



Национальная академия наук Украины  
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля



Клименко С.А., д.т.н., проф.

**Механическая обработка  
инструментами из  
сверхтвердых материалов:  
состояние и перспективы**

**Механическая обработка** - обработка изделий из различных материалов с помощью механического воздействия с применением резца, сверла, фрезы и другого режущего инструмента. Процесс обработки осуществляется на металлорежущих станках, в установленном порядке согласно технологическому процессу.

Технический прогресс в машиностроении в значительной степени определяется совершенствованием технологии производства машин. На долю этого процесса приходится свыше **40%** общей трудоемкости изготовления машин; **80%** деталей подвергаются механической обработке. По мере совершенствования машин объем механической обработки будет увеличиваться – таков прогноз специалистов в области технологии машиностроения (**CIRP**). При этом основное внимание будет уделяться процессам финишной механической обработке.

**Процессы механической обработки базируются на результатах научных исследований природы и закономерностей протекания механических и физико-химических явлений в зоне контактирования инструмента с изделием с учетом действия среды, окружающей зону обработки, механизмов изнашивания и разрушения инструментов, закономерностей формирования состояния поверхностного слоя изделий в процессе обработки.**

**Ключевую роль в обеспечении технологии играет используемый инструмент, материал его режущей части, кинематика движения и конструкция**

**Научное направление деятельности Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины  
(пост. Президиума НАН Украины № 32 от 12.02.2012 г.)**

**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ И НЕМЕТАЛЛОВ ИНСТРУМЕНТОМ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ, РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ В БАЗОВЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

# ТЕНДЕНЦИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНООБРАБОТКИ

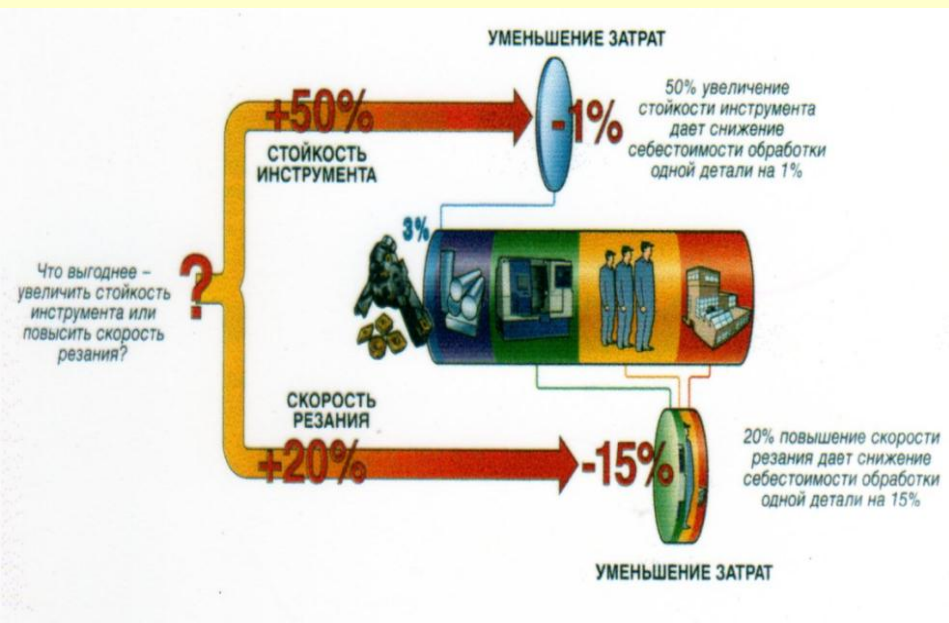
**Увеличение зоны взаимодействия инструмента с изделием:** увеличение размеров инструмента; применение одновременно работающих нескольких инструментов; увеличение площади контактирования инструмента с изделием; замена точечного контакта инструмента с изделием на линейный, распределенный по поверхности или объемный.

