

Инструмент, порошки, пасты

УДК 621.9.02

**С. А. Клименко^{1,*}, С. Ан. Клименко¹, А. С. Манохин¹,
В. М. Береснев²**

¹Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля
НАН Украины, г. Киев, Украина

²Харьковский национальный университет им. В. М. Каразина,
г. Харьков, Украина

**atmu@ism.kiev.ua*

Особенности применения режущих инструментов из поликристаллического кубического нитрида бора с защитным покрытием

Представлены результаты исследований работоспособности режущего инструмента из поликристаллического сверхтвердого материала на основе кубического нитрида бора с защитным покрытием. Предложена гипотеза повышения стойкости режущего инструмента при точении закаленной стали за счет снижения температуры в зоне резания и проанализирован требуемый для этого комплекс физико-механических свойств защитного покрытия. Исследовано защитное покрытие на основе нитрида бора в аморфном состоянии, которое выполняет роль твердой смазки в зоне контакта инструмента со стружкой, снижает уровень температуры в контактной зоне за счет уменьшения длины контакта и силы резания, обеспечивает повышение стойкости и надежности инструмента, особенно на этапе приработки.

Ключевые слова: *режущий инструмент, поликристаллический кубический нитрид бора, защитное покрытие с аморфно-кристаллической структурой, температура резания, стойкость инструмента, точение, закаленная сталь.*

ВВЕДЕНИЕ

Процесс резания закаленных сталей инструментами из поликристаллического кубического нитрида бора (ПКНБ) сопровождается температурами 1100–1200 °С, интенсивным протеканием сложных механо-химических процессов контактного взаимодействия в зоне резания, что существенно влияет на качество обработанной поверхности, производительность обработки и стойкость инструмента.

© С. А. КЛИМЕНКО, С. АН. КЛИМЕНКО, А. С. МАНОХИН, В. М. БЕРЕСНЕВ, 2017

Анализ тенденций развития режущих инструментов с ПКНБ показывает, что одним из наиболее эффективных методов снижения температуры в зоне резания и интенсивности протекания химических реакций взаимодействия является нанесение защитных покрытий на рабочие поверхности инструмента. Использование инструментов с защитными покрытиями позволяет управлять условиями формирования и свойствами поверхностного слоя инструмента. Благодаря изменению физико-механических и теплофизических свойств, защитные покрытия могут существенно улучшить эксплуатационные свойства инструмента. В целом наличие на поверхности режущего инструмента из ПКНБ защитного покрытия со свойствами, отличающимися от свойств материала основы, дает возможность кардинально изменить механизм контактного взаимодействия между инструментом и обрабатываемым материалом, увеличить сопротивление контактных участков инструмента макро- и микроразрушениям, обеспечить высокоскоростную обработку при относительно невысоких температурах резания и уменьшить интенсивность химического взаимодействия в зоне резания.

Широкое применение защитных покрытий для повышения работоспособности инструментов из ПКНБ началось не так давно, что связано с тем, что материалы защитных покрытий, в большинстве случаев, имеют физико-механические характеристики, превышающие аналогичные для материалов инструментальной основы. По данным, представленным в каталогах известных производителей режущих инструментов и в технической литературе, в качестве покрытий для инструментов из ПКНБ рекомендуется использовать материалы, такие же, как и для инструментов из быстрорежущих сталей и твердых сплавов.

Для минимизации износа режущих инструментов в результате снижения интенсивности адгезионного взаимодействия с обрабатываемым материалом используются покрытия TiN, TiAlN, TiSiN, в результате химического взаимодействия – NbN [1], а для снижения интенсивности окислительных процессов – покрытие на основе Al₂O₃.

В настоящее время наиболее часто используют в качестве износостойких покрытий для инструментов из ПКНБ покрытия на основе нитрида титана TiN, нанесенного как с помощью химических, так и физических методов осаждения. Свойства такого покрытия очень сильно зависят от количества азота в нитриде и от скорости осаждения покрытия. При высоких скоростях осаждения образуется искаженная структура, при низких – чешуйчатая, что негативно сказывается на эксплуатационных свойствах композита. Кроме того, большая (20–40 ГПа) микротвердость TiN является следствием высоких (~ 10–12 ГПа) внутренних напряжений [2, 3]. Еще одним существенным недостатком, ограничивающим применение такого покрытия в инструментальном производстве, является его низкая окислительная стойкость – при нагреве свыше 550 °С на поверхности покрытия TiN формируется хрупкий, с низкой адгезией, слой оксида титана, который резко уменьшает износостойкость покрытия [2].

Применение двухслойных покрытий, состоящих из последовательно нанесенных слоев карбида титана TiC или карбонитрида титана TiCN и тонкого поверхностного слоя оксида алюминия Al₂O₃, позволяют добиться повышения трещиностойкости, высокой ударной прочности, повышения микротвердости, уменьшения уровня внутренних напряжений, а также повышения стойкости к окислению. Однако повышение микротвердости таких покрытий ведет к потере пластичности и, как следствие, к разрушению и отслаиванию

покрытия от инструментальной основы в условиях эксплуатационного нагружения.

Карбидные и карбонитридные двухэлементные покрытия имеют меньшую прочность сцепления с основой инструмента по сравнению с одноэлементными покрытиями [4], что вызывает необходимость разработки трехслойного покрытия, нижний шар которого обладает высокой адгезионной активностью к инструментальной основе. Однако применение таких покрытий является не всегда экономически целесообразным из-за высокой стоимости и сложности нанесения.

