

УДК 621.9.02

**М. Ю. Копейкина, С. А. Клименко, Ю. А. Мельничук,
В. М. Береснев** (г. Киев)

Работоспособность режущего инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ с вакуумно-плазменным покрытием

Представлены результаты исследования повышения работоспособности режущего инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, вакуумно-плазменными покрытиями. Показано, что инструмент с покрытием характеризуется повышенной надежностью на этапе приработки и более высокой стойкостью и позволяет проводить процесс обработки с более высокими режимами резания.

Ключевые слова: *режущий инструмент, ПСТМ, КНБ, вакуумно-плазменное покрытие, режимы резания, стойкость инструмента.*

Исследованию влияния износостойких вакуумно-плазменных покрытий на работоспособность режущего инструмента посвящено достаточно много работ. При этом речь идет, в основном, о режущих инструментах из быстрорежущих сталей [1] и твердых сплавов [2, 3]. Имеются работы, в которых рассматриваются инструменты с рабочей частью из керамики с покрытием [4].

В последнее время в каталогах продукции мировых производителей режущих инструментов и в технической литературе появилась информация об инструментах, оснащенных поликристаллическими сверхтвердыми материалами (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (КНБ) с защитными покрытиями [5—6]. Для минимизации изнашивания режущих инструментов за счет снижения интенсивности адгезионного взаимодействия с обрабатываемым материалом применяются покрытия TiN, TiAlN, TiSiN, а для окислительных процессов — покрытие, содержащее Al₂O₃.

Резцами, оснащенными ПСТМ с покрытием, обрабатывают закаленные стали со скоростями резания на 25 % выше в сравнении с инструментами без покрытий. Такие инструменты рекомендуют также для обработки марганцевых сталей и отбеленного чугуна, а наличие покрытия, кроме повышения стойкости инструмента, облегчает определение величины его износа [7].

Нужно отметить, что для инструментов, оснащенных ПСТМ на основе КНБ, в технической литературе рекомендуют защитные покрытия аналогичные традиционно применяемым для инструментов из быстрорежущих сталей и твердых сплавов. При этом специфику явлений, сопровождающих контактное взаимодействие такого инструмента с обрабатываемой деталью, не учитывают.

Целью настоящей работы было исследование влияния защитных покрытий на работоспособность режущего инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, с учетом особенностей контактного взаимодействия в зоне резания.

Наличие на контактных поверхностях инструмента защитных покрытий приводит к изменению механики и физико-химии контактного взаимодей-

вия инструмента и обрабатываемого изделия. Первое предопределяется перераспределением напряжений на поверхностях инструмента, изменением коэффициента трения и, как следствие, сил и температуры резания. Второе связано с тем, что для обеспечения наиболее оптимальных условий работы режущего инструмента в каждом конкретном случае нужно выбирать такое покрытие, которое обеспечивает минимизацию или отсутствие эффектов, оказывающих наибольшее отрицательное влияние на работоспособность режущего инструмента. Защитное покрытие может выполнять роль пассивного протектора, который препятствует непосредственному контактированию инструментального и обрабатываемого материалов в зоне резания, или играть “активную” роль, изменяя условия химического взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов в зоне резания.

Как показано в [8, 9] в диапазоне практически используемых скоростей резания на износ инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, оказывает влияние химическое взаимодействие инструментального материала с обрабатываемым и элементами окружающей среды в зоне резания, приводящее к образованию соединений типа Me_xV_y , $Me_xV_yO_z$, формированию на их основе легкоплавких эвтектик, их контактному плавлению и удалению жидкой фазы из зон контакта. Химические реакции в зоне резания протекают с выделением свободного азота, превентивное введение которого в контактную область, в соответствии с правилом Ле-Шателье, должно способствовать сдвигу диапазона реакций в более высокотемпературную область.

С учетом указанного выше надо отметить, что повышение работоспособности режущего инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, может быть достигнуто за счет введения в состав покрытия составляющих, которые, без снижения механических свойств последнего, под действием термосиловых условий процесса обработки обеспечивают формирование в зоне резания повышенного парциального давления азота. Взаимодействие с элементами обрабатываемого материала с выделением азота должно происходить при температурах более низких, чем температуры, характерные для взаимодействия с элементами обрабатываемого КНБ.

