

## Исследование режущих свойств резцов из нитрида бора

# 06, июнь 2012

DOI: 10.7463/0612.0423622

Грубый С. В., Лапшин В. В.

УДК 621.941.1

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

[grusv@yandex.ru](mailto:grusv@yandex.ru)

[vasylap@mail.ru](mailto:vasylap@mail.ru)

### ВВЕДЕНИЕ

Мировой тенденцией в металлообработке является замена шлифования заготовок из закаленных сталей точением с использованием инструментов, оснащенным сверхтвердыми инструментальными материалами или режущей керамикой. Повышение эффективности такой обработки возможно за счет рационального выбора режимных параметров на основе количественных расчетов или результатов экспериментальных исследований.

Современные синтетические сверхтвердые материалы (СТМ) включают в себя три группы: на основе углерода (синтетические алмазы); на основе нитрида бора со структурой кубической флалеритоподобной или вюрцитоподобной; композиционные материалы. Гексагональный нитрид бора служит исходным материалом для получения кубической и вюрцитной модификаций. Сверхтвердые материалы разделяют по твердости: природные и искусственные алмазы – до 100 ГПа; нитрид бора – до 90 ГПа; тугоплавкие карбиды, бориды, нитриды, оксиды, фосфиды - 20÷40 ГПа. Классификация СТМ инструментального назначения основана на технологии их получения:

- монокристаллы, получаемые прямой перестройкой кристаллической решетки;
- поликристаллы, получаемые высокотемпературным спеканием;
- сверхтвердые композиты на основе синтетического алмаза или нитрида бора с металлическим или керамическим связующим, получаемые при высоких давлениях и температурах и др.

Отечественные поликристаллические СТМ (ПСТМ) на основе нитрида бора были созданы и исследованы целым рядом научно-исследовательских институтов и организаций [1, 2]. Они обладают уникальными свойствами: высокими твердостью, износостойкостью, теплопроводностью, теплостойкостью, химической инертностью

к черным металлам. Кубический нитрид бора состоит из атомов азота и бора в такой же пространственной конфигурации, что и алмаз. СТМ на его основе отличаются параметрами и технологией синтеза, исходным сырьем, легирующими компонентами. Известны марки СТМ на основе нитрида бора - эльбор-Р (композит 01), ПКНБ, ниборит, исмит, киборит, белбор (композит 02), композит 05 и др.

Гексагональная плотноупакованная вюрцитная модификация нитрида бора синтезирована с помощью ударных волн [1]. Промышленное значение имеет СТМ из поликристаллических спеков вюрцитного нитрида бора без смешивания его с кубической модификацией и имеющая структуру вюрцитного и кубического нитрида бора – гексанит-Р (композит 10) или композит 10Д – двухслойные пластины с рабочим слоем из гексанита-Р. Отличительной особенностью гексанита-Р является способность работать в условиях прерывистых ударных нагрузок.

Устойчивой тенденцией является разработка сверхтвердых композиционных инструментальных материалов на основе нитрида бора [3, 4]:

- тибор и тибор-М, где в качестве связующего применены сплавы никеля с титаном, легированные алюминием, вольфрамом, молибденом;

- томал, содержащий помимо кубического нитрида бора нитрид и диборид титана, медь, интерметаллид (томал-10 – двухслойные пластины);

- карнибор, включающий смесь кубического нитрида бора и различных сверхтвердых порошков;

- композит на основе кубического нитрида бора и оксидной или нитридной керамики;

- композит, имеющий структуру твердого сплава, где часть кристаллов карбидной фазы заменена зёрнами кубического нитрида бора.

Зарубежные фирмы выпускают и активно внедряют на отечественных предприятиях инструментальные материалы на основе кубического нитрида бора. Например, фирма "Kennametal Hertel" применяет для оснащения режущих инструментов СТМ марок KD050, KD081, KD120, KD200, KD230, KB5625, KB5610 с содержанием нитрида бора от 50 до 90% в виде сменных многогранных пластин (СМП) с системой крепления "Top Notch".

Фирма Mitsubishi выпускает СМП из инструментальных материалов на основе cBN марок MBC010, MBC020 (с покрытием) и MB8025, MB835 (без покрытия).

Фирма Iscar производит СМП из аналогичной гаммы инструментальных материалов марок - IB10H, IB20H, IB10HC с покрытием TiN, IB25HC с покрытием Ti(C,N,O), IB25HA с покрытием Ti(C,N).

Фирма Sandvik применяет для своих инструментов композиты на основе нитрида бора без и с покрытием марок - CB7015, CB7020/CB20, CB7025, CB7035.