Проанализировав вышеизложенное, можно сделать вывод, что при использовании защитных покрытий для инструментов из ПКНБ зачастую учитываются только физико-механические свойства покрытия, при этом не учитываются специфические явления на контактных участках инструмента и механизм контактирования инструмента с обрабатываемым материалом.

Целью настоящего исследования была разработка эффективного защитного покрытия для инструмента из ПКНБ и изучение эксплуатационных показателей инструмента с таким покрытием.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование закономерностей процесса резания проводили при точении закаленных сталей марок ШХ15 (60–62 HRC) и ХВГ (50–55 HRC). Инструменты оснащали режущими пластинами из ПКНБ марки “борсинит” производства Института сверхтвердых материалов им. В. М. Бакуля НАН Украины (ИСМ), твердостью 36–40 ГПа.

Защитное покрытие на инструмент наносили в Харьковском национальном университете им. В. М. Каразина вакуум-дуговым осаждением на установке, оснащенной двумя магнетронами и автономным источником питания магнетронной системы. Использовали мишень, спрессованную из порошков кубического нитрида бора марки “кубонит” зернистостью 0,5/0. Осаждения выполняли при давлении аргона $p_{Ar} = 2 \cdot 10^{-1}$ Па, токе 2,0 А, напряжении в разряде 500 В, время осаждения было 35 мин. Толщина сформированного покрытия – ~ 6,0 мкм. Твердость и модуль Юнга защитного покрытия определяли методом алмазного индентирования.

Коэффициент теплопроводности и теплоемкости защитного покрытия определяли методом дифференциальной сканирующей калометрии на комплексе приборов TA Instruments DSC Q2000 в Институте химии высокомолекулярных соединений НАН Украины.

Оценку фрикционных свойств покрытия проводили с использованием информационно-испытательной системы Friction Wear Test System в Национальном авиационном университете (НАУ), по схеме трения вращающегося контробразца (закаленная сталь ШХ15, толщина – 3 мм, диаметр – 30 мм) по неподвижной плоской поверхности режущей пластины из ПКНБ. Скорость вращения контробразца поддерживали постоянной и варьировали в диапазоне 0,1–1,5 м/с. В качестве характеристики износа была принята средняя глубина дорожки трения на поверхности пластин, которую измеряли лазерным сканирующим профилографом-профилометром ЛСПП в НАУ.

Микроскопические исследования контактных участков инструмента выполняли в ИСМ с помощью сканирующего электронного микроскопа Zeiss EVO 50XVP фирмы “Carl Zeiss”, Германия, с энергодисперсионным анализатором рентгеновских спектров INCA450 с детектором INCAPentaFETx3 и системой HKL CHANNEL-5 для дифракции отраженных электронов.

Составляющие силы резания измеряли универсальным динамометром УДМ-600, температуру резания определяли на основе экспериментально-расчетного подхода решением обратной задачи теплопроводности с использованием резца, державка которого оснащена двумя хромель-алюмелевыми термопарами [5].

Стойкостные исследования проводили при безударном точении закаленных сталей ШХ15 и ХВГ инструментами с ПКНБ без покрытия и с защитным покрытием.

РАБОЧАЯ ГИПОТЕЗА О ЭФФЕКТИВНОМ ЗАЩИТНОМ ПОКРЫТИИ НА ИНСТРУМЕНТЕ ИЗ ПКНБ

Исследованиями [6] установлено, что износ режущих инструментов с ПКНБ при обработке закаленных сталей с высокой скоростью резания связан с протеканием химических реакций взаимодействия между инструментальным и обрабатываемым материалом с образованием жидкой фазы из продуктов взаимодействия. Данные, полученные при моделировании взаимодействия $cBN-(Fe-Ni-Cr)$ показали, что протекание химических реакций взаимодействия проходит в два этапа. На первом этапе при температуре $1380\text{ }^{\circ}C$ начинаются химические реакции, в результате которых образуются бориды типа $(Fe, Ni, Cr)_x B_y$, на втором этапе при контактном плавлении при температуре $1177\text{ }^{\circ}C$ образуются эвтектики типа $Fe-Fe_2B$ и формируется жидкая фаза (рис. 1).



Рис. 1. Модельная схема химического взаимодействия инструмента из ПКНБ с $Fe-Ni-Cr$.

Наличие повторного нагрева в зоне резания и температуры, достаточной для начала протекания химических реакций взаимодействия, связано с тем, что на микронеровностях на поверхности инструмента при контакте со стружкой имеют место нагрузки, достаточные для протекания интенсивной пластической деформации материала, которая сопровождается возникновением температурных вспышек.

Таким образом, на вершинах контактирующих микронеровностей, а также на участках адгезионного взаимодействия имеет место совокупность тепловых импульсов. Период существования температурных вспышек малый и определяется размерами зоны контакта, физико-механическими характеристиками контактной пары, а также скоростью резания. Размер, координаты размещения и время появления температурных вспышек имеют случайный характер, что затрудняет их экспериментальную оценку.

Учитывая наличие в зоне контакта температурных вспышек, которые определяют интенсивность протекания химических реакций образования соединений на основе бора, повышение стойкости инструмента с ПКНБ связано с созданием условий, при которых уменьшается тепловыделение на фактиче-

ских пятнах контакта, что обуславливает уменьшение интенсивности образования соединений $(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Cr})_x\text{B}_y$ и формирования на их основе легкоплавких эвтектик.