Анализ теплофизических, механических и химических свойств нитридов и оксидов металлов позволяет предложить трехслойное защитное покрытие $Al_2O_3-NbN-Ti$ (рис. 1). В табл. 1 приведены модули упругости E и сдвига G , плотность ρ , коэффициенты Пуассона ν , термического расширения α , теплопроводности λ и молярная теплоемкость c_p для Al_2O_3 и NbN .

Основная функция верхнего слоя из оксида алюминия — минимизация окисления инструментального материала. Многими исследованиями защитных покрытий на режущих инструментах показано, что наличие на поверхности режущего инструмента тонкого слоя Al_2O_3 существенно снижает степень окисления КНБ и повышает теплостойкость композита покрытие—ПСТМ [10].

Как следует из рассмотрения диаграмм состояния систем $Nb-Me-N$ [11], при взаимодействии нитрида ниобия с Fe и Ni (основой обрабатываемых конструкционных материалов) в широких диапазонах концентраций и температур могут протекать химические реакции с образованием соединений типа $NbMe_x$ ($NbFe_2$, $NbNi_3$) и высвобождением азота N_2 . Как отмечалось выше, наличие в зоне резания свободного азота минимизирует химическое взаимодействие материала поликристалла с элементами из состава обрабатываемого материала. Кроме того, азотная среда минимизирует окисление материала инструмента.

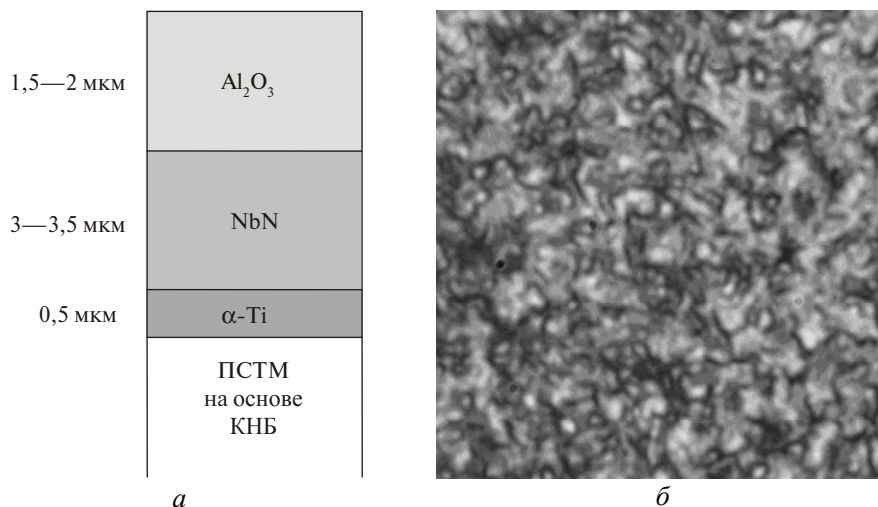


Рис. 1. Архитектура (а) и внешний вид (б) ($\times 1000$) покрытия на режущем элементе из ПСТМ на основе КНБ.

Таблица 1. Физико-механические свойства материалов покрытия

Материал	E , ГПа	G , ГПа	ν	ρ , г/см ³	α , $\times 10^{-6}$ К ⁻¹	λ , Вт/(м·К)	c_p , Дж/(моль·К)
Al ₂ O ₃	400	161	0,24	4,91	8,5	25	36,9—129,3
NbN	400	110	0,26	8,4	6,9 [13]	10,6—16,0	48,3—64,9

Как показано в [3], при нанесении покрытия NbN на подложку из КНБ в покрытии формируются значительные термические напряжения. Для образования качественного покрытия предлагается наносить тонкий промежуточный слой из Ti, который является адгезионно-активным элементом по отношению к кубическому нитриду бора [12], что обеспечивает хорошее сцепление покрытия с ПСТМ на основе КНБ.