Фирма Seco использует широкую гамму аналогичных инструментальных материалов на основе кубического нитрида бора марок - CBN050C, CBN10, CBN100, CBN100P, CBN150, CBN200, CBN300, CBN300P, BN350.

Основные виды отечественных субмикронных и нанодисперсных ПСТМ на основе плотного нитрида бора были получены в 1970–1990 г.г. в ИФВД (г. Троицк) и ЦНИТИ (г. Москва) - композит 09, а также в ИФТТП (г. Минск) – Светланіт [5]. В настоящее время промышленный выпуск субмикронных и нанодисперсных ПСТМ на основе плотного нитрида бора и инструментов на их основе ведут предприятие «Микротехника» (г. Мценск) и ЦНИТИ.

В работе [5] отмечено, что для синтеза ПСТМ за рубежом используются технологии спекания микропорошков cBN со связующими и активирующими добавками при высоких давлениях на аппаратуре синтеза типа «Белт». Эти технологии и аппаратура не позволяют получать ультрадисперсные компакты ПСТМ. Содержание плотного нитрида бора в таких ПСТМ - не более 80-90 %, зернистость - от 2 до 4 мкм, твердость по Кнупу – около 40 ГПа. Уменьшение зернистости до 0,5-1,0 мкм сопровождается значительным увеличением пористости рабочего слоя. Поэтому после спекания связующая фаза занимает уже около 40 % объема композита, а их твердость снижается до 30-33 ГПа. Переход к наноразмерному нитриду бора в случае активированного спекания неизбежно приводит к объемному преобладанию в композите связующей фазы и дальнейшему уменьшению твердости, т.е. ресурс композитов активированного спекания со связующей фазой исчерпывается на уровне 1 мкм.

В базовой технологии синтеза ПТНБ в ЦНИТИ активирующие и связующие добавки не используются. Спекаются субмикropорошки cBN (монокристаллы) и нанопорошки wBN (поликристаллы), а условия термобарического воздействия подобраны таким образом, что в вюрцитных частицах сохраняется наноразмерная субструктура. Поэтому твердость ПТНБ (42-45 ГПа) выше, чем у композитов активированного спекания, а радиус округления режущей кромки инструмента составляет 0,1 мкм.

В отличие от аппаратов «Белт» (давление 4,0 – 6,0 ГПа), некоторые модификации камер высокого давления, производимые в России, работают при 8,0 ГПа, что позволяет реализовать условия для прямого синтеза плотного нитрида бора. В 1988 году в ИФТТП были выпущены экспериментальные партии особо чистого сверхтвердого нанокompозита «Светланіт» из объемных заготовок пиролитического нитрида бора, а предприятием «Микротехника» в 1992-1995 г.г. разработана технология производства его промышленного аналога DBN (Dense Boron Nitride) и инструментов на его основе. Неоспоримыми преимуществами исходного пиролитического нитрида бора является отсутствие примесей и возможность управления микроструктурой композита на этапе его получения.

Согласно результатам сканирующей электронной микроскопии и петрографического анализа максимальные размеры зерен DBN не превышают 200 нм при практическом отсутствии пористости. Упругие модули, определенные на основании измерений скорости прохождения ультразвуковых волн через образцы, оказались близкими к алмазу и составили 800-850 ГПа, а теплопроводность 350 Вт/(м К) – самая высокая среди известных ПСТМ из нитрида бора. Проведенный в Технологическом институте сверхтвердых и новых углеродных материалов (ТИСНУМ) анализ показал, что твердость DBN, измеренная методом склерометрии, приближается к 90 ГПа, а твердость по Кнупу превышает 55 ГПа.

Таким образом, DBN не имеет мировых аналогов по твердости и размеру зерна, являясь 100%-ным наноматериалом [5].

Проведенный анализ литературных источников показывает, что основной объем научных публикаций посвящен вопросам состава, физико-механических свойств и технологии получения инструментальных материалов на основе нитрида бора. Режущие свойства инструментов из этих материалов изучены недостаточно и в малом объеме отражены в научных публикациях.

Целью исследований, проведенных на кафедре "Инструментальная техника и технологии", является изучение режущих свойств резцов из различных инструментальных материалов. В настоящей статье представлены результаты расчетов и экспериментальных исследований режущих свойств композиционных сверхтвердых инструментальных материалов на основе нитрида бора различных марок и фирм-производителей.

Научная новизна проведенных исследований заключается в разработке рекомендаций по рациональным условиям и режимам резания инструментов из сверхтвердых инструментальных материалов.

