

УДК 621.9

С.А. Клименко, д.т.н., проф.

М.Ю. Копейкина, к.т.н., м.н.с.

*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля
НАН Украины*

КОНЦЕПЦИЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ИНСТРУМЕНТА, ОСНАЩЕННОГО ПСТМ НА ОСНОВЕ КНБ

Представлена разработанная авторами новая концепция повышения износостойкости и производительности инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ. Концепция базируется на представлениях о химическом контактном взаимодействии в зоне резания и управлении им за счет формирования в зоне резания азотной среды.

Введение. Износ режущего инструмента представляет собой сложное термодинамическое явление, определяемое одновременно несколькими механизмами: абразивным, адгезионным, усталостным, диффузионным, химическим. Различный механизм проявляется в зависимости от природы контактирующих материалов и условий контактирования, обуславливая, в большинстве случаев, экстремальный характер зависимости «стойкость инструмента – скорость резания».

Выполненные в ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины исследования [1] показали, что 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 на контактных участках инструмента соединений типа Me_xV_y , $Me_xV_yO_z$, формированию на их основе и контактному плавлению эвтектик типа $Me-Me_xV_y$, $Me-Me_xV_yO_z$ с последующим удалением жидкой фазы из зон контакта.

В зоне контакта инструментального и обрабатываемого материалов реализуется механизм контактно-реактивного плавления. Учитывая, что на контактных участках образуются сложные соединения, например двойные и тройные, температура их плавления может быть достаточно низкой.

Указанное обуславливает интенсивный износ режущего инструмента при высокоскоростной обработке.

Целью настоящей работы является создание концепции повышения износостойкости и производительности, оснащенного ПСТМ на основе КНБ.

Основная часть. Для подтверждения возможности протекания в зоне резания химических реакций между элементами инструментального и обрабатываемого материалов в работе [1] представлены результаты комплекса термодинамических исследований.

Возможность протекания химической реакции:



при нагревании определяется величиной термодинамического потенциала Гиббса реакции:

$$\Delta G_r(T) = G(Me_xB + 0,5N_2) - G(cBN + xMe), \quad (2)$$

где

$$G(Me_xB + 0,5N_2) = x^o G_{Me} + {}^o G_B + \Delta G_{Me_xB}^f(i) + \int_0^p V_{Me_xB} dp + 0,5 \left({}^o G_{N_2} + R \ln p \right), \quad (3)$$

$$G(cBN + xMe) = x^o G_{Me} + {}^o G_B + \Delta G_{cBN}^f(i) + \int_0^p V_{cBN+xMe} dp + 0,5 \left({}^o G_{N_2} + R \ln p_0 \right). \quad (4)$$

Свободная энергия Гиббса рассматриваемой реакции

$$\Delta G_r(i) = \Delta G_{Me_xB}^f(i) - \Delta G_{cBN}^f(i) + \int_0^p \Delta V_{Me_xB-cBN-xMe} dp + 0,5 R \ln \frac{p}{p_0}. \quad (5)$$

Проведенными исследованиями показано, что при учете наличия в контактной зоне парциального давления азота 100 Па и напряжений между инструментом и обрабатываемым материалом порядка 5 ГПа, началу химического взаимодействия соответствуют температуры 1100–1200 °С.

В соответствии с принципом Ле-Шателье превентивное создание в контактной зоне азотной газовой среды способствует увеличению температуры протекания реакций взаимодействия, сдвигая диапазон образования боридов, а, соответственно, эвтектик и жидкой фазы на контактных поверхностях инструмента, в более высокотемпературную область (рис. 1 [2]).

Термодинамический анализ состояния системы cBN–Me при наличии в ней повышенного парциального давления азота (рис. 2) подтверждает факт увеличения температуры образования соединений FeB, Fe₂B, Ni₂B, Ni₃B.

Как видно из рис. 2, увеличение парциального давления азота до 100 Па повышает температуру образования боридов на 150–300°. Такой запас температуры взаимодействия обуславливает возможность значительного повышения скорости резания при обработке сплавов на основе Fe и Ni.