Явления, происходящие на поверхности режущего инструмента в зоне контакта с обрабатываемым материалом, связаны с электронным строением материалов и их энергетическим состоянием. При этом особенно значимую роль при резании металлов может играть адгезионное взаимодействие контактирующих материалов. Согласно конфигурационной модели вещества [13], тугоплавкие соединения, из которых состоят покрытия, характеризуются статистическим весом атомных стабильных d^n - и $s^m p^k$ -конфигураций (СВАСК). Чем выше суммарная величина СВАСК d^5 - и $sp^3(s^2 p^6)$ -конфигураций, тем меньше в процессе контактирования материалов участвуют электроны поверхностных атомов и тем ниже концентрация свободных связей на поверхности металлов, а значит ниже адгезионная активность покрытий к обрабатываемому материалу. Нитрид ниобия имеет металлическую составляющую, для которой СВАСК d^5 -конфигурации составляет 76 % и неметаллическую, имеющую СВАСК $s^2 p^6$ -конфигурацию.

Анализ показывает, что в случае обработки сплавов на основе Fe и железоникелевых сплавов, которые содержат Fe со СВАСКами d^5 -конфигурации — 54 % и d^{10} -конфигурации — 46 %, а также Ni, имеющий СВАСК d^5 -

конфигурации — 12 % и d^{10} -конфигурации — 88 %, можно прогнозировать высокую эффективность применения покрытия на основе NbN, особенно при обработке сплавов на основе Fe. Высокие значения СВАСК d^5 -конфигурации нитрида ниобия и обрабатываемых материалов на основе Fe обеспечивают снижение адгезионной активности на контактных поверхностях инструмента в процессе резания.

Это подтверждается данными [1], где экспериментально показано, что NbN характеризуется низким схватыванием с железосодержащими обрабатываемыми материалами.

Покрытие на неперетачиваемые многогранные режущие пластины из ПСТМ на основе КНБ (производство Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев) наносили вакуумно-дуговым методом в лаборатории Научного технологического центра МОН и НАН Украины (г. Харьков) [14]. Анализ покрытия, полученного вакуумно-дуговым методом, показано, что его состав представлен поликристаллической фазой δ -NbN с параметром $a = 0,442$ нм [15].

Чтобы получить представление о контактном взаимодействии инструмента с обрабатываемым материалом в зоне резания выполнены исследования рабочих поверхностей инструментов без покрытия и с различными покрытиями (рис. 2).