## 1. РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ РЕЖУЩИХ СВОЙСТВ РЕЗЦОВ ИЗ НИТРИДА БОРА

Процесс резания инструментом из нитрида бора при обработке закаленных сталей твердостью до HRC 65 изучен экспериментально [1, 2]. Рекомендуемые диапазоны режимных параметров точения в этих условиях составляют - скорость резания 50÷200 м/мин, подача 0,02÷0,1 мм/об, глубина 0,1÷0,5 мм, работа без смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Шероховатость обработанной поверхности при выборе малых значений подач составляет Ra 0,63÷0,16. Обработанный поверхностный слой содержит остаточные сжимающие напряжения. Процесс резания характеризуется коэффициентом усадки в пределах 0,6÷1,5, силы резания с увеличением износа инструмента возрастают до 100 Н, температура резания изменяется в пределах 400÷1100 °С. Наблюдения за состоянием контактных поверхностей показали наличие

активных адгезионных процессов в зоне контакта трущихся пар. Коэффициент трения нитрида бора по закаленной стали снижается с увеличением скорости скольжения и находится в пределах  $0,2 \div 0,4$ .

Рекомендуемые режимы резания для резцов из инструментальных материалов на основе нитрида бора варьируются в широких пределах. Например, инструментальная фирма Seco для обработки заготовок из закаленной стали HRC 46 – 65 и инструментального материала CBN10 рекомендует глубину резания до 0,5 мм, подачу 0,05 - 0,15 мм/об, скорость резания в пределах 200 – 125 м/мин.

Фирма Sandvik для обработки заготовок из закаленной стали HRC 60 и инструментального материала CB7015 определяет подачу 0,05 – 0,15 – 0,25 мм/об и скорость резания 250 – 190 – 160 м/мин.

Аналогичные рекомендации существуют и у других зарубежных инструментальных фирм. Количественные выражения для расчета режимов резания отсутствуют.

В отечественных литературных источниках приводятся эмпирические обобщающие уравнения для расчета режимных параметров обработки заготовок из закаленных сталей резцами из нитрида бора марок эльбор-Р, гексанит-Р.

Так, в справочнике [6] приведено выражение для расчета стойкости инструмента

$$T = \frac{C_T K_m}{v^{m_T} t^{x_T} s^{y_T}}, \quad C_T = 5,26 \cdot 10^4, \quad m_T = 1,65, \quad x_T = 0,3, \quad y_T = 0,5,$$

где  $T$  – стойкость, мин;  $t$  – глубина, мм;  $s$  – подача;  $K_m$  – коэффициент, учитывающий марку обрабатываемой стали. Для стали марок: P6M5, P18, ХВГ, ШХ15 значения коэффициента  $K_m$  составляют, соответственно, 1,0; 1,1; 1,2; 0,9.

После преобразований относительно скорости резания для стали марки ШХ15 выражение примет вид

$$v = \frac{C_v}{T^{m_v} t^{x_v} s^{y_v}}, \quad C_v = 681, \quad m_v = 0,606; \quad x_v = 0,18; \quad y_v = 0,3. \quad (1)$$

В работах [1,2] рекомендованы следующие выражения для расчета показателей, характеризующих обработку заготовок из закаленных сталей:

- скорость резания, м/мин

$$v = \frac{C_v K_{Tv}}{T^{m_v} t^{x_v} s^{y_v}}, \quad C_v = 420, \quad m_v = 0,62; \quad x_v = 0,14; \quad y_v = 0,25, \quad (2)$$

где  $K_{Tv} = (90/T)^{m_v}$  - поправочный коэффициент, зависящий от стойкости инструмента;

- составляющие силы тангенциальная и радиальная, Н

$$P = C_p t^{x_p} s^{y_p} / v^{n_p}, \quad (3)$$

где значения постоянных и показателей степеней приведены в таблице 1;

- шероховатости обработанной поверхности, мкм

$$Ra = C_R s^{k_1} / (r^{k_2} v^{k_3}), \quad C_R = 47,1; \quad k_1 = 1,3; \quad k_2 = 0,4; \quad k_3 = 0,2, \quad (4)$$

где  $r$  – радиус при вершине резца, мм.

Таблица 1

Постоянные и показатели степеней в формулах составляющих силы резания

Составляющие силы, Н	$C_p$	$x_p$	$y_p$	$n_p$
$P_z$	405	1,0	0,65	0,15
$P_y$	325	0,88	0,58	0,15

Сравнение расчетных значений скорости резания для различных значений стойкости инструмента приведено в таблице 2.

Таблица 2

Расчетные значения скорости резания по различным уравнениям: глубина резания 0,1 мм, подача 0,05 мм/об

T, мин				Уравнение
90	60	45	30	
v, м/мин				
165,8	211,9	252,3	322,6	(1)
75,3	124,5	177,9	294,1	(2)

Таким образом, отмечено расхождение расчетных значений скорости резания по двум уравнениям. Из таблицы следует, что при ограничении скорости резания значениями 180 – 250 м/мин (совпадает с рекомендациями зарубежных фирм) стойкость инструмента должна находиться в пределах 45 – 90 мин.