**Увеличение интенсивности взаимодействия инструмента с изделием:** увеличение энергетического действия инструмента на изделие; обработка материалов в термообработанном состоянии; уменьшение машинного времени за счет увеличения скорости относительного перемещения инструмента и изделия.

**Обеспечение согласованности действия параметров технологической системы «станок-деталь-инструмент»:** за счет «сухой» обработки или обработки с минимальным количеством СОТС, позволяющая снизить себестоимость обработки и решить экологические проблемы; разработка новых кинематических решений для движений в системе «СПИД».

**Максимальное использование ресурсов системы:** совмещение различных операций и переходов металлообработки на одном станке для изготовления детали с одной установки; обработка материалов в термообработанном состоянии; обработка с максимальными для данного оборудования режимами.

# ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ОБРАБОТКА

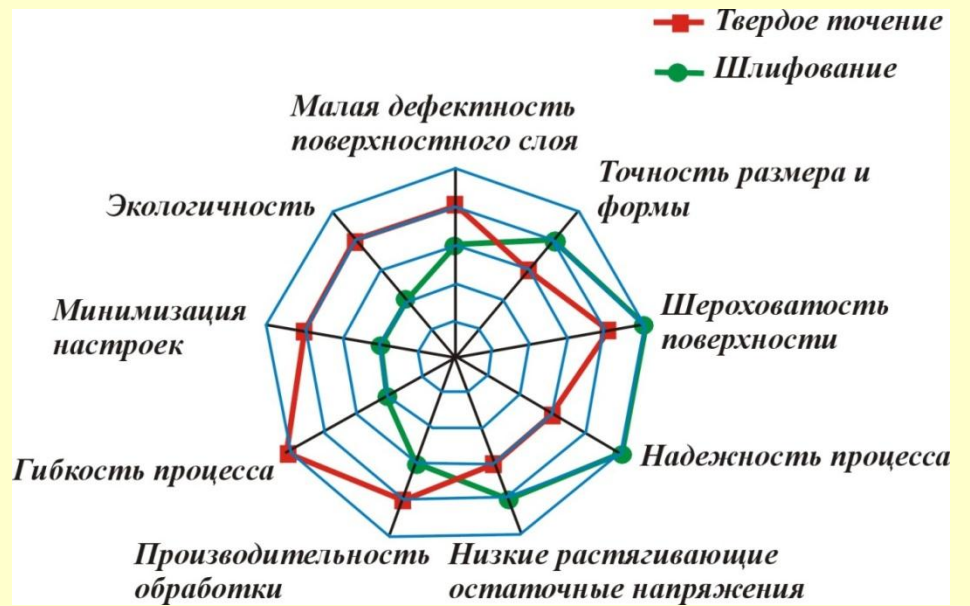


## ОБРАБОТКА БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ СРЕД

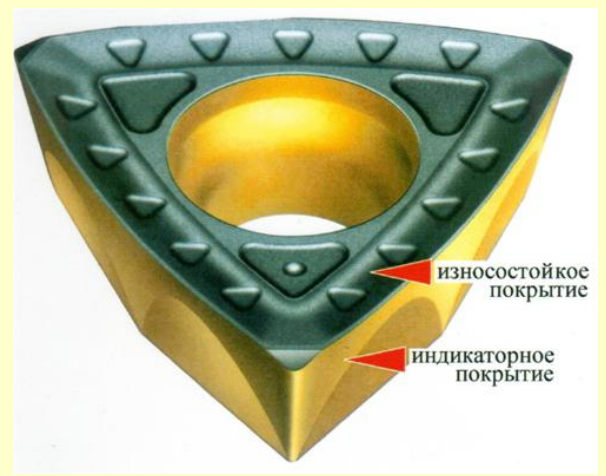
Применение СОТС требует: — использование специальных очистных сооружений, необходимых для их утилизации, организацию их приготовления, транспортировки, регенерации; — необходимость обезжиривания стружки и обработанных поверхностей. Затраты на жидкую СОТС (с учетом влияния на окружающую среду и утилизацию) — до 30 % общих затрат на металлообработку.