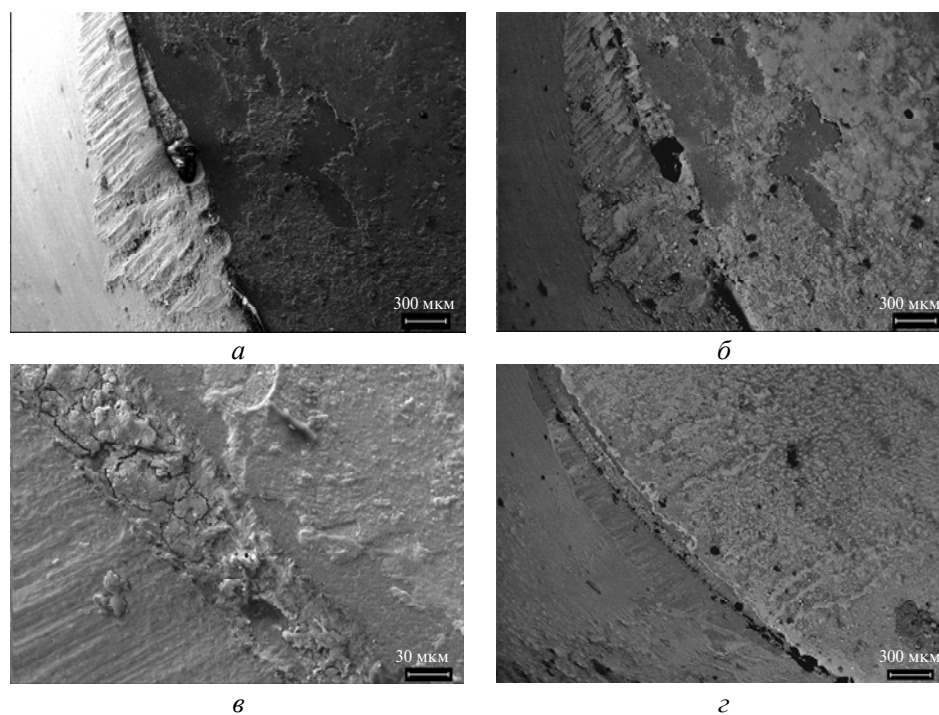


Рис. 2. Изношенные участки инструментов без покрытия (*а, б*) и с покрытием $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—NbN—Ti}$ (*в, г*); *б, г* — изображение в режиме фазового контраста; обрабатываемый материал — сталь ШХ15 (60—62 HRC); $v = 90$ м/мин; $S = 0,1$ м/мин; $t = 0,25$ мм.

Как видно из представленных фотографий, на рабочих поверхностях инструмента без покрытия имеет место интенсивный массоперенос, связанный с налипанием обрабатываемого материала. Анализ фотографий, полученных

в режиме фазового контраста, выявляет интенсивное формирование налета на неконтактных поверхностях инструмента.

На рабочих поверхностях инструмента с защитным покрытием наблюдается износ как по задней, так и по передней поверхностям. Отчетливо видна лунка на передней поверхности инструментов (см. рис. 2).

Следует отметить, что объем лунки заполнен материалом, который, судя по всему, в исходном виде представлял собой жидкую фазу, что свидетельствует о протекании на контактных поверхностях инструмента химических реакций взаимодействия с обрабатываемым материалом и элементами окружающей среды. Однако перенос материала на неконтактные участки инструмента с покрытием выражен в значительно меньшей степени, что связано со снижением интенсивности такого взаимодействия в зоне резания.

Для рассматриваемого инструмента с покрытием практически отсутствует налипание обрабатываемого материала со стороны задней поверхности, что свидетельствует о снижении адгезионного взаимодействия с обрабатываемым материалом.

Результаты наших исследований контактного взаимодействия на поверхностях инструмента позволяют предложить следующий механизм изнашивания инструментов с покрытиями.

Процесс изнашивания режущего инструмента с покрытием разделяется на два этапа.

На первом этапе в результате накопления микродефектов и реализации процесса микроразрушения происходит изнашивание слоя защитного покрытия. Причиной этого является усталостно-механическое взаимодействие на контактных участках инструмента. Некоторое влияние на интенсивность изнашивания оказывает также окислительное действие кислорода воздуха.

В отличие от инструмента без покрытия, для которого характерным является изменение механизма изнашивания (рис. 3) из-за интенсификации при высоких скоростях (температурах) химического взаимодействия с обрабатываемым материалом и элементами окружающей среды и, как следствие, реализации на контактных поверхностях жидкостного трения, для инструмента с покрытием изменение скорости резания способствует снижению составляющей силы резания P_z , оказывая меньшее влияние на составляющую P_y , т. е. не оказывает влияния, связанного с изменением механизма изнашивания материала режущего инструмента.

Введение в состав покрытия Al_2O_3 способствует снижению окисления материала рабочих поверхностей инструмента при высоких температурах.

Второй этап процесса изнашивания инструмента происходит в условиях, когда слой покрытия на части контактной поверхности удален и во взаимодействии с обрабатываемым материалом участвует непосредственно материал ПСТМ. В этих условиях реализуется химическое взаимодействие между инструментальным и обрабатываемым материалами с учетом действия элементов окружающей среды, на контактных поверхностях инструмента появляется жидкая фаза и износ инструмента интенсифицируется.

Применение в качестве элемента покрытия NbN вносит некоторые особенности в протекание второго этапа процесса изнашивания инструмента. Введение в состав покрытия на ПСТМ на основе КНБ нитрида ниобия обеспечивает появление на контактных участках инструмента свободного азота при температурах, когда нитрид бора с обрабатываемым металлом еще не взаимодействует. В этом случае и на втором этапе механизм изнашивания в большей степени определяется механическими свойствами инструментально-

го композита и связан с его абразивным и адгезионным разрушением, а его химическая составляющая минимизируется.

