2 и 4, демонстрируют существенно более низкую интенсивность изнашивания. Близкие значения интенсивности изнашивания, несмотря на некоторое различие в значениях адгезионной прочности и характере разрушения покрытий при скрэтч-тестах, свидетельствуют о том, что методы подготовки пластин перед нанесением покрытий обусловили достаточные для условий данного эксперимента прочности сцепления в системах «покрытие-основа из PсBN».

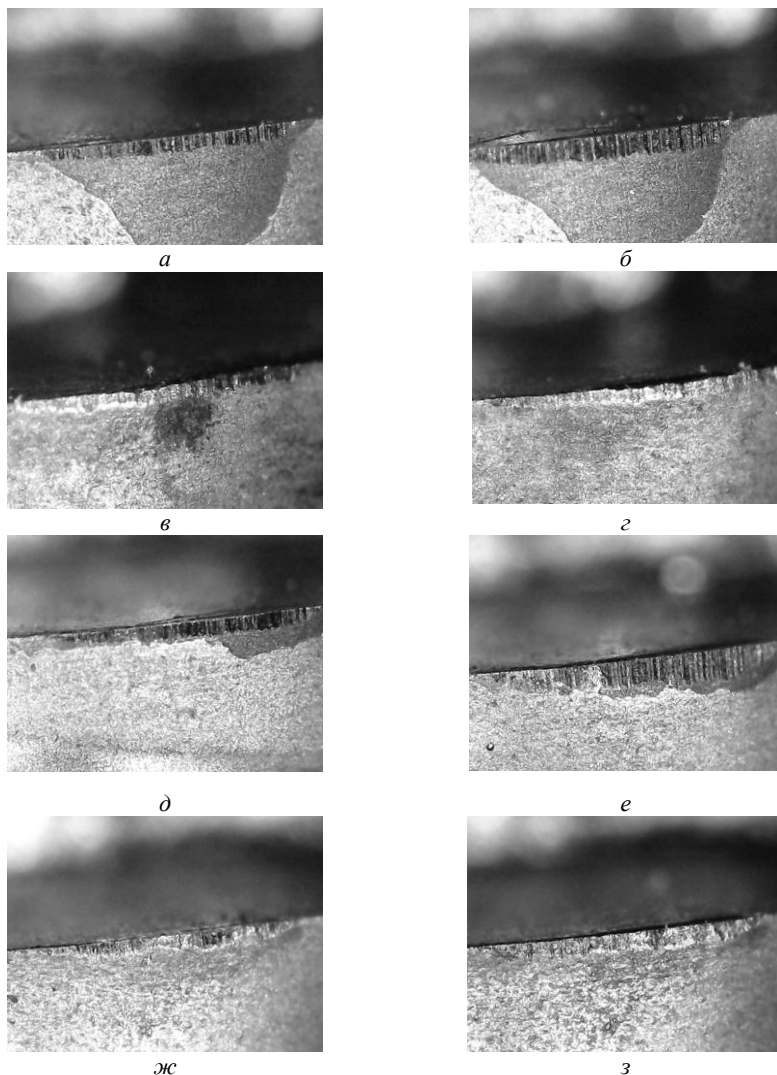


Рисунок 7 – Контактные участки инструментов со стороны задней поверхности.

Режущие пластины подготовлены под напыление по варианту: *a* – 1 ($\tau = 3$ мин);

б – 1 ($\tau = 6$ мин); *в* – 2 ($\tau = 3$ мин); *г* – 2 ($\tau = 9$ мин); *д* – 3 ($\tau = 3$ мин);

е – 3 ($\tau = 9$ мин); *ж* – 4 ($\tau = 3$ мин); *з* – 4 ($\tau = 9$ мин).

Сравнительная диаграмма на рис. 9 демонстрирует величины фасок износа на задней поверхности тестируемых инструментов после 9 минут резания. При подготовке пластины из PcBN по варианту 1, ионная очистка в газовой плазме азота обеспечивала нагрев ее поверхности до температуры

450 °С. В этом случае адгезия многослойного покрытия TiAlSiYN/CrN с инструментальной основой из PcBN была низкой, чем у при подготовке пластины по варианту 2, когда нагрев ее поверхности достигал 500 °С. В настоящее время вакуумная очистка ионами хрома считается самой оптимальной, т.к. ионы хрома хорошо распыляют обрабатываемые поверхности и одновременно внедряются в приповерхностный слой режущих пластин. Однако, как видно из рис. 9, методика очистки ионами Cr не позволяет достичь оптимальных адгезионных свойств между покрытием и основой из PcBN, подготовленной по варианту 3.