СОТС, особенно на масляной основе, вредны для здоровья человека.

# «ТВЕРДОЕ» ТОЧЕНИЕ



# ИНСТРУМЕНТЫ С ЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ И СМЕННЫМИ ПЛАСТИНАМИ



## ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛУ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ИНСТРУМЕНТА

Выход режущего инструмента из строя связан с его износом или разрушением. Может наблюдаться как хрупкое, так и пластическое разрушение инструмента.

Инструментальный материал должен обладать достаточным запасом прочности и износостойкостью.

Качество материала режущего инструмента определяется комплексом:

- объемных физико-механических свойств в зависимости от температуры в зоне резания;
- механических поверхностных характеристик;
- химических свойств (жаростойкость; энергия Гиббса по отношению к элементам из состава обрабатываемого материала и окружающей среды; растворимость в железе, никеле, хrome; СВАСК).

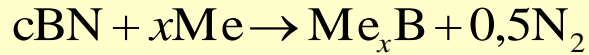
Износ режущего инструмента

$$W = W_{\text{мех}} + W_{\text{хим}} = 1/(K^{0,75} + H^{0,5}) + C_e,$$

где  $W$ ,  $W_{\text{мех}}$ ,  $W_{\text{хим}}$  - износ инструмента полный, обусловленный механическим и химическим взаимодействием, соответственно

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ cBN-Me

## Возможность химической реакции



при нагреве связана с размером термодинамического потенциала Гиббса реакции

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

$$G(Me_xB + 0,5N_2) = x^o G_{Me} + {}^o G_B + \Delta G_{Me_xB}^f(\theta) +$$

$$+ \int_0^p V_{Me_xB} dp + 0,5 \left( {}^o G_{N_2} + R\theta \ln p \right),$$

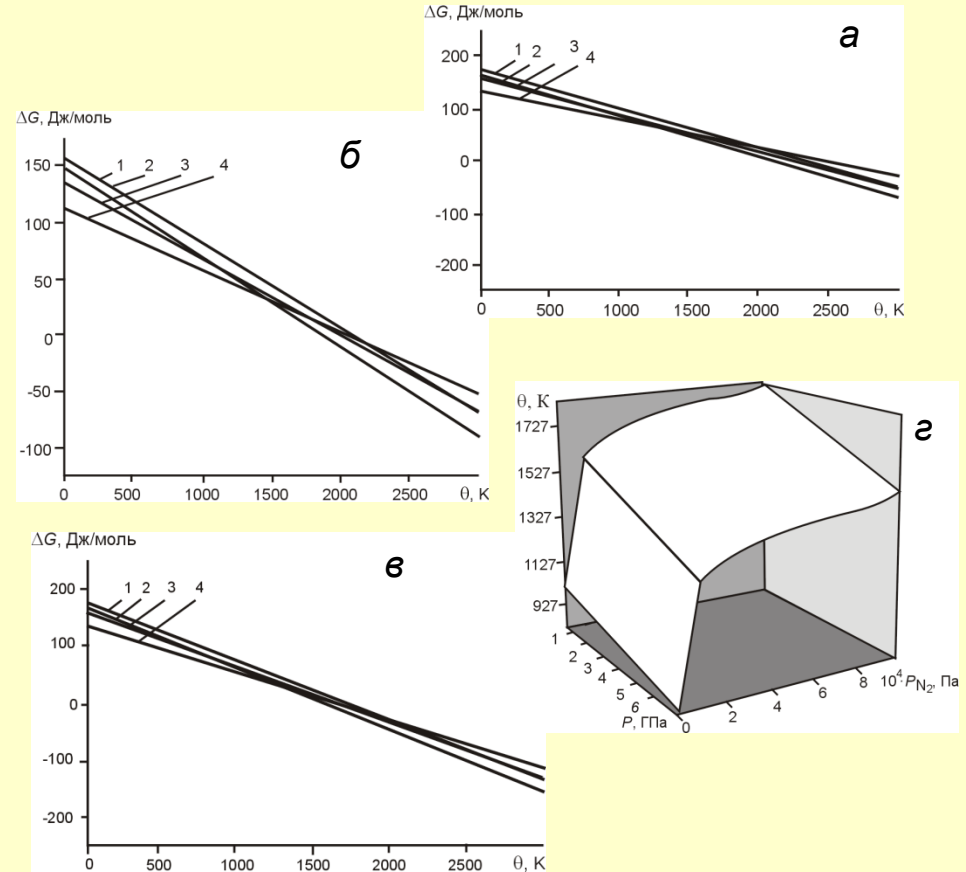
$$G(cBN + xMe) = x^o G_{Me} + {}^o G_B + \Delta G_{cBN}^f(\theta) +$$