Эффективным методом, позволяющим уменьшить температуру в зоне контакта и интенсивность протекания химических реакций взаимодействия, является нанесение на рабочие поверхности инструмента покрытий. Как отмечалось выше, чаще всего в качестве материала покрытий используют нитриды, оксиды и карбиды тугоплавких металлов, которые в большинстве случаев имеют более высокие физико-механические свойства по сравнению с инструментальной основой. В слое покрытия формируются значительные внутренние напряжения вследствие разности коэффициентов температурного расширения и высокой неоднородности поликристаллических покрытий в приграничной с основой зоне, что в условиях термобарического нагружения в зоне резания приводит к появлению трещин и разрушению покрытия.

Учитывая вышесказанное, защитное покрытие для инструментов из ПКНБ должно характеризоваться рядом свойств: меньшим значением твердости по сравнению с инструментальной основой, что обеспечивает снижение уровня внутренних остаточных напряжений и хрупкости покрытия; меньшим значением модуля Юнга, что позволяет получить материал покрытия в виде твердой смазки с низкой упругостью; низким коэффициентом трения для уменьшения термобарической нагрузки на рабочие участки инструмента.

Снижение внутренних напряжений термического характера в покрытии достигается за счет использования материала, который близок по своему химическому составу к инструментальной основе, что позволяет уменьшить разницу коэффициентов температурного расширения. Известно, что материалы в аморфном состоянии не имеют дальнего порядка построения атомов, поэтому однородность структуры этих материалов проявляется в отсутствии таких дефектов как дислокации, поры, включения и т. д. в сравнении с поликристаллическими материалами, в связи с чем целесообразно использовать материал покрытия в аморфном состоянии.

Из анализа состава, свойств и опыта использования покрытий из оксидов, нитридов, карбидов различных тугоплавких металлов нано- и поликристаллической структуры сделан вывод, что наиболее полно вышеуказанным требованиям будет отвечать покрытие на основе нитрида бора с аморфной структурой $\text{BN}_{\text{ам}}$.

ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЯ

Рентгеноструктурные исследования защитного покрытия показали, что на дифракционном спектре покрытия $\text{BN}_{\text{ам}}$ отсутствуют острые дифракционные максимумы, характерные для кристаллической структуры, что говорит о разупорядочении структуры покрытия. Покрытие из $\text{BN}_{\text{ам}}$ имеет аморфную структуру с широким “галом” с центром вблизи угла дифракции $2\theta \approx 43^\circ$ (рис. 2).

В исследованных образцах с переходной между кристаллической и аморфной структурами для определения области упорядочения можно использовать соотношение [7]:

$$R_m \approx 10/\Delta s,$$

где Δs – ширина первой широкоугольной “газообразной” кривой в координатах интенсивность–вектор рассеяния.

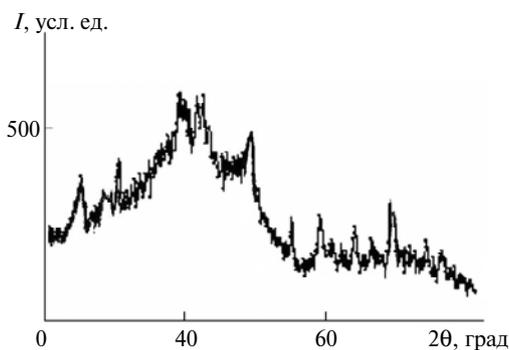


Рис. 2. Спектрограмма покрытия VN_{ам}.

Расчет по приведенному соотношению для образца с покрытием VN_{ам} показывает, что размер области упорядочивания примерно равен $R_m = 1$ нм.

Исследования физико-механических характеристик покрытия методом алмазного индентирования, показали, что исследуемый материал характеризуется относительно низкими модулем Юнга (200–220 ГПа) и твердостью (15 ГПа) (рис. 3).

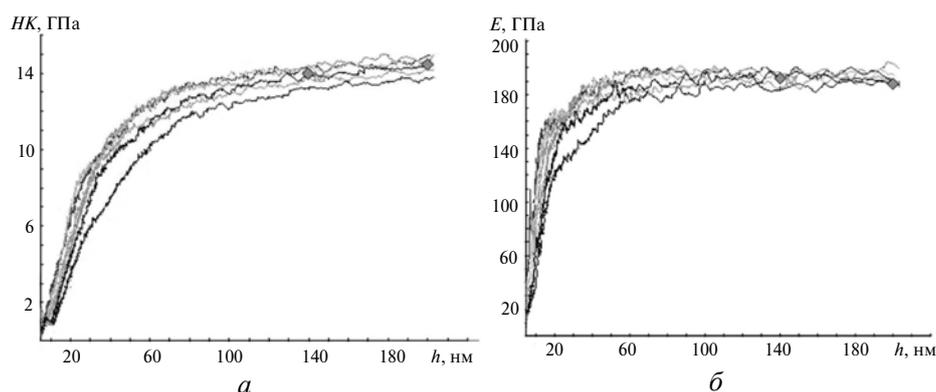


Рис. 3. Твердость (а) и модуль Юнга (б) для покрытия VN_{ам}.

Такие свойства обеспечивают покрытию уменьшение хрупкости и большую пластичность, а в процессе работы позволяют уменьшить абразивное истирание рабочих поверхностей инструмента за счет упругой деформации покрытия при взаимодействии с абразивными частицами из состава обрабатываемого материала.

Коэффициенты теплопроводности λ и теплоемкости покрытия составляют 70 Вт/(м·К) и 800 Дж/(кг·К) соответственно.