Уточнить рекомендации можно, используя методику оптимизации режимных параметров методом линейного программирования [7]. Рассматривая уравнения (2), (4) как ограничения после их логарифмирования получим

$$x_1 + y_v x_2 \leq \ln \left( \frac{C_v K_{T_v} 1000 \cdot 100^{y_v}}{T^{m_v} t^{x_v} \pi d} \right); \quad (5)$$

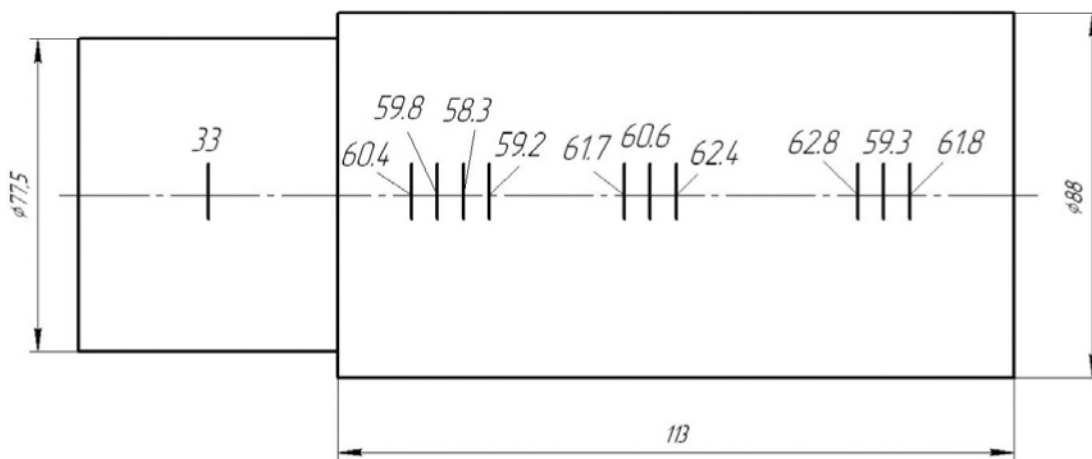
$$-k_3 x_1 + k_1 x_2 \leq \ln \left( \frac{Ra (\pi d)^{k_3} 100^{k_1} r^{k_2}}{C_R 1000^{k_3}} \right), \quad (6)$$

где переменными являются:  $x_1 = \ln(n)$ ;  $x_2 = \ln(100s)$ .

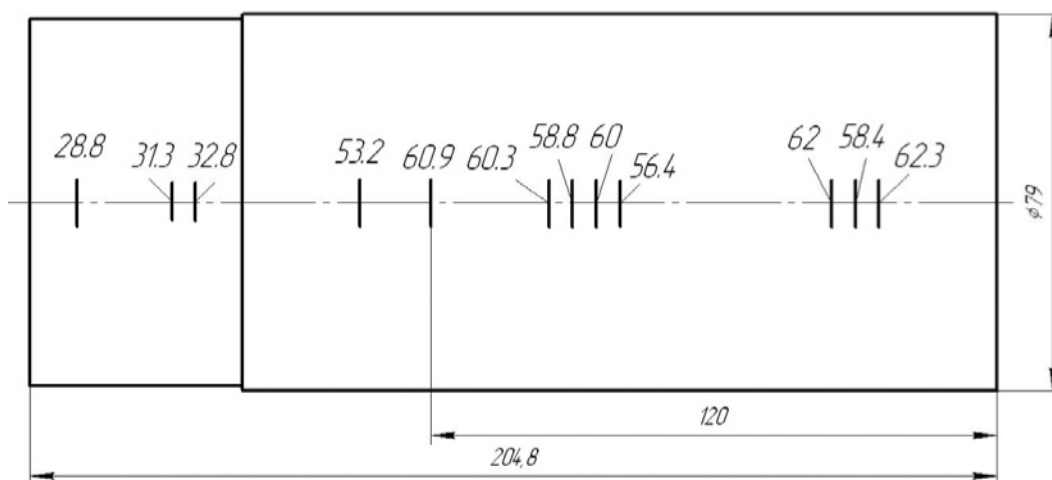
Оптимальное решение находим как точку пересечения двух прямых (5), (6) в системе координат  $x_1$ ,  $x_2$ . Например, для заданных значений стойкости инструмента  $T = 60$  мин, шероховатости  $Ra = 0,63$  мкм, диаметра заготовки  $d = 88$  мм, радиуса при вершине резца  $r = 0,6$  мм, оптимальные координаты составляют:  $x_1 = 6,05$ ;  $x_2 = 1,86$ , что соответствует режимным параметрам: частота вращения шпинделя станка 424 об/мин, скорость резания 117 м/мин, подача 0,06 мм/об.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖУЩИХ СВОЙСТВ РЕЗЦОВ ИЗ НИТРИДА БОРА