$$+ \int_0^p V_{cBN+xMe} dp + 0,5 \left( {}^o G_{N_2} + R\theta \ln p_0 \right).$$

## Свободная энергия Гиббса реакции

$$\Delta G_r(\theta) = \Delta G_{Me_xB}^f(\theta) - \Delta G_{cBN}^f(\theta) +$$

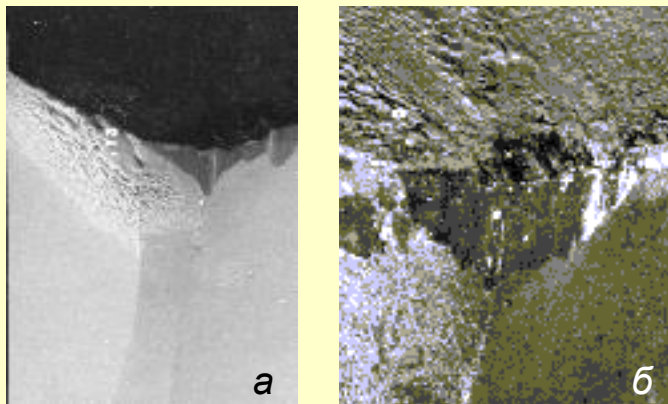
$$+ \int_0^p \Delta V_{Me_xB-cBN-xMe} dp + 0,5 R \theta \ln \frac{p}{p_0}$$



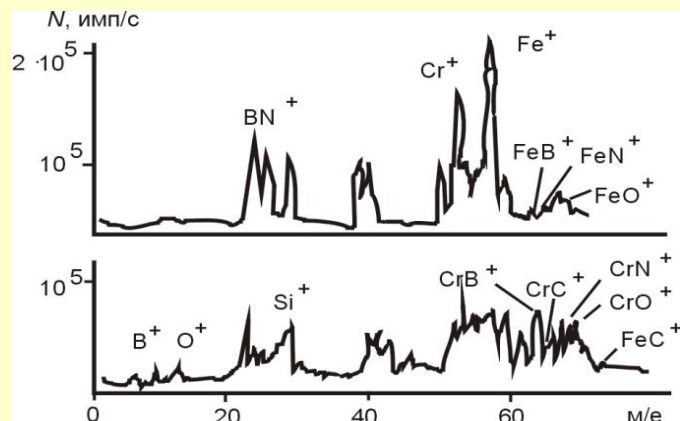
Свободная энергия Гиббса от температуры (а–в) для FeV (1), Fe<sub>2</sub>V (2), Ni<sub>2</sub>V (3), Ni<sub>3</sub>V (4) и зависимость температуры при ΔG = 0, от величины парциального давления N и контактного давления P (г): а – без учета парциального давления N и P в контакте; б – при парциальном давлении N 100 Па, без учета P в контакте; в – при парциальном давлении N 100 Па и P в контакте 5 ГПа