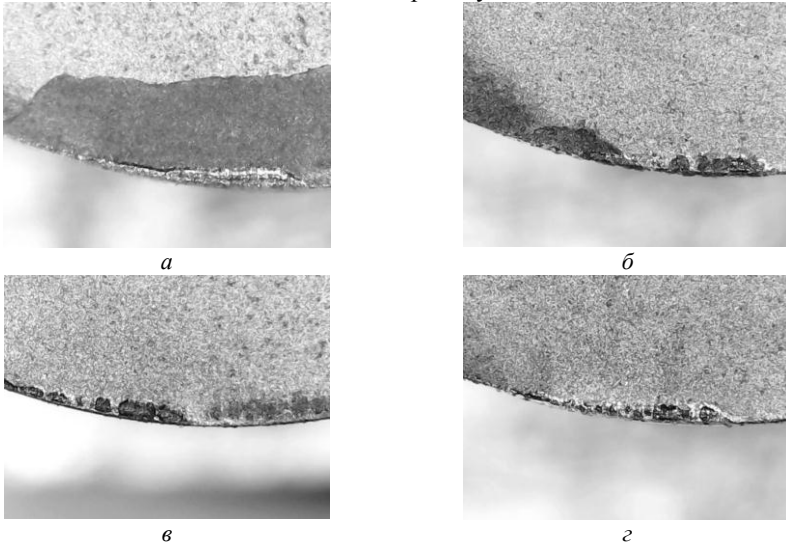


Рисунок 8 – Контактные участки инструментов со стороны передней поверхности.
 Режущие пластины подготовлены под напыление по варианту:
 а – 1 ($\tau = 3$ мин); б – 3 ($\tau = 3$ мин); в – 2 ($\tau = 3$ мин); г – 4 ($\tau = 3$ мин)

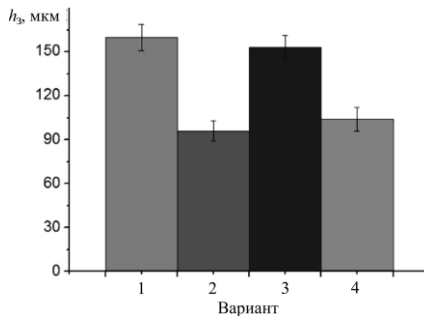


Рисунок 9 – Величина фаски износа инструментов после 9 минут резания.
 1–4 – варианты подготовки режущих пластин под напыление (см. табл. 1)

Пластина, подготовка которой выполнялась по варианту 4, подвергалась очистке ионами Ar при температуре ~ 520 °C. Ar, имея большую массу чем N, приводит к более интенсивному разогреву и распылению обрабатываемого поверхностного слоя, что позволяет создать хорошую адгезию между покрытием TiAlSiYN/CrN и пластиной PcBN.

Выводы

Результаты проведенных исследований показывают, что высокая адгезия нанослойного покрытия TiAlSiYN/CrN с режущей пластиной из PcBN обеспечивается при очистке пластины в газовой плазме (N или Ar) и температуре нагрева ~ 500 °C.

При оценке адгезионной прочности покрытий высокой твердости при прогрессивном сканировании критическое значение нагрузки может быть определено в результате анализа акустического сигнала. Определение величины адгезионной прочности по координате начала зоны хрупкого разрушения покрытия на микрофотографии не целесообразно, поскольку сама зона разрушения распространяется в направлении, обратном перемещению индентора, по уже нагруженному участку царапины.

При условии, что очистка в газовой фазе не проводилась и/или поверхность режущей пластины при подготовке под напыление не прогревается до температуры 450 °C, применение наиболее распространенного способа интенсификации адгезии – нанесения подслоя металла (Cr), не позволяет обеспечить прочное сцепление покрытия с пластиной из PcBN. При скрэтч-тестах максимальную величину силы скалывания демонстрировало покрытие, нанесенное на пластину, подготовленную по варианту 2 без подслоя металла.

При резании закаленной стали нанослойное защитное покрытие (TiAlSiY)N/CrN, при условии отсутствия его деляминации, существенно (в 1,6 раза) снижает износ режущего инструмента по задней поверхности. Поэтому, при подготовке режущих пластин под напыление наиболее перспективными являются очистка в вакууме в газовой плазме Ar с последующим нанесением подслоя Cr толщиной 50 нм, а многослойное покрытие TiAlSiYN/CrN позволяет повысить ресурс работы инструмента, оснащенного PcBN, при тяжелых условиях резания в 1,6 раза.

Список использованных источников: 1. *Манохин А. С.* Эффективность нанесения нитридных покрытий на инструменты из PCBN по данным зарубежных источников / А. С. Манохин // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Мат. междунар. науч.-техн. семинара, 22–26 февраля 2016, г. Свалява, Карпаты. – К.: АТМ Украины, 2016. – С. 168–170.; 2. *Sveena S.* Scratch adhesion characteristics of PVD TiAlN deposited on high speed steel, cemented carbide and PCBN substrates / *S. Sveena, J. M. Andersson, R. M'Saoubi, M. Olsson* // *Wear.* – 2013. – 308. – P. 133–141; 3. *Верещака А. С.* Наноразмерные многослойно-композиционные покрытия для повышения износостойкости и работоспособности твердосплавных концевых фрез / А. С. Верещака, А. А. Верещака, Ю. И. Бубликов, М. Г. Оганян // *Резание и инструменты в технологических системах.* – 2014. – Вып. 84. – С. 26–42; 4. *Uhlmann E.* Investigation of wear resistance of coated PcBN turning tools for hard machining /