Трибологические исследования показали, что защитное покрытие из VN_{ам} имеет низкий коэффициент трения (при скорости контртела $v = 90$ м/мин $\mu = 0,3$) в сравнении с инструментальной основой ($\mu = 0,45$), что связано с отмеченными особенностями его физико-механических свойств (рис. 4).

Благодаря приведенной выше совокупности свойств покрытие играет роль твердой смазки в процессе резания.

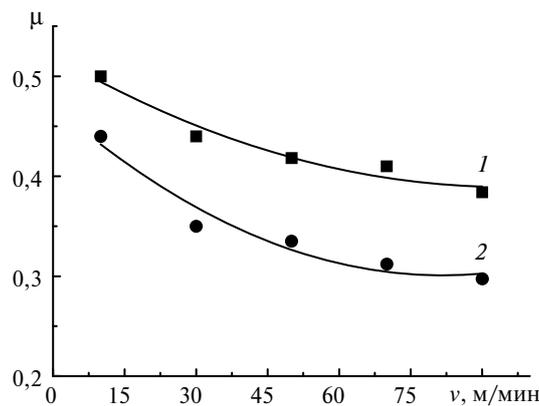


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от скорости вращения контртела: пластина без покрытия (1) и с покрытием $BN_{ам}$ (2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Наличие защитного покрытия на рабочих поверхностях инструмента из ПКНБ приводит к изменению его характеристик в процессе резания – размеров пятна контакта, силы и температуры резания, а также механизма изнашивания инструмента с покрытием $BN_{ам}$.

При исследовании зоны контакта инструмента с покрытием рассматривали такие параметры, как длина контакта L и ширина активного участка режущей кромки b . В результате анализа изображений зоны контакта инструмента с покрытием и без покрытия в режиме фазового контраста (рис. 5) можно отметить существенное уменьшение длины контакта инструмента со стружкой и некоторое увеличение длины активного участка режущей кромки для инструмента с покрытием.

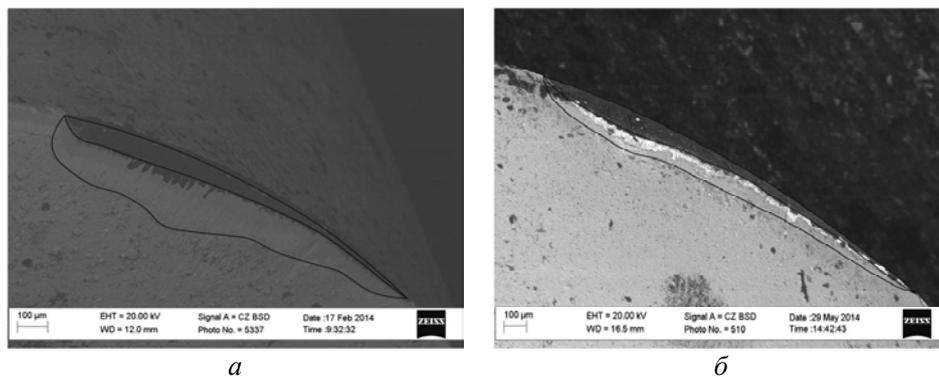


Рис. 5. Зона контакта инструмента без покрытия (а) и с покрытием $BN_{ам}$ (б) (в режиме фазового контраста) при точении стали ШХ15; $v = 1,5$ м/с, $S = 0,12$ мм/об, $t = 0,2$ мм.

Уменьшение длины контакта L стружки с передней поверхностью инструмента при использовании покрытия $BN_{ам}$ имеет место вследствие меньшего значения коэффициента трения на контактных участках инструмента.

По сравнению с инструментом без покрытия, применение покрытия из $BN_{ам}$ позволяет снизить длину контакта во всем исследуемом диапазоне скоростей резания и подач в среднем на 30 % (рис. 6).

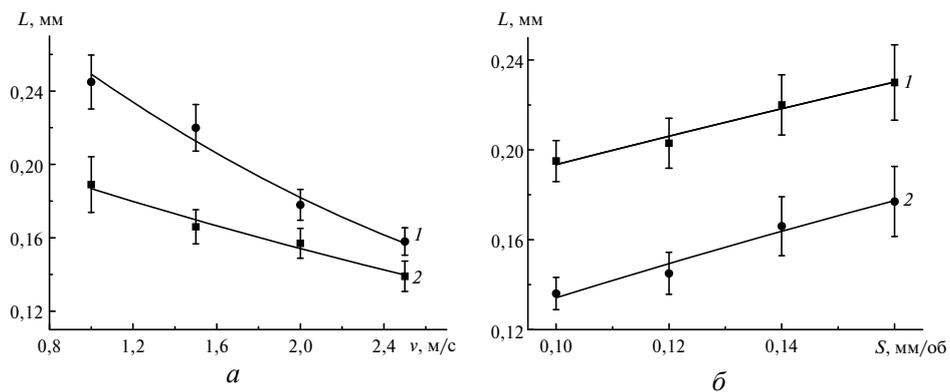


Рис. 6. Длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента без покрытия (1) и с покрытием $BN_{ам}$ (2) в зависимости от скорости резания (a) и подачи (b).

Величина составляющих силы резания является одной из главных показателей процесса резания, которая характеризует фрикционные процессы, протекающие в зоне контакта стружки с инструментом. Экспериментальные исследования составляющих силы резания (P_y, P_z) для инструмента с покрытием $BN_{ам}$ показали, что использование покрытия позволяет снизить составляющие силы резания при увеличении скорости резания и подачи (рис. 7).