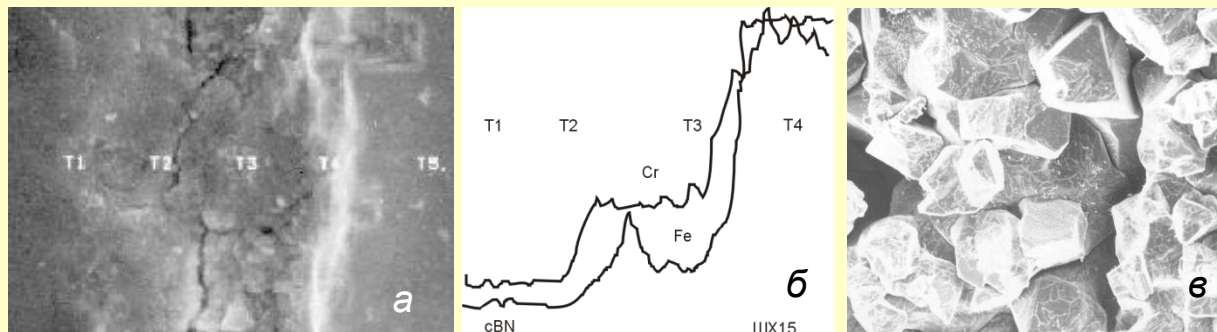
# ЭВТЕКТИЧЕСКОЕ ИЗНАШИВАНИЕ ИНСТРУМЕНТА ИЗ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА



Покрытие на инструменте из PCBN киборит, сформированное при точении стали ШХ 15: а –  $v = 0,5$  м/с,  $h_3 = 0,24$  мм; б –  $v = 1,25$  м/с,  $h_3 = 0,24$  мм