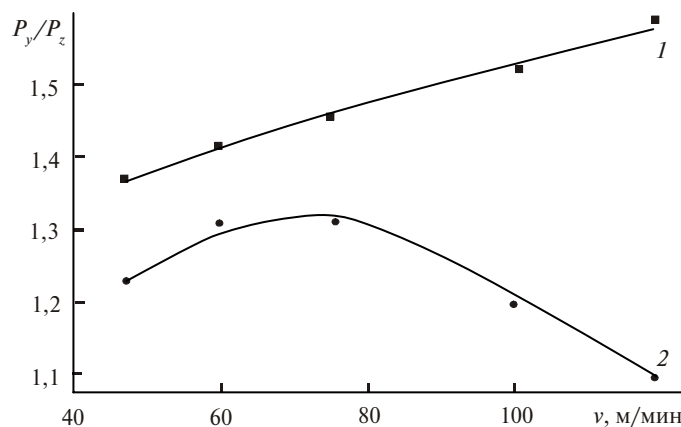


Рис. 3. Зависимость отношения сил P_y/P_z от скорости резания инструмента с покрытием (1) и без покрытия (2); обрабатываемый материал — сталь ШХ15 (60—62 HRC); $S = 0,1$ мм/об; $t = 0,25$ мм.

Таким образом, процесс изнашивания инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ с покрытием $Al_2O_3-NbN-Ti$, обусловлен комплексом механизмов: абразивным, адгезионным, окислительным, а также за счет эвтектическим плавлением продуктов взаимодействия в зоне обработки.

Анализ результатов численного моделирования напряженного состояния режущих инструментов, оснащенных ПСТМ без покрытия и с покрытием, обусловленного силовым нагружением в процессе точения закаленной стали ШХ15 (60—62 HRC) (круглая пластина RNMN 070300T; $\gamma = -10^\circ$; $\alpha = 10^\circ$), показывает, что нанесение защитного покрытия $Al_2O_3-NbN-Ti$ снижает нормальные и касательные напряжения на передней поверхности инструмента на 25—30 % (рис. 4). На задней поверхности напряжения также уменьшаются, хотя и не столь значительно.

Для проверки работоспособности режущих инструментов с покрытиями проведена серия лабораторных и производственных экспериментов по обработке различных материалов. Результаты исследований приведены в табл. 2, 3 и на рис. 5, 6.

Как видно из результатов исследований, применение защитных покрытий на режущих инструментах, оснащенных ПСТМ на основе КНБ, позволяет снизить скорость их изнашивания:

- при чистовой обработке закаленных сталей (55—62 HRC) — на 25—30 %;
- при обработке наплавленной нержавеющей стали — на 20 %;
- при обработке легированного чугуна — на 10 %;
- при обработке твердых сплавов группы ВК — на 25 %.

Эффективность применения покрытий увеличивается с ростом скорости резания.