Для сравнения режущих свойств резцов, оснащенных различными инструментальными материалами на основе нитрида бора, с рекомендациями по режимам резания проведены экспериментальные исследования. В качестве заготовок использованы гильзы из стали марки ШХ15, подвергнутые закалке. На рис. 1 показаны эскизы заготовок и приведены измеренные значения твердости. На цилиндрических поверхностях большего диаметра, где выполнялось точение, твердость находится в пределах HRC 60 – 62.



а)



б)

Рис. 1. Заготовки из стали ШХ15 и результаты измерения твердости: а) – заготовка 1, б) – заготовка 2

Режущими инструментами были выбраны резцы различных конструкций и геометрических параметров:

- *опыт 02-ВН* - резец-вставка из эльбора-Р (композит 01), передний угол -10 град, задний угол 10 град, радиус при вершине 0,6 мм;

- *опыт 03-ВН, 04-ВН* – сборный резец с СМП формы LCGN 1604МО-0400S-LF из материала марки CBN10 фирмы Seco, передний угол фаски -20 град, задний угол 7 град, радиус при вершине 2 мм;

- *опыт 06-ВН* – сборный резец с СМП формы DCMW11T308S-LO из материала марки CBN10 фирмы Seco, передний угол фаски -20 град, задний угол 7 град, радиус при вершине 0,8 мм;



- опыт 07-BN, 08-BN – сборный резец с СМП формы DCGW 11T308S01530F из материала марки CB7015 фирмы Sandvik, передний угол фаски -30 град, задний угол 7 град, радиус при вершине 0,8 мм.

На рис. 2 показаны фотографии некоторых инструментов - сборного резца и СМП фирмы Seco и Sandvik.



а)



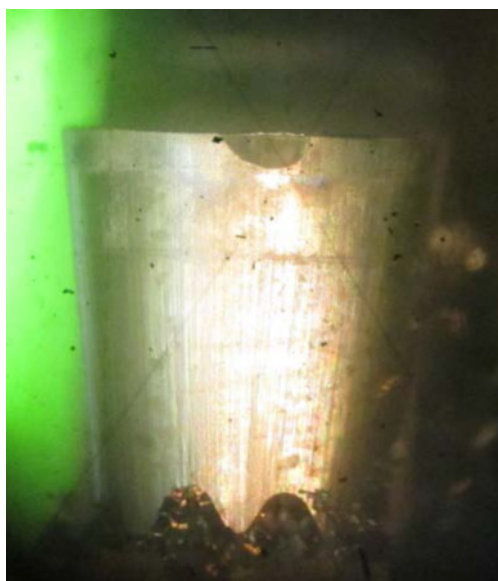
б)

Рис. 2. Режущие инструменты, использованные для проведения опытов: а) - сборный резец и СМП фирмы Seco; б) - СМП из материала CBN10 (Seco) и CB7015 (Sandvik)

Опыты на станке проведены по схеме наружного продольного точения заготовки типа гильзы из стали марки ШХ15 (рис. 3). Внешний вид зоны обработки показан на фотографии (рис. 4).



Рис. 3. Наружное продольное точение гильзы из закаленной стали сборным резцом с СМП из инструментального материала на основе нитрида бора



а)



б)

Рис. 4. Внешний вид износа реза по задней поверхности: а) – нормальный износ; б) – катастрофический износ (скол режущей кромки)

Каждый опыт проводили при постоянной частоте вращения шпинделя, глубине и подаче. Учитывая малое значение глубины резания, изменением скорости резания между проходами можно пренебречь. Периодически резец снимали со станка и контролировали величину износа по задней поверхности на универсальном инструментальном микроскопе. Таким образом экспериментально устанавливали зависимость величины износа по задней поверхности от времени резания.