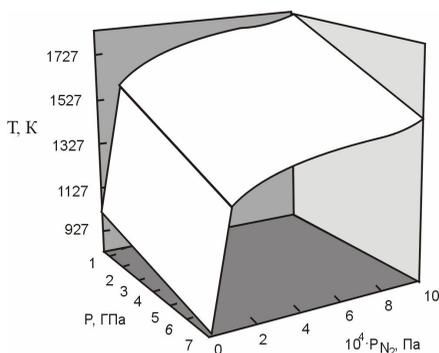


Рис. 1. Зависимость температуры T , соответствующей $\Delta G = 0$, от величины парциального давления P_{N_2} азота и контактного давления P

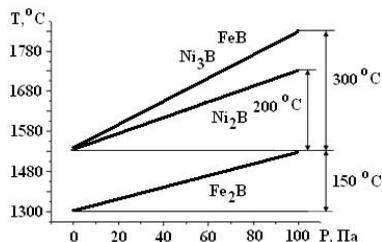


Рис. 2. Влияние давления азота на увеличение температуры образования боридов Fe и Ni

Нужно отметить, что наличие в зоне резания азота также способствует снижению окисления инструментального материала при температурах, сопутствующих процессу резания.

Таким образом, повышению работоспособности инструментов, оснащенных ПСТМ на основе КНБ, должно способствовать создание в зоне резания повышенного парциального давления азота.

Представляется возможными три пути создания в зоне резания повышенного парциального давления азота:

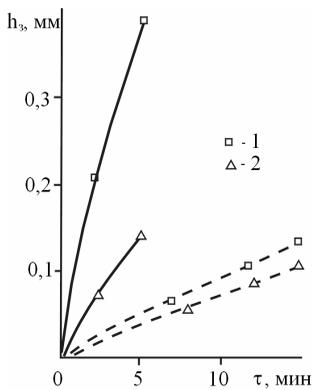


Рис. 3. Залежність износу інструмента від часу різання τ (соответственно со скоростью: — 3,0 м/с; - - - 0,75 м/с) і состава газової середовища при точенні напыленного покриття: 1 – повітря; 2 – азот

– проведення процесу обробки в азотній середі.

Така можливість підтверджується результатами дослідження процесу износу інструмента с КНБ при точенні напыленного покриття системи Ni–Cr–B–Si в середовищах повітря і азоту (рис. 3, [3]). Необхідно відзначити, що при малих швидкостях різання стійкість інструмента при використанні азотної газової середовища змінюється відносно слабо, що пов'язано з низькою температурою в зоні різання. При збільшенні швидкості різання, а відповідно і контактної температури, вплив газової середовища на износоустійкість інструмента більш суттєво – слід мати на увазі, що в цьому випадку азотна середовища, крім безпосереднього впливу на протікання реакції між контактуючими матеріалами,

перешкоджає інтенсифікації окислювальних реакцій на поверхнях інструмента;

– введення в склад композиту складових, які під впливом термосилового процесу обробки забезпечують в зоні різання підвищене парціальне тиск азоту без зниження механічних властивостей матеріалу [4].

В склад інструментального композиту можуть вводитися компоненти, які, диссоціюючи або вступаючи в взаємодію з контактуючим матеріалом при термосилових умовах процесу різання, забезпечують виділення азоту. При цьому взаємодія добавки в складі інструментального матеріалу з елементами оброблюваного матеріалу, супроводжується виділенням азоту, повинно відбуватися при температурах більш низьких, ніж температури, характерні для взаємодії з елементами оброблюваного матеріалу основи інструментального композиту – КНБ;

– нанесение на поверхности режущего элемента из ПСТМ на основе КНБ слоя защитного покрытия.

Наличие на контактных поверхностях инструмента защитных покрытий приводит к коренному изменению механики и физикохимии контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемого изделия. Первое предопределяется перераспределением напряжений на поверхностях инструмента, изменяя механику контактного взаимодействия. Второе связано с тем, что для обеспечения наиболее оптимальных условий работы режущего инструмента в каждом конкретном случае должно выбираться такое покрытие, которое обеспечивает минимизацию или отсутствие эффектов, оказывающих наиболее отрицательное влияние на работоспособность режущего инструмента, т. е. изменяет физикохимию контактного взаимодействия.