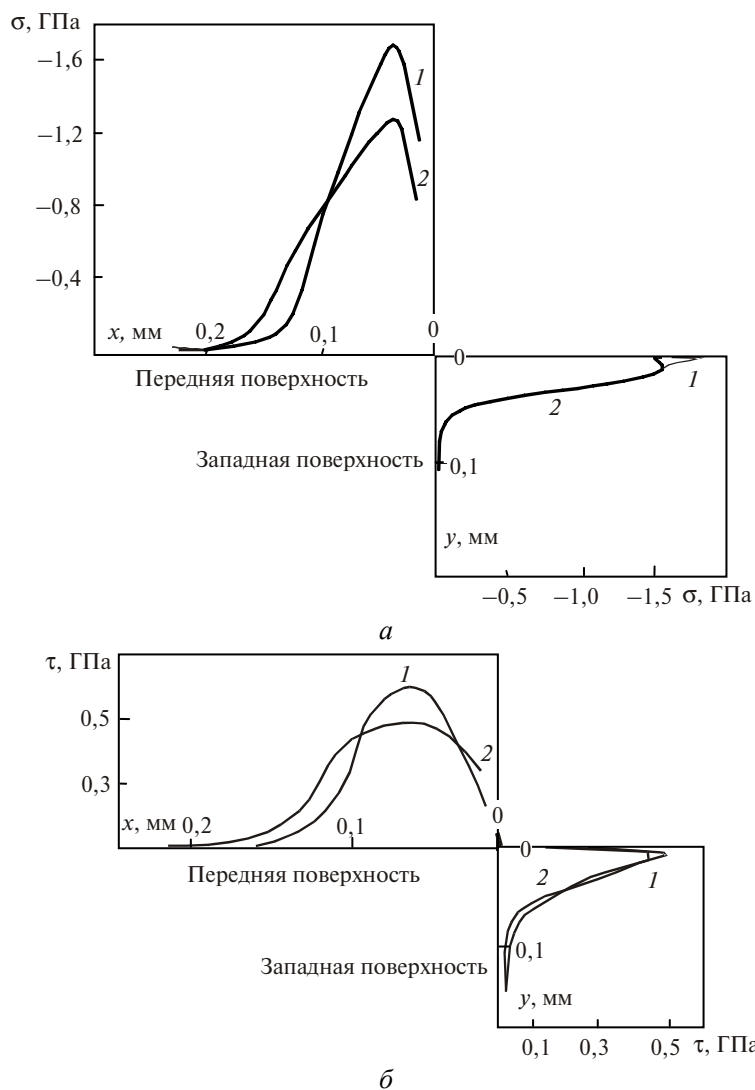


Рис. 4. Распределения нормальных (а) и касательных (б) силовых напряжений по рабочим поверхностям инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, без покрытия (1) и с покрытием $Al_2O_3-NbN-Ti$ (2).

Таблица 2. Износ по задней поверхности инструментов без покрытия и с покрытием при точении стали ШХ15

Инструмент	v , м/мин	h_3 , мм, при работе ($S = 0,05$ мм/об, $t = 0,25$ мм) в течение, мин											
		2	4	5	6	8	10	12	14	15	16	20	29
Без покрытия	110	0,025	0,05	—	0,08	0,10	0,15	0,20	0,27	—	—	—	—
С покрытием	110	0,025	0,05	—	0,07	0,08	0,10	0,15	0,20	—	0,25	—	—
	88	—	—	0,05	—	—	0,10	—	—	0,20	—	0,25	0,30

Таблица 3. Скорость изнашивания инструментов без покрытия и с покрытием

Инструмент	Обрабатываемый материал, марка	Режимы резания			J, мкм/мин
		v, м/мин	S, мм/об	t, мм	
Без покрытия	Сталь ХВГ 55 HRC	165	0,09	0,25	33,0
		180			75,7
		208			87,9
С покрытием		165			28,7
		180			30,3
		208			64,0
Без покрытия	Сталь ШХ15 62 HRC	88	0,05	0,25	10,3
		110			18,2
		140			31,8
		180			50,0
С покрытием		88			11,9
		110			15,8
		140			25,0
		180			40,0
Без покрытия	Наплавленная нержавеющая сталь	237	0,1	0,25	17,5
С покрытием		13,6			
Без покрытия	Твердый сплав BK15	16	0,24—0,27	0,9—1,1	110—130
С покрытием		150—165			
Без покрытия	Легированный чугун	440	0,1	0,25	6,2
С покрытием		5,7			