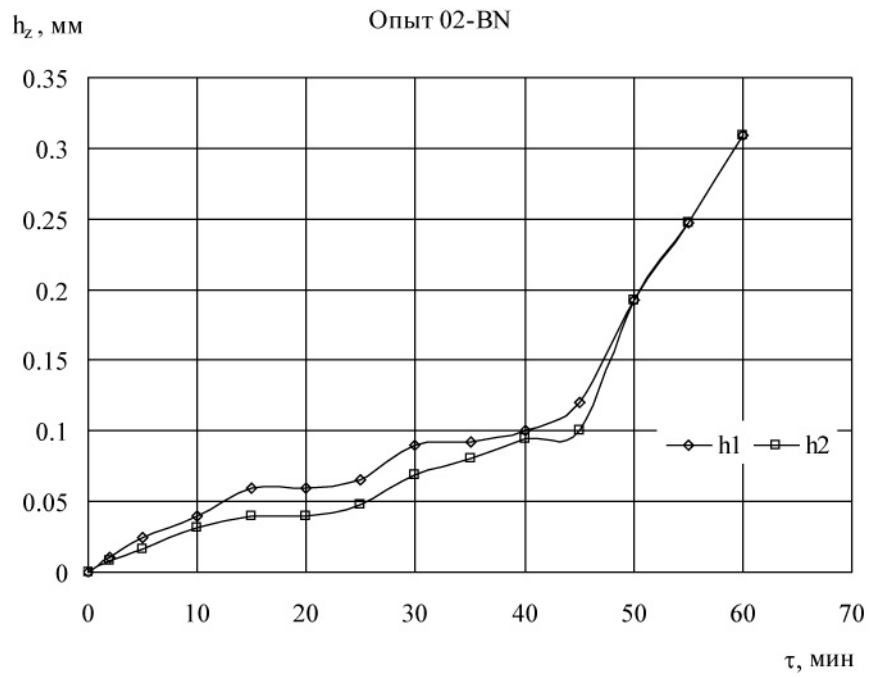
Экспериментальные кривые износа приведены на указанных ниже рисунках:

- *опыт 02-BN* – глубина резания 0,1 мм, подача 0,05 мм/об, скорость резания 110,5 м/мин,  $h_1$  – износ по главной задней поверхности,  $h_2$  – износ по вспомогательной поверхности (рис. 5 а);

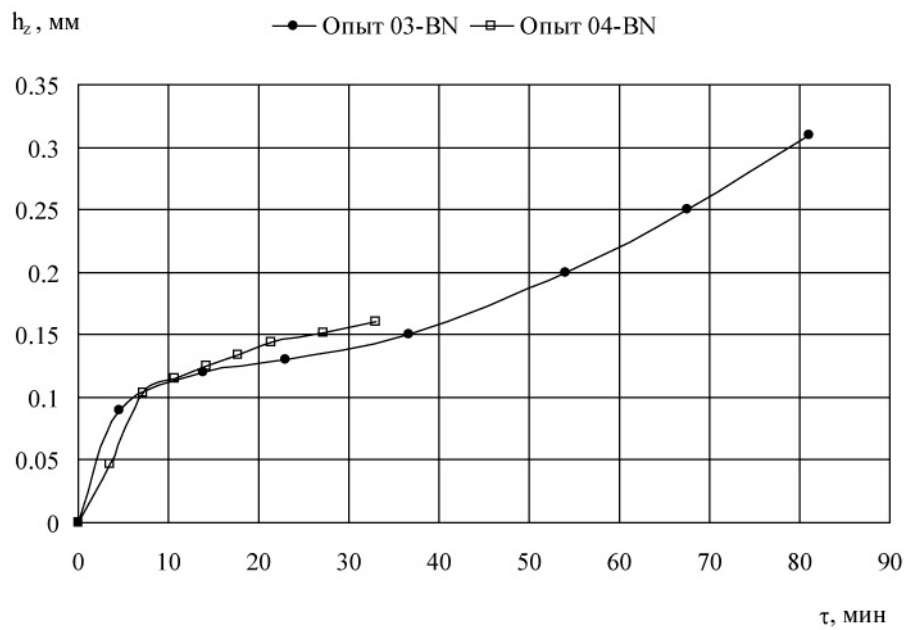
- *опыт 03-BN, 04-BN* - глубина резания 0,1 мм, подача 0,05 мм/об, скорость резания 107 м/мин (рис. 5 б);

- *опыт 06-BN, 07-BN, 08-BN* - глубина резания 0,15 мм, подача 0,1 мм/об, скорость резания 150,2; 160; 156,8 м/мин (рис. 6).

Анализ экспериментальных кривых износа показывает, что для резцов из композиционных материалов на основе нитрида бора при скорости резания 107 – 110 м/мин отмечены относительно высокие и стабильные режущие свойства (рис. 5). Стойкость составляет 60 – 80 мин, величина износа по задней поверхности – до 0,3 мм.