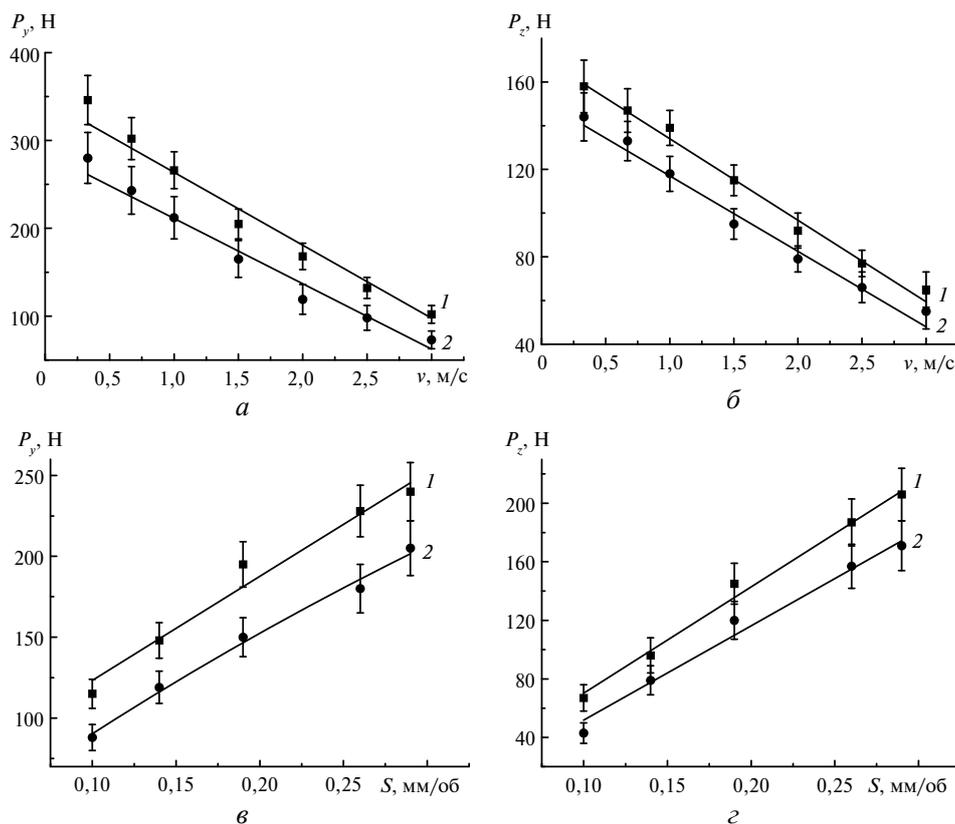


Рис. 7. Зависимость составляющих сил резания P_y и P_z для инструмента без покрытия (1) и с покрытием $BN_{ам}$ (2) от скорости резания (a, b) и подачи ($в, з$).

Снижение составляющих силы резания при наличии покрытия $BN_{ам}$ объясняется меньшим значением коэффициента трения для инструмента с покрытием, что приводит к снижению степени деформации обрабатываемого материала в зоне резания, в результате чего для снятия припуска нужно затратить меньше механической энергии.

По значениям размеров пятна контакта и составляющих силы резания был рассчитан уровень максимальных контактных напряжений, действующих на передней поверхности инструмента с покрытием $BN_{ам}$ и инструмента без покрытия для условий точения стали ШХ15. Анализ результатов расчета напряженного состояния режущего инструмента показывает, что уменьшение размеров зоны контакта и силы резания при использовании покрытия приводит к перераспределению напряжений – изменяется профиль эпюры, а нормальные и касательные напряжения снижаются на 10–15 %.

Изменение условий контакта, уменьшение силы резания и температуры на пятнах вспышки в контактной зоне при использовании покрытия $BN_{ам}$ приводит к изменению средней температуры резания.

Низкий коэффициент трения и модуль Юнга дают возможность предположить, что покрытие играет роль твердой смазки в зоне резания, изменяя тепловую нагрузку на контактных участках инструмента. Температурные исследования показали, что применение покрытия $BN_{ам}$ позволяет уменьшить температуру резания на 15 % при изменении скорости резания (рис. 8, *а*) и подачи (рис. 8, *б*) за счет уменьшения силы резания и длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента.

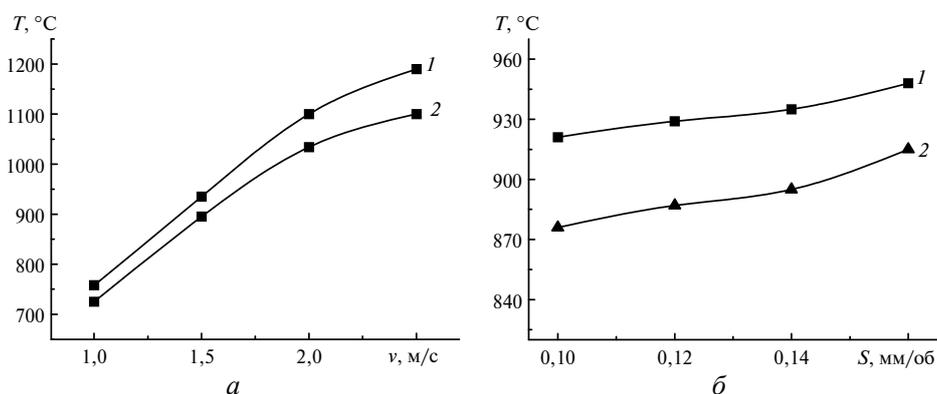


Рис. 8. Зависимость температуры резания от скорости ($S = 0,14$ мм/об, $t = 0,2$ мм) (*а*) и подачи ($v = 1,5$ м/с, $t = 0,2$ мм) (*б*) при точении стали ШХ15: инструмент без покрытия (1) и с покрытием $BN_{ам}$ (2).