Учитывая рассмотренный выше механизм изнашивания режущих инструментов, оснащенных ПСТМ на основе КНБ, связанный с химическим взаимодействием в зоне резания, одной из основных функций покрытия является ликвидация или снижение интенсивности взаимодействия КНБ с обрабатываемым материалом и окисления КНБ.

При выборе добавок в ПСТМ и в состав покрытия прежде всего нужно иметь в виду, что их введение не должно снижать физико-механических свойств инструментального композита. Логично предположить, что в качестве соединений, вступающих в реакцию с элементами обрабатываемых материалов с выделением азота, могут выступать различные нитриды. В табл. 1 приведены свойства ряда нитридов металлов, используемых в инструментальном производстве.

Сравнение величин коэффициентов термического расширения, микротвердости и модуля упругости, существенно влияющих на напряженное состояние и износостойкость материалов в условиях термобарического нагружения в процессе резания, показывает, что для решения поставленной задачи перспективными материалами являются нитриды кремния Si_3N_4 и ниобия NbN [5, 6]. Учитывая, определенные технологические трудности, возникающие при вакуумно-дуговом напылении Si_3N_4 , этот нитрид рекомендуется в качестве добавки в шихту инструментального композита, а в качестве компоненты защитного покрытия – NbN .

Схематическое представление концепции повышения износостойкости и производительности режущих инструментов, оснащенных ПСТМ на основе КНБ, представлено на рис. 4.

Для подтверждения справедливости выдвинутой концепции выполнена серия исследований по точению труднообрабатываемых конструкционных сталей и сплавов.

Бочка прокатного валка из отбеленного чугуна обрабатывалась резцами, оснащенными режущими пластинами из твердого сплава ВК60М, минералокерамики ВОК60 и ПСТМ на основе КНБ – композитом 10Д и композитом cBN–Si₃N₄. При режимах резания $v = 0,83$ м/с, $S = 0,15$ мм/об.; $t = 1$ мм инструменты имели стойкость 5,0; 30,0; 60,0 и 120,0 мин. соответственно.

Таблиця 1

Механические и физические свойства
нитридов металлов

Нитрид	Коеффіцієнт термічного розширення $\alpha \cdot 10^6$, 1/К	Коеффіцієнт теплопровідності λ , Вт/м·К	Микротвердість, H_{100} , ГПа	Коеффіцієнт Пуассона ν	Модуль Юнга E , ГПа
TiN	9,35 [7, 8]	12,6 (300К) 67,7 (1500К) [7]	20,5 [7, 8]	0,25 [7]	256 [7, 8]
ZrN	7,24 [7, 8]	28,3 [7]	15 [7]; 16,7 [8]	0,24 [8]	400 [7]
HfN	6,9 [7, 8]	19,1 [7];	10 [7]; 16 [8]	0,28 [7]	275 [7]
VN	9,2 [7, 8]	13,8 [7];	13,1 [7, 8]	0,25 [7]	350 [7]
NbN	6,95 [9]	3,8 (300К) [7];	14,6 [7, 8]	0,26 [7]	493 [7, 8]
CrN	2,3 [7, 8]	11,9 [7];	10,9 [7, 8]	0,26 [7]	390 [7]
Mo ₂ N	6,2 [7, 8]	18,1 [7];	6,3 [7, 8]	–	417 [7]
Si ₃ N ₄	2,75 [7, 8]	35 [10]	6,6 [7]	0,07–0,18 [7]	275–304 [7]; 460 [8]