а)



б)

Рис. 5. Экспериментальные кривые износа резцов: а) – эльбор-Р; б) – CBN10 (Seco)

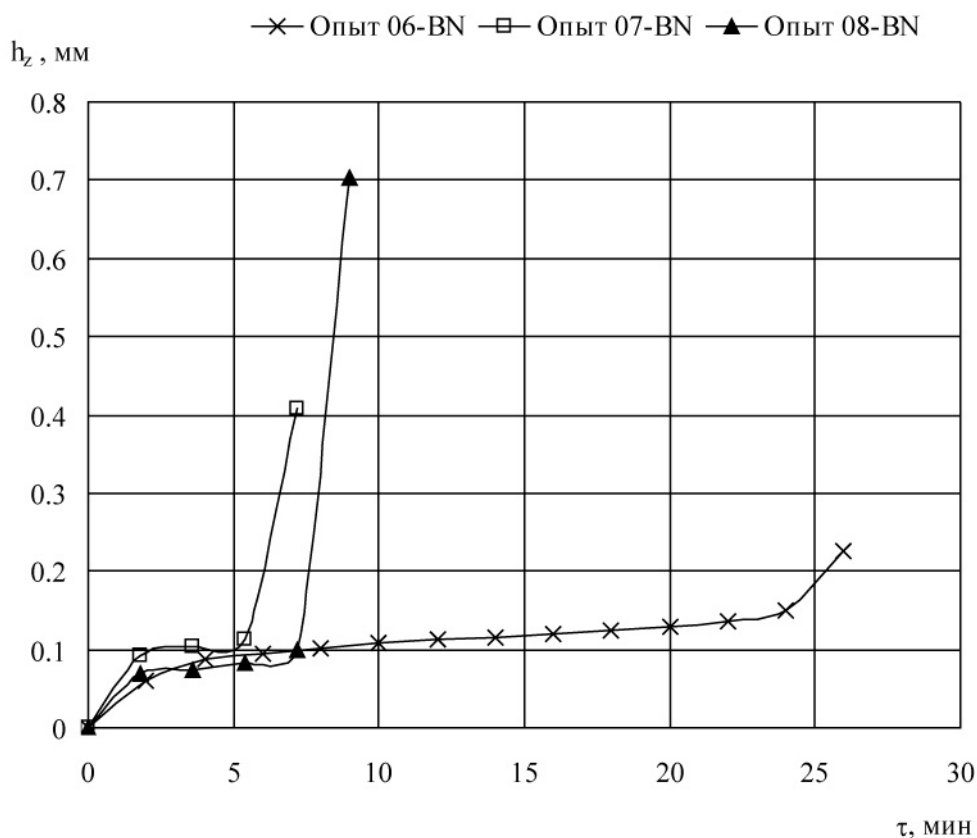


Рис. 6. Экспериментальные кривые износа резцов из инструментального материала CBN10 (Seco) и CB7015 (Sandvik)

С увеличением скорости резания до значений 150 – 160 м/мин при достижении величины износа 0,1 мм возможны катастрофические сколы режущей кромки. Максимальная стойкость инструмента не превышает 27 мин при величине износа 0,22 мм (рис. 6).

Аналогичный вывод можно сделать на основании экспериментальных кривых износа резцов с пластинами Kennametal KD050 для условий обработки заготовки из закаленной стали AISI 52100 HRC 62, приведенных в статье [8]. Например, для скорости резания 91 м/мин, глубины 0,1 мм, подачи 0,076 мм/об стойкость инструмента составляет 100 мин, а величина износа 0,22 мм. При скорости резания 136 м/мин, глубине 0,2 мм, подаче 0,114 мм/об стойкость инструмента составляет 12 мин, а величина износа 0,15 мм.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты показывают, что при использовании традиционных композиционных инструментальных материалов на основе нитрида бора при обработке заготовок из закаленной стали твердостью HRC 60-62 увеличение скорости резания выше 110 м/мин не целесообразно в связи с низкой стойкостью инструмента.

По результатам проведенных работ намечены пути дальнейших исследований:

- моделирование процесса изнашивания лезвийных инструментов, теоретический расчет износа и стойкости инструментов из сверхтвердых материалов как намечено, например, в работах [8, 9];

- экспериментальная отработка и оптимизация режимных параметров инструментов из современных марок сверхтвердых инструментальных материалов на основе нитрида бора плотной структуры, таких как DBN (Dense Boron Nitride).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Высокопроизводительные инструменты из гексанида-Р / Карюк Г.Г., Бочко А.В., Мойсеенко О.И., Сидоренко В.К. - Киев: Наукова думка, 1985. – 136 с.

2. Эльбор в машиностроении / Лысанов В.С., Букин В.А., Глаговский Б.А., Боровский Г.В., Ипполитов Г.М., Каменкович А.О., Кремень З.И., Попов С.А., Шилоненко-Бородич Н.Е.- Л.: Машиностроение, 1978. – 280 с.

3. Капустин А.И., Нуждин Г.А. Получение и свойства сверхтвердых композитов: учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 1999. – 96 с.