Распределение температуры резания в режущем клине показывает, что в тело инструмента с покрытием (рис. 9, *а*) поступает меньшее количество тепла, чем в инструмент без покрытия (рис. 9, *б*), что связано с уменьшением длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента.

Изменение фрикционных и термобарических условий нагружения режущего инструмента из ПКНБ при использовании покрытия с $BN_{ам}$, приводит к изменению интенсивности и характера изнашивания режущего инструмента с покрытием.

Для изучения механизма изнашивания инструмента с покрытием $BN_{ам}$ были проведены исследования его контактных участков после точения стали ХВГ в зависимости от скорости резания (рис. 10).

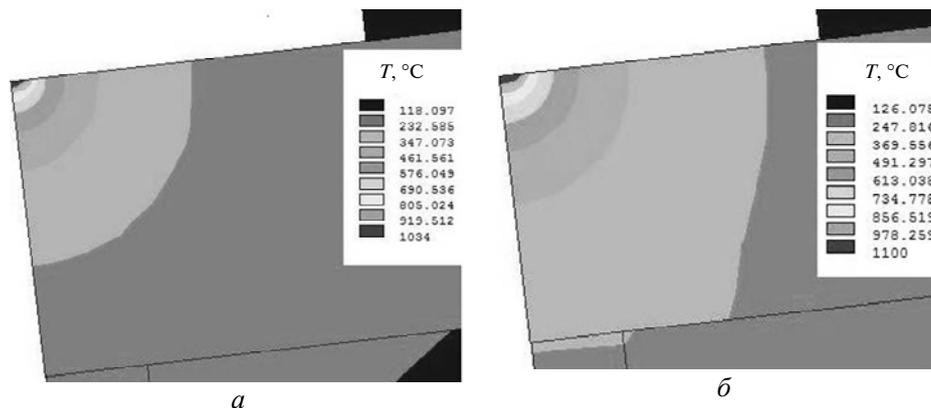


Рис. 9. Распределение температуры в режущем клине при точении стали ШХ15 ($v = 1,5$ м/с, $S = 0,14$ мм/об, $t = 0,2$ мм): инструмент с покрытием $BN_{ам}$ (а) и без покрытия (б).

При точении инструментом без покрытия ($v = 1,5$ м/с) режущая кромка подвергается интенсивному абразивному истиранию, следствием которого является появление впадин и выступов на контактных участках передней и задней поверхностей режущего инструмента (рис. 10, а). Их появление связано с наличием в обрабатываемом материале твердых включений (карбидов), а также самоизнашиванием, вызванным действием свободных зерен инструментального материала вследствие разрушения режущей кромки инструмента.

Кроме того, характерный вид борозд объясняется и тем, что при встрече режущей кромки с твердыми частицами в обрабатываемом материале происходит разрушение последней на несколько частей, которые действуют по передней и по задней поверхности инструмента как микрорезцы.

Наиболее интенсивно такие явления проявляются при небольших (до 1,5 м/с) скоростях резания, поэтому износ контактных участков инструмента без покрытия имеет абразивный характер.

С увеличением скорости резания до 2,5 м/с меняются условия контакта инструментального и обрабатываемого материалов, что приводит к интенсивному тепловому воздействию на режущий инструмент (рис. 10, б).

Изображения в режиме фазового контраста (см. рис. 10, в, г) показывают, что в зоне резания, в результате протекания адгезионных процессов схватывания и химических реакций, на контактных участках инструмента образуются налипы материала из продуктов взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов.

При использовании покрытия $BN_{ам}$ при скорости резания до 1,5 м/с (рис. 10, д) на изображениях изношенных участков нет четко выраженных характерных борозд абразивного износа как по передней, так и по задней поверхностям инструмента. Это дает основания утверждать, что покрытие выступает в виде твердого лубриканта, защищающего контактные участки инструмента от воздействия твердых абразивных частиц, т. е. уменьшается абразивное истирание контактных участков инструмента.

При увеличении скорости резания до 2,5 м/с (см. рис. 10, е) режущий инструмент с покрытием менее интенсивно подвергается тепловому воздействию, что связано с уменьшением температуры резания и длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента. Последнее приводит к тому, что большее количество тепла, которое образуется в зоне резания, выносится стружкой, тем самым снижается интенсивность нагрева контактных участков инструмента.