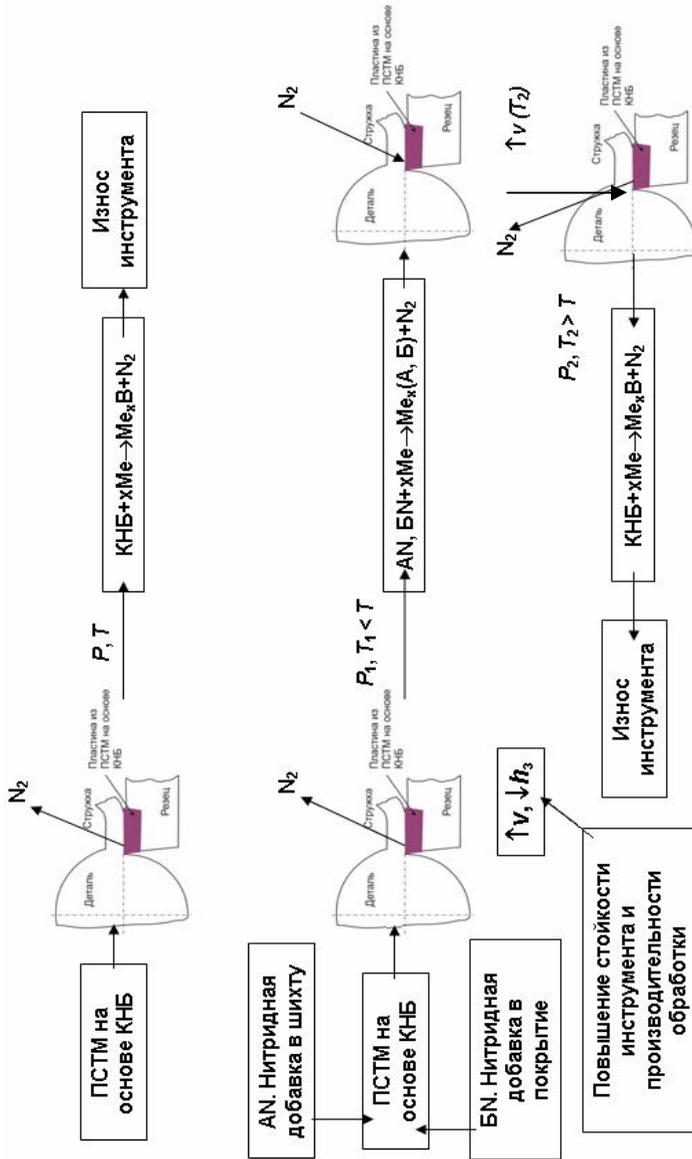


Рис. 4. Схема к концепции повышения производительности режущих инструментов, оснащенных ЛСТМ на основе КНБ

Сравнение работоспособности инструмента, оснащенного композитом $cBN-Si_3N_4$, с инструментом, оснащенными

керамической пластиной SN 100 производства Feldmulle, Германии (рекомендуется для обработки валков из отбеленного чугуна), показало, что инструмент из композита позволяет обрабатывать отбеленный чугун со скоростью резания выше в 2,9–3,4 раза.

Бочка и ручки прокатных чугунных валков обрабатывались на токарном станке фирмы «Геркулес» резцами, оснащенными композитом $cBN-Si_3N_4$, с режимами резания: $v = 1,2$ м/с на черновых проходах и 1,43 м/с на чистовом проходе; $S = 0,2$ мм/об.; $t = 1,5$ мм на черновых проходах и 0,2 мм – на чистовом.

После 25 минут работы по бочке валка износ инструмента по задней поверхности составлял 0,07–0,10 мм. Обработка ручьев производилась за четыре черновых и один чистовой проход. При работе с указанными выше режимами без переустановки режущей пластины полностью обработан валок, период стойкости инструмента составил 125 мин. Инструментом с круглой пластиной можно обработать по бочке и ручьям 2–3 валка.

Испытания, проведенные в условиях Белорусского металлургического завода, показали эффективность инструмента, оснащенного композитом $cBN-Si_3N_4$, при обработке прокатных валков из твердого сплава ВК30. При работе со скоростью резания 0,22–0,29 м/с режущий инструмент до износа по задней поверхности 0,25 мм обработал 3 детали по 120 мм каждая и по 5 ручьев в каждой детали.

В условиях в ОАО «ВНИИинструмент» (г. Москва) проведены исследования режущих свойств инструментов с композитом $cBN-Si_3N_4$ при точении с ударом закаленной стали ХВГ твердостью 60–63 HRC при скоростях резания 2,5–3 м/с. Испытания показали, что инструменты имели нормальный износ без следов сколов и выкрашиваний.