E. Uhlmann, H. Riemer, D. Schrüter et al. // Inter. J. of Refract. Met. and Hard Mat. – 2018. – Vol. 72. – P. 270–275. **5. Береснев В.М.** Принципы создания плазменных многокомпонентных многофункциональных покрытий с высокими эксплуатационными свойствами : дис. докт. техн. наук / В. М. Береснев; Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, 2006. **6. Hovsepian P. E.** Performance of HIPIMS deposited CrN/NbN nanostructured coatings exposed to 650 °C in pure steam environment / P.E. Hovsepian et al. // Mat. Chem. and Phys. – 2016; **7. Руденко В.П.** Система управления нанесением сверхтвердых нанослойных вакуумно-дуговых покрытий. / В.П. Руденко, В.А. Столбовой, И.В. Сердюк, К.Г. Картазов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Т. 6/1(48). – С. 66–69; **8. Игнатович С.Р.** Универсальный микро/нано-индентометр «Микрон-гамма» / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев // Заводская лаборатория. – 2011. – Т. 77, № 1. – С. 61–67; **9. Игнатович С.Р.** Прибор для испытания материалов на микроабразивный износ / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, Е.П. Пугачевская // Проблемы тертя та зношування : зб. наук. праць – К.: НАУ, 2008. – Вип. 50. – С. 50–57; **10. Закиев И.М.** Применение бесконтактного 3D профилометра «micron-beta» для точного определения износа / И.М. Закиев // Проблемы тертя та зношування: зб. наук. праць. – К.: НАУ, 2010. – Вип. 52 – С. 192–198.

Bibliography (transliterated): **1. Manokhin A. S.** Effektivnost' nanoseniya nitridnykh pokrytyiy na instrumenty iz PCBN po dannym zarubezhnykh istochnikov / A. S. Manokhin // Sovremennyye problemy proizvodstva i remonta v promyshlennosti i na transporte: Mat. mezhdunarod. nauch.-tekhn. seminara, 22–26 fevralya 2016, g. Svalyava, Karpaty. – K.: ATM Ukrainy, 2016. – S. 168–170.; **2. Sveina S.** Scratch adhesion characteristics of PVD TiAlN deposited on high speed steel, cemented carbide and PCBN substrates / S. Sveina, J. M. Andersson, R. M'Saoubi, M. Olsson // Wear. – 2013. – 308. – R. 133–141; **3. Vereshchaka A. S.** Nanorazmernyye mnogoslavno-kompozitsionnyye pokrytyiya dlya povysheniya iznosostoykosti i rabotosposobnosti tverdosplavnykh kontsevykh frez / A. S. Vereshchaka, A. A. Vereshchaka, YU. I. Bublikov, M. G. Oganyan // Rezaniye i instrumenty v tekhnologicheskikh sistemakh. – 2014. – Vyp. 84. – S. 26–42; **4. Uhlmann E.** Investigation of wear resistance of coated PcBN turning tools for hard machining / E. Uhlmann, H. Riemer, D. Schrüter et al. // Inter. J. of Refract. Met. and Hard Mat. – 2018. – Vol. 72. – P. 270–275. **5. Beresnev V. M.** Printsipy sozdaniya plazmennykh mnogokomponentnykh mnogofunktsional'nykh pokrytyiy s vysokimi ekspluatatsionnymi svoystvami : dis. dokt. tekhn. nauk / V. M. Beresnev; Khar'kovskiy natsional'nyy universitet im. V. N. Karazina, 2006. **6. Hovsepian P. E.** Performance of HIPIMS deposited CrN/NbN nanostructured coatings exposed to 650 °C in pure steam environment / P. E. Hovsepian et al. // Mat. Chem. and Phys. – 2016; **7. Rudenko V. P.** Sistema upravleniya nanoseniyem sverkhтвердыkh нанослоєnykh vakuumno-dugovykh pokrytyiy. / V. P. Rudenko, V. A. Stolbovoy, I. V. Serdyuk, K. G. Kartmazov // Vostochno-yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – 2010. – Т. 6/1(48). – С. 66–69; **8. Ignatovich S. R.** Universal'nyy mikro/nano- indetometr «Mikron-gamma» / S. R. Ignatovich, I. M. Zakiyev // Zavodskaya laboratoriya. – 2011. – Т. 77, № 1. – С. 61–67; **9. Ignatovich S. R.** Pribor dlya ispytaniya materialov na mikroabrazivnyy iznos / S. R. Ignatovich, I. M. Zakiyev, Ye. P. Pugachevskaya // Problemi ter'tya ta znoshuvannya : zb. nauk. prats' – K.: NAU, 2008. – Vyp. 50. – С. 50–57; **10. Zakiyev I. M.** Primeneniye beskontaktnogo 3D profilometra «micron-beta» dlya tochnogo opredeleniya iznosa / I. M. Zakiyev // Problemi ter'tya ta znoshuvannya: zb. nauk. prats'. – K.: NAU, 2010. – Vyp. 52 – S. 192–198.

Надійшла до редколегії 25.06.2018