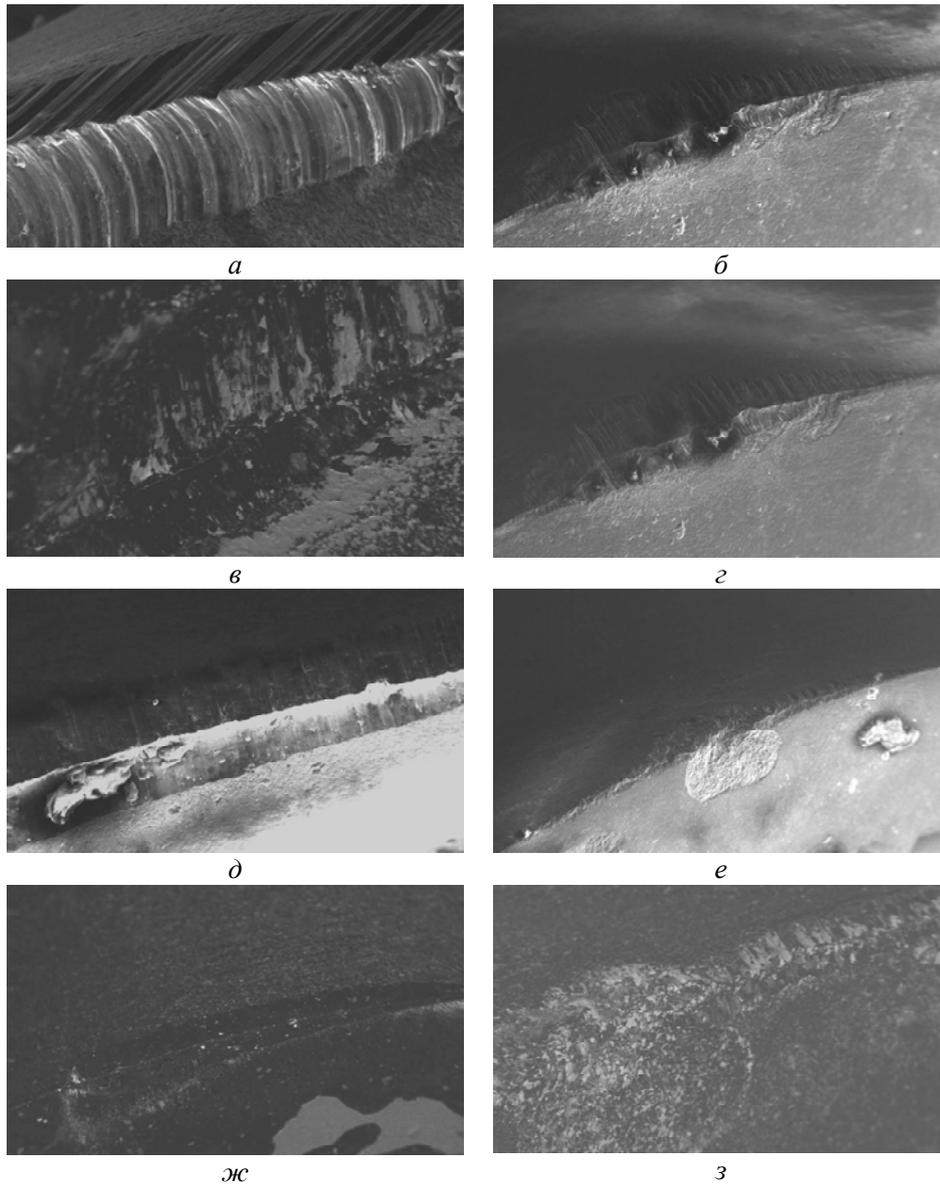


Рис. 10. Изношенные участки инструмента без покрытия (а–г) и с покрытием $BN_{ам}$ (д–з) ($v = 1,5$ (а, д) и $2,5$ (б, е) м/с) после точения стали ХВГ ($S = 0,12$ мм/об, $t = 0,2$ мм); в, г, ж, з – изображение в режиме фазового контраста.

Изображения изношенных участков инструмента с покрытием, полученных в режиме фазового контраста (см. рис. 10, ж, з), показывают отсутствие наливов застывших продуктов жидкой фазы как по передней, так и по задней поверхности инструмента, что связано с уменьшением интенсивности протекания химических реакций взаимодействия в зоне резания и коэффициента трения.

Проверка работоспособности режущих инструментов с покрытием $BN_{ам}$ показала, что при безударной токарной обработке закаленной стали ШХ15 наличие защитного покрытия на рабочих поверхностях инструмента позволяет повысить стойкость (рис. 11) и уменьшить скорость изнашивания (рис. 12) инструментов на 22–25 % по сравнению с аналогичными инструментами без покрытия.

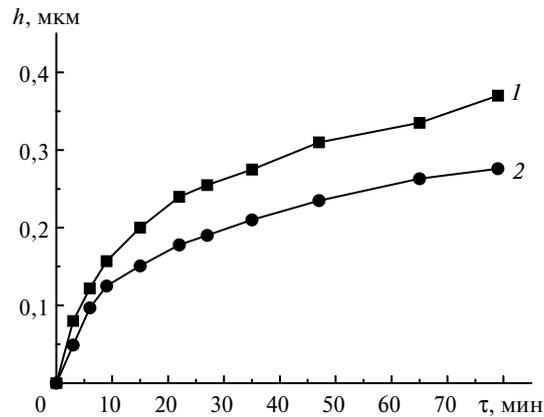


Рис. 11. Зависимость износа по задней поверхности от времени резания при точении стали ШХ15: инструмент без покрытия (1) и с покрытием $VN_{ам}$ (2); $v = 2,0$ м/с, $S = 0,14$ мм/об, $t = 0,2$ мм.