4. Нуждин Г.А. Структура сверхтвердых композитов // Справочник. Инженерный журнал. 2001. №4. С. 9-10.

5. Опыт промышленного применения сверхтвердых инструментальных наноматериалов / Малышев С.Н., Филоненко В.П., Захаревич Е.М., Перфилов С.А. // РИТМ. 2011. №2 (60). С. 40-42. Режим доступа [http://www.ritm-magazine.ru/pdf/RITM\\_60.pdf](http://www.ritm-magazine.ru/pdf/RITM_60.pdf) (дата обращения 08.07.2012).

6. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.

7. Грубый С.В. Методы оптимизации режимных параметров лезвийной обработки: учеб. пособие. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 96 с.

8. Huang Y., Liang S.Y. Modeling of CBN Tool Flank Wear Progression in Finish Hard Turning // Trans. of the ASME: Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, vol. 126, no. 1, pp. 98-107. DOI: 10.1115/1.1644543.

9. Грубый С.В. Моделирование процесса изнашивания резцов из нитрида бора при обработке закаленных сталей // Технология металлов. 2003. №11. С. 11-16.

**Research of cutting properties of boron nitride cutters**

# 06, June 2012

DOI: 10.7463/0612.0423622

Grubyy S., V., Lapshin V.V.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

[grusv@yandex.ru](mailto:grusv@yandex.ru)[vasylap@mail.ru](mailto:vasylap@mail.ru)

The authors analyze properties of ultra-hard tool materials on the basis of boron nitride of various brands and manufacturers – both domestic and foreign. Recommendations on regime parameters of processing work pieces made of hardened steel were analyzed. Calculation dependences of tool life, cutting speed, forces and roughness of the processed surface are given. The authors present the results of their experimental research of cutting properties of various brands of tool materials on the basis of boron nitride when processing work pieces made of hardened steel. Directions for further investigations of tools made of modern materials on the basis of boron nitride were outlined.

---

Publications with keywords: [cutter](#), [cutting conditions](#), [wear](#), [boron nitride](#), [wear](#)

Publications with words: [cutter](#), [cutting conditions](#), [wear](#), [boron nitride](#), [wear](#)

---

## References

1. Kariuk G.G., Bochko A.V., Moiseenko O.I., Sidorenko V.K. *Vysokoproizvoditel'nye instrumenty iz geksanita-R* [High-performance tools from geksanit-P]. Kiev, Naukova dumka, 1985. 136 p.
2. Lysanov V.S., Bukin V.A., Glagovskii B.A., Borovskii G.V., Ippolitov G.M., Kamenkovich A.O., Kremen' Z.I., Popov S.A., Shilonenko-Borodich N.E. *El'bor v mashinostroenii* [El'bor borazon material in mechanical engineering]. Leningrad, Mashinostroenie, 1978. 280 p.
3. Kapustin A.I., Nuzhdin G.A. *Poluchenie i svoistva sverkhтвердыkh kompozitov* [Preparation and properties of superhard composites]. Moscow, Mashinostoroenie, 1999. 96 p.
4. Nuzhdin G.A. Struktura sverkhтвердыkh kompozitov [The structure of superhard composites]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*, 2001, no. 4, pp. 9-10.
5. Malyshev S.N., Filonenko V.P., Zakharevich E.M., Perfilov S.A. Opyt promyshlennogo primeneniia sverkhтвердыkh instrumental'nykh nanomaterialov [Experience

of industrial application of superhard tools nanomaterials]. *RITM*, 2011, №2 (60), pp. 42-44. Available at: [http://www.ritm-magazine.ru/pdf/RITM\\_60.pdf](http://www.ritm-magazine.ru/pdf/RITM_60.pdf) , accessed 08.07.2012.

6. Reznikov A.N., Ed. *Abrazivnaia i almaznaia obrabotka materialov. Spravochnik* [Abrasive and diamond processing of materials. Handbook]. Moscow, Mashinostroenie, 1977. 391 p.

7. Grubiy S.V. *Metody optimizatsii rezhimnykh parametrov lezviinoi obrabotki* [Optimization techniques of regime parameters of edge cutting treatment]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. 96 p.

8. Huang Y., Liang S.Y. Modeling of CBN Tool Flank Wear Progression in Finish Hard Turning. *Trans. of the ASME: Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, vol. 126, no. 1, pp. 98-107. DOI: 10.1115/1.1644543.

9. Grubiy S.V. Modelirovanie protsessa iznashivaniia reztsov iz nitrída bora pri obrabotke zakalennykh stalei [Modeling of the process of wearing of cutters of boron nitride in the processing of hardened steels]. *Tekhnologíia metallov*, 2003, no. 11, pp. 11-16.