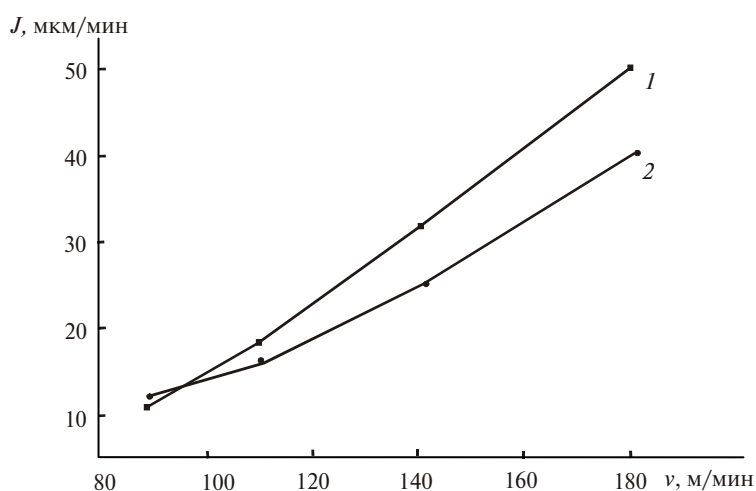


Рис. 5. Влияние скорости резания на скорость изнашивания инструментов, оснащенных ПСТМ без покрытия (1) и с покрытием (2) при точении стали ШХ15 (62 HRC); $t = 0,25$ мм; $S = 0,05$ мм/об.

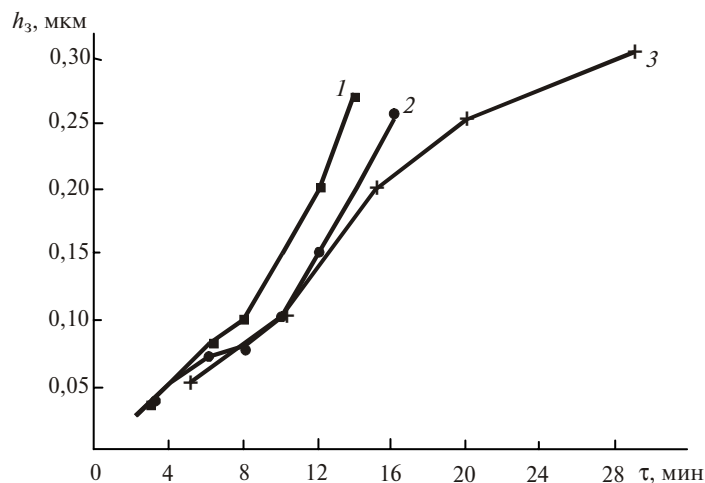


Рис. 6. Зависимость ширины фаски износа по задней поверхности инструментов без покрытия (1) и с покрытием (2, 3), от времени точения стали ШХ15 (62 HRC); $t = 0,25$ мм; $S = 0,05$ мм/об; $v = 110$ м/мин (1, 2); $t = 0,25$ мм; $S = 0,05$ мм/об; $v = 88$ м/мин (3).

Анализ результатов исследований процессов лезвийной обработки инструментами, оснащенными ПСТМ с покрытиями, позволяет сформулировать следующие требования, предъявляемые к покрытиям:

— защитное покрытие на режущем инструменте, оснащенном ПСТМ на основе КНБ, должно обладать высокими механическими свойствами для обеспечения сопротивления термобарическому нагружению инструмента в зоне резания;

— покрытие должно “активно” противодействовать вредным эффектам, имеющим место в зоне резания, в частности, обеспечивать противодействие химическому взаимодействию в зоне резания инструментального материала с обрабатываемым и элементами окружающей среды.

В отличие от защитных покрытий на инструментах из твердых сплавов и быстрорежущих сталей, обуславливающих наличие на поверхностях инструмента слоя материала с аномально высокой твердостью, покрытие на режущем инструменте, оснащенном ПСТМ на основе КНБ, имеет твердость меньше, чем твердость основы, и, в значительной степени, является приработочным.

Основными функциями покрытий на режущих инструментах, оснащенных ПСТМ на основе КНБ, являются следующие:

1. Повышение надежности работы инструмента на этапе приработки.

Наличие покрытия на рабочих поверхностях инструмента приводит к перераспределению напряжений, которые формируются в инструменте при его нагружении силами резания. При использовании покрытия $Al_2O_3-NbN-Ti$ нормальные и касательные напряжения от силового нагружения на передней поверхности инструмента в процессе резания снижаются на 25—30 %.

Снижение напряжений в режущем инструменте, особенно, на этапе его приработки, способствует повышению надежности инструмента при эксплуатации в условиях динамического нагружения.

2. Увеличение периода стойкости инструментов.