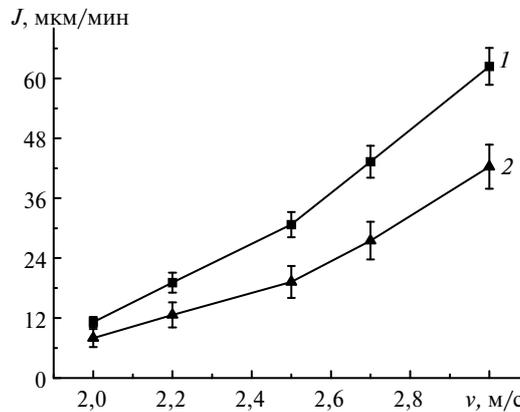


Рис. 12. Влияние скорости резания на скорость изнашивания инструмента при точении стали ШХ15: инструмент без покрытия (1) и с покрытием $VN_{ам}$ (2); $S = 0,14$ мм/об, $t = 0,2$ мм.

ВЫВОДЫ

На основе предложенной гипотезы повышения стойкости режущих инструментов с ПКНБ при точении закаленных сталей, основанной на уменьшенных температуры в зоне резания, разработано и нанесено на рабочие участки инструмента покрытие на основе нитрида бора в аморфном состоянии, которое обеспечивает снижение коэффициента трения и характеризуется меньшими значениями твердости и модуля Юнга по сравнению с инструментальной основой.

Исследования физико-механических, теплофизических и трибологических свойств показали, что материал покрытия характеризуется твердостью 15 ГПа, модулем Юнга 200–220 ГПа, коэффициенты теплопроводности λ , теплоемкости c и трения μ по стали ШХ15 составляют 70 Вт/м·К, 800 Дж/кг·К и 0,3 соответственно.

Установлено, что наличие защитного покрытия на рабочих поверхностях инструмента приводит к уменьшению общей длины контакта при увеличении скорости резания и подачи, что связано с уменьшением коэффициента трения.

Покрытие из $VN_{ам}$ выполняет роль твердой смазки в зоне контакта стружки с передней поверхностью инструмента, снижая уровень температуры резания на 15 % за счет уменьшения длины контакта со стружкой и силы реза-

ния, что позволяет повысить стойкость и надежность инструмента, особенно на этапе приработки.

Применение покрытия с $\text{BN}_{\text{ам}}$ позволяет повысить стойкость инструмента при точении закаленных сталей на и уменьшить скорость изнашивания на 22–25 % за счет изменения условий термобарического нагружения рабочих поверхностей инструмента, при токарной обработке сталей твердостью 55–62 HRC по сравнению с аналогичными инструментами без покрытия.

Наведено результати досліджень працездатності різального інструмента з полікристалічного надтвердого матеріалу на основі кубічного нітриду бору з захисним покриттям. Запропоновано гіпотезу підвищення стійкості різального інструмента при точінні загартованої сталі за рахунок зниження температури в зоні різання і виконано аналіз потрібного для цього комплексу фізико-механічних властивостей захисного покриття. Розглянуто захисне покриття на основі нітриду бору в аморфному стані, яке виконує роль твердого змащування в зоні контакту інструмента зі стружкою, знижує рівень температури в контактній зоні в результаті зниження довжини контакту і сили різання, забезпечує підвищення стійкості та надійності інструменту, особливо на етапі припрацювання.

Ключові слова: *різальний інструмент, полікристалічний кубічний нітрид бору, захисне покриття з аморфно-кристалічною структурою, температура різання, стійкість інструмента, точіння, загартована сталь.*

The results of the investigations on the efficiency of cutting tools from polycrystalline superhard materials based on cubic boron nitride with a protective coating. A hypothesis is proposed for the increase of the cutting tool life in turning hardened steel due to a decrease of the temperature in the cutting zone and a complex of physico-mechanical properties of the protective coating required for this is analyzed. A protective coating of boron nitride is considered in the amorphous state that plays a role of a solid lubricant in the zone of the tool contact with cutting chips, decreases the temperature in the contact zone through the reduction of the contact length and cutting force, ensures an increase of the tool life and reliability, especially at the stage of the run-in.

Keywords: *cutting tool, polycrystalline cubic boron nitride, protective coating with an amorphous-crystalline structure, cutting temperature, tool life, turning, hardened steel.*

1. Копейкина М. Ю., Клименко С. А., Мельничук Ю. А., Береснев В. М. Повышение работоспособности режущих инструментов, оснащенных ПСТМ на основе КНБ, вакуумно-плазменными покрытиями // Сверхтв. материалы. – 2008. – № 5. – С. 87–97.
2. Дробышевская А. А., Сердюк Г. А., Фурсова Е. В., Береснев В. М. Нанокompозитные покрытия на основе нитридов переходных металлов // Физическая инженерия поверхности. – 2008. – 6, № 1–2. – С. 81–88.
3. Андреев А. А., Шулаев В. М., Горбань В. Ф., Столбовой В. А. Влияние давления азота при осаждении сверхтвердых TiN покрытий на их свойства // Там же. – 2007. – 5, № 3–4. – С. 203–206.
4. Григорьев С. Н., Табаков В. П., Волосова М. А. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента: Моногр. – Старый Оскол: ТНТ. – 2011. – 379 с.
5. Манохин А. С. Температура резания при безвершинном точении закаленных сталей // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Житомир: ЖДТУ, 2009. – Вип. 6. – С. 19–27.
6. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общей ред. Н. В. Новикова. – Т. 5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С. А. Клименко. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ “АЛКОН” НАНУ, 2006. – 316 с.
7. Ватолин Н. А. Дифракционные исследования строения высокотемпературных расплавов. – М.: Наука, 1980. – 188 с.

Поступила 05.10.16