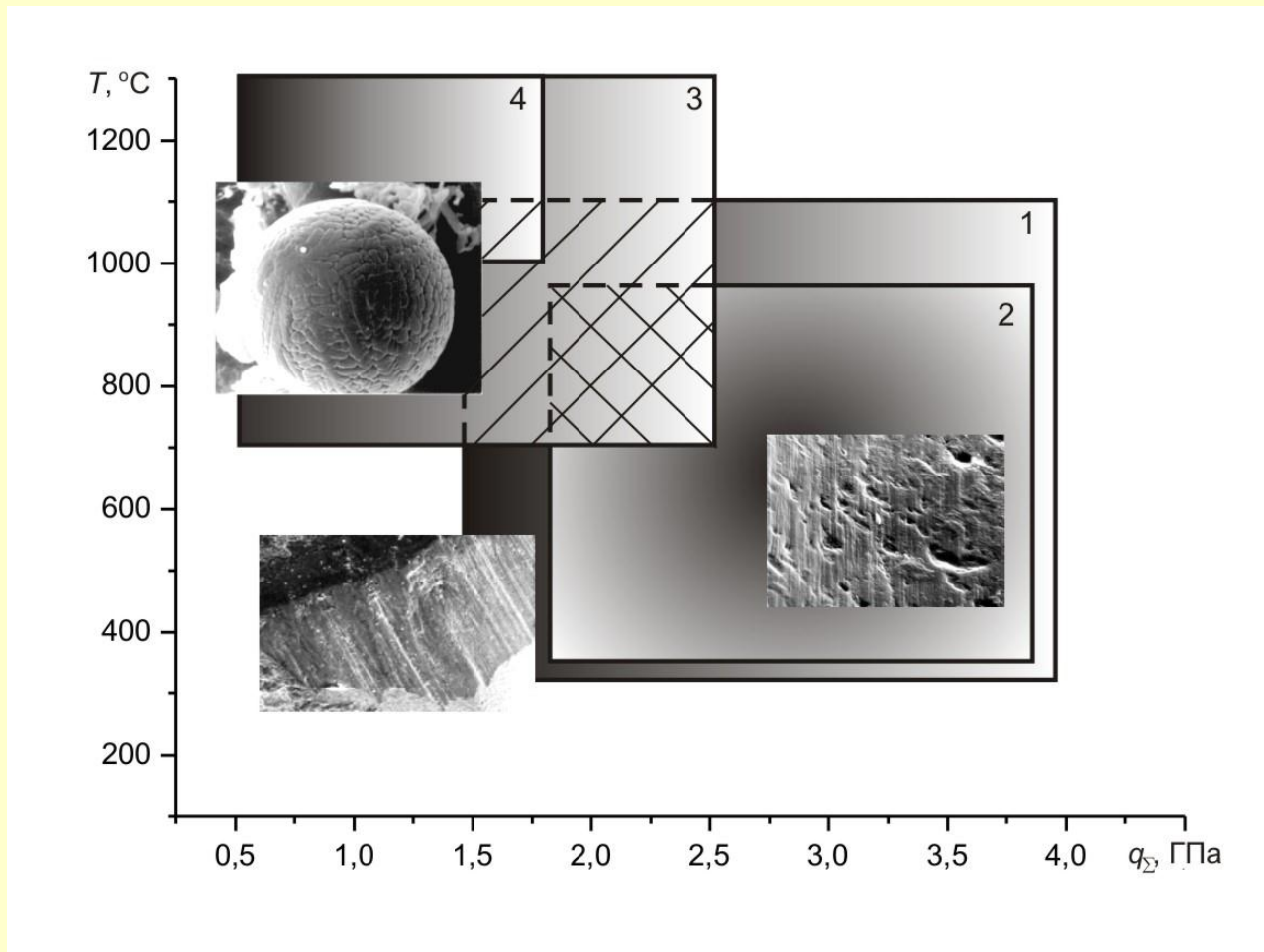


Масс-спектры положительных вторичных ионов с поверхности резца из PCBN киборит: а – после точения сплава 5Х4В3МФС; б – то же после травления ионами кислорода (30 мин)



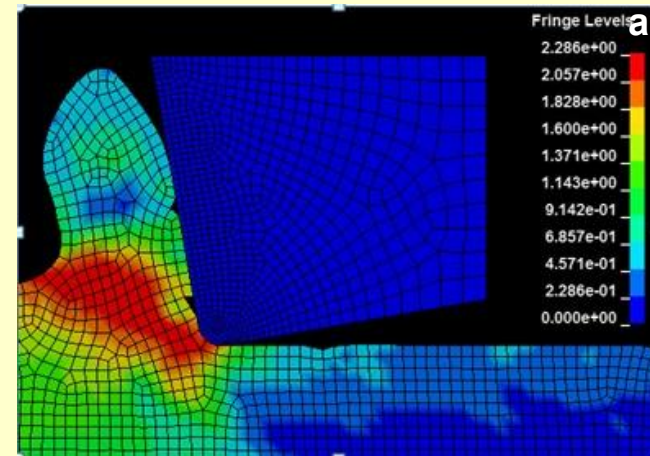
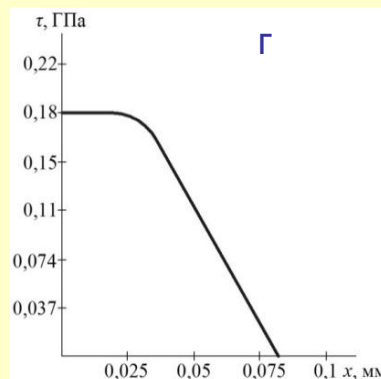
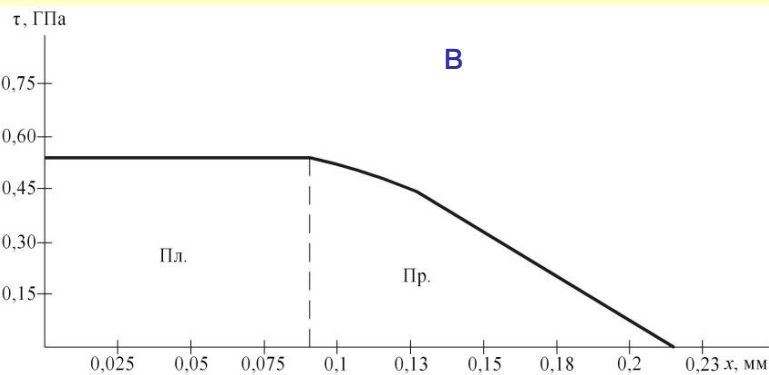
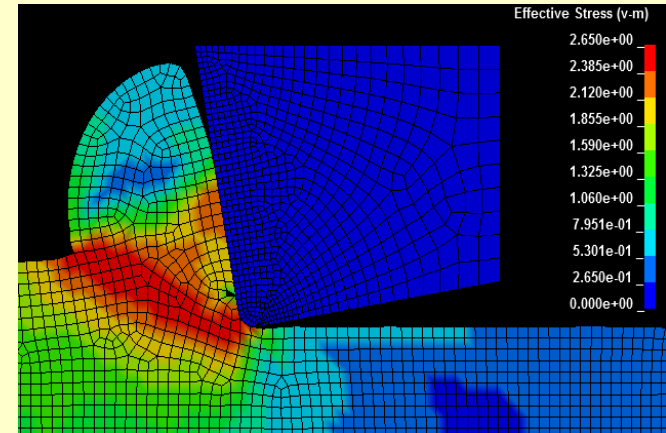
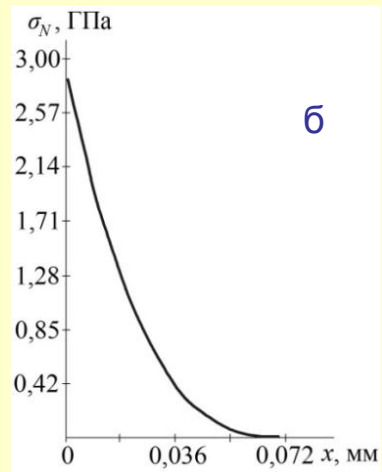
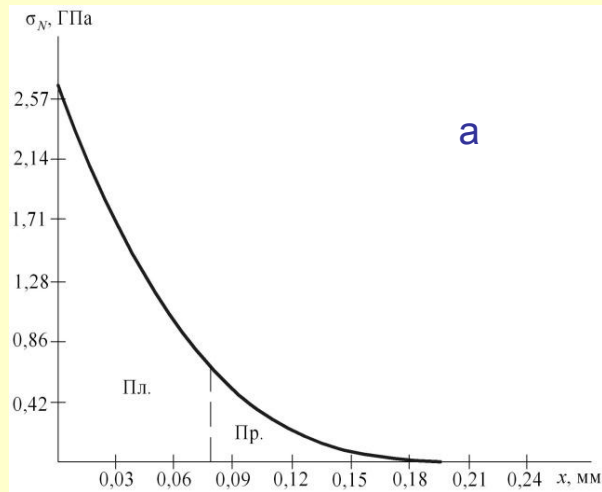
Зона взаимодействия PCBN киборит со сталью ШХ 15 (а), распределение в ней химических элементов (б), кристаллические частицы, образовавшиеся в результате взаимодействия (в). Термоактивация.

Сферическая частица из продуктов взаимодействия, отобранная из окружающей среды



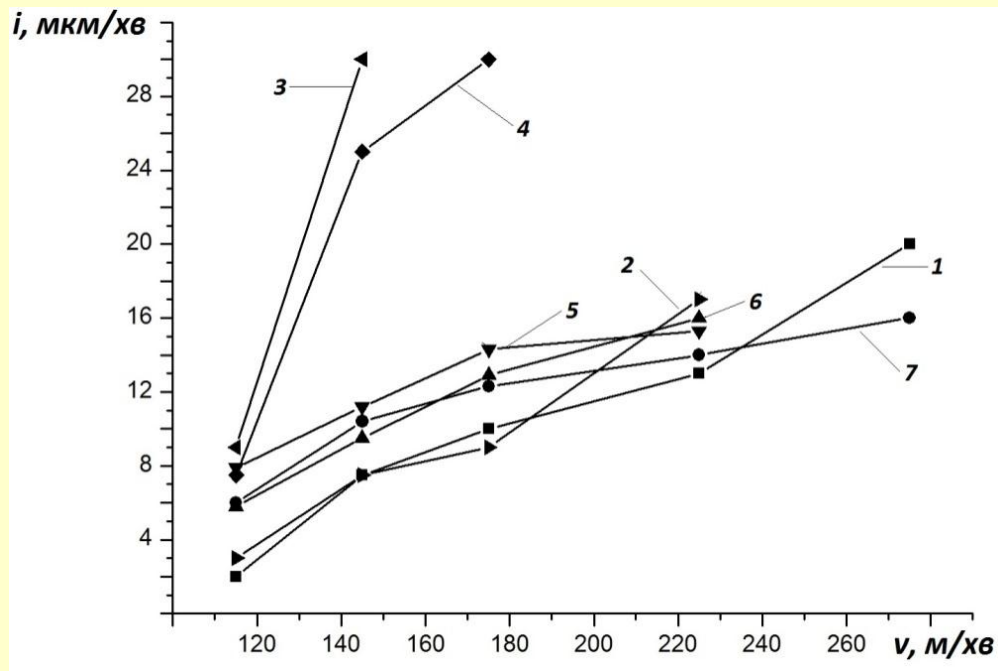
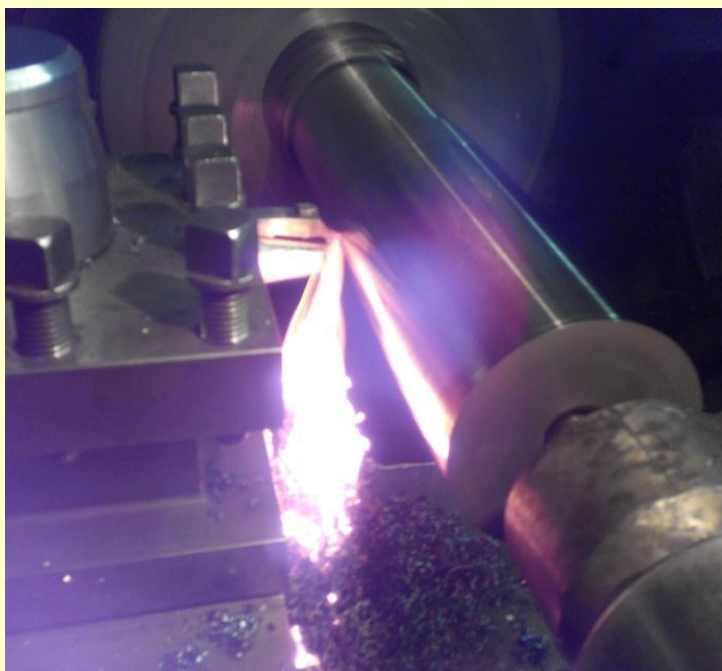
**Карта механизмов изнашивания инструмента с PCBN:**

**1 – абразивное; 2 – адгезионное; 3, 4 – химическое (3 – за счет контактно-реактивного плавления продуктов взаимодействия; 4 – за счет окисления материала инструмента) (увеличение интенсивности окрашивания – увеличение интенсивности изнашивания)**



**Распределение нормальных (а, в) и касательных (б, г) напряжений вдоль контактного участка передней поверхности инструмента с высоким содержанием нитрида бора CBN (97 об. %)-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (а, в) и низким содержанием нитрида бора (CBN-TiC(45 об. %)-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (3 об. %) (б, г) при точении стали ХВГ ( $v = 200$  м/мин;  $S = 0,1$  мм/об;  $t = 0,2$  мм)**

**Распределение эквивалентных (по Мизесу) напряжений при обработке инструментами:  
а – ВН-CBN