Нанесение на рабочие поверхности инструментов защитных покрытий способствует увеличению их периода стойкости в связи со снижением интенсивности изнашивания за счет повышенного сопротивления поверхностного

слоя инструмента окислительному воздействию окружающей среды, минимизации адгезионного и химического взаимодействия между инструментальным и обрабатываемым материалами в зоне резания, меньшей величины износа инструмента, достигаемой на этапе приработки.

3. Интенсификация режимов резания.

Инструменты с покрытиями обладают повышенной работоспособностью в условиях высоких температур, в частности, при работе с высокими скоростями резания, что связано с меньшей интенсивностью адгезионного и химического взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов между собой, а также ограничением влияния элементов окружающей среды.

Для обработки закаленных сталей ориентировочные скорости резания при чистовой обработке — 2,0—2,5 м/с.

Учитывая особенности напряженного состояния инструмента с покрытием, можно предположить, что диапазон используемых подач и глубин резания также может быть увеличен.

4. Информационная функция.

Интенсивный массоперенос обрабатываемого материала на контактные поверхности инструмента без покрытия не позволяет выявлять размеры изношенных участков без химического стравливания или механического удаления с них налипшего обрабатываемого материала. Покрытие на режущих пластинах из ПСТМ на основе КНБ облегчает процесс оценки величины износа инструмента.

1. Внуков Ю. Н., Марков А. А., Лаврова Л. В., Бердышев Н. Ю. Нанесение покрытий на быстрорежущий инструмент. — Киев: Техніка, 1992. — 143 с.
2. Верещака А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. — М.: Машиностроение, 1993. — 336 с.
3. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: Справ. — Харьков: Антика, 2003. — 412 с.
4. *Ceramique de couple revethe de TiN pour usinage des fontes* // Mach. Prod. — 1993. — N 595. — P. 13.
5. *Инструментальная техника на ЭМО-2003* // Комплекс ИТО. Инструмент. — 2004. — № 1. — С. 17—21.
6. More A. S., Jiang W., Brown W. D., Malshe A. P. Tool wear and machining performance of cBN—TiN coated carbide inserts and PCBN compact inserts in turning AISI 4340 hardened steel // J. Mater. Proc. Technology. — 2006. — N 180. — P. 253—262.
7. *Machining Navigator* — Новости 2006 г. — Seco Tools AB, 2006. — 45 p.
8. Turkevich V. Z., Klimenko S. A., Kulik O. G. Thermodynamics of the interaction in the CBN-based tool material—Fe(Ni) system // Transactions. — 1999. — XXVIII, N 2. — P. 8—11.
9. *Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова. — Т. 5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С. А. Клименко. — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ “АЛКОН” НАНУ, 2006. — 316 с.*
10. Гнесин Г. Г., Фоменко С. Н. Износостойкие покрытия на инструментальных материалах (Обзор) // Порошк. металлургия. — 1996. — № 9—10. — С. 17—28.
11. Холлек Х. Двойные и тройные карбидные и нитридные системы переходных металлов: Справ. изд. — М.: Металлургия, 1988. — 319 с.
12. *Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова. — Т. 2: Структура и свойства СТМ, методы исследования / Под ред. В. М. Перевертайло. — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ “АЛКОН” НАНУ, 2004. — 288 с.*
13. Самсонов Г. В., Прядко И. Ф., Прядко Л. Ф. Электронная локализация в твердом теле. — М.: Наука, 1976. — 338 с.
14. Клименко С. А., Береснев В. М., Копейкина М. Ю., Гриценко В. И. Слоистые вакуумно-дуговые покрытия Ti—NBN—Al₂O₃, Nb—NBN—Al₂O₃ на инструментах, оснащенных поликристаллическими сверхтвердыми материалами на основе кубического нитрида бора // Физическая инженерия поверхности. — 2007. — 5, № 1—2. — С. 57—61.

15. Береснев В. М., Копейкина М. Ю., Клименко С. А. Многокомпонентные и многослойные вакуумно-дуговые покрытия для режущего инструмента // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники (17). — 2008. — № 1. — С. 152—158.

Ин-т сверхтвердых материалов
им. В. Н. Бакуля НАН Украины
Научно-технологический центр
МОН и НАН Украины

Поступила 24.04.08