В табл. 2 представлены величины износа инструментов, оснащенных композитом $cBN-Si_3N_4$ без покрытия и с покрытием на основе NbN, при точении закаленной стали. Как видно из приведенных данных, защитное покрытие снижает износ инструмента и позволяет повысить производительность обработки. Эффективность применения покрытия увеличивается с ростом скорости резания.

Таблица 2

*Износ по задней поверхности инструментов
при точении стали ШХ15*

Ин- стр.	v , м/мин	Величина h_3 (мм) при работе ($S = 0,05$ мм/об., $t = 0,25$ мм) в течение (мин)								
		2	5	8	10	14	15	16	20	29

Без покрытия	110	0,025	–	0,10	0,15	0,27	–	–	–	–
С покрытием		0,025	–	0,08	0,10	0,20	–	0,25	–	–
	88	– –	0,05	–	0,10	–	0,20	–	0,25	0,30

Аналогичный эффект получен при обработке гаммы трудно-обрабатываемых конструкционных сталей и сплавов. Применение вакуумно-дугового защитного покрытия на основе NbN на режущих инструментах, оснащенных ПСТМ на основе КНБ, позволяет снизить скорость их износа:

- при чистовой обработке закаленных сталей (55–62 HRC) на 25–30 %;
- при обработке наплавленного никелевого сплава 08X18H9Г7Т на 20 %;
- при обработке легированного магнием чугунок СЧ 35 на 10 %;
- при обработке твердых сплавов группы ВК (Со > 15 %) на 25–35 %.

Вывод. Таким образом, результаты лабораторных и производственных испытаний подтверждают высокую работоспособность режущего инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, а также ПСТМ с покрытием, составы которых разработаны на основе предложенной концепции повышения износостойкости и производительности инструмента.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6-ти т. / Под общей ред. Н.В. Новикова. – Т. 5: Обработка материалов лезвийным инструментом / С.А. Клименко, А.А. Виноградов, Ю.А. Муковоз и др. Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – 316 с.
2. *Turkevich V.Z., Klimenko S.A., Kulik O.G.* Thermodynamics of the interaction in the CBN-based tool material-Fe(Ni)system // Transactions. – 1999. – Vol. XXVIII. – № 2. – P. 8–11.
3. *Клименко С.А., Полонский Л.Г., Муковоз Ю.А.* Влияние газовых сред на износ инструмента из киборита при точении покрытий // Сверхтвердые материалы. – 1993. – № 4. – С. 35–39.

4. Деклараційний патент України № 70820 А Спосіб механічної обробки” / С.А. Клименко, Ю.О. Мельнийчук, Ю.О. Муковоз та ін.; Бюл. "Промислова власність". – 2004. – № 10.
5. Повышение эффективности лезвийной обработки сплавов на основе никеля и железа / С.А. Клименко, М.Ю. Копейкина, Ю.А. Мельнийчук и др. // Сверхтвердые материалы. – 2003. – № 5. – С. 76–81.
6. Повышение работоспособности режущих инструментов, оснащенных ПСТМ на основе КНБ, вакуумно-дугowymi покрытиями / М.Ю. Копейкина, С.А. Клименко, Ю.А. Мельнийчук, В.М. Береснев // Сверхтвердые материалы. – 2008. – № 5. – С. 87–97.
7. *Костюк Г.И.* Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: Справочник. – Харьков: Антикава, 2003. – 412 с.
8. *Самсонов Г.В., Виницкий И.М.* Тугоплавкие соединения: Справочник. – М.: Металлургия, 1976. – 560 с.
9. Оцінка залишкових напружень в вакуум-плазмових покриттях / О.Б. Сорока, М.Ю. Копійкіна, В.С. Антонюк та ін. // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2007. – № 3 (42). – С. 41–45.
10. <http://www.rusengines.ru>

КЛИМЕНКО Сергей Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- обработка материалов резанием;
- режущие инструменты;
- повышение работоспособности режущих инструментов.

КОПЕЙКИНА Марина Юрьевна – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- обработка материалов резанием;
- режущие инструменты;
- повышение работоспособности режущих инструментов.

Подано 02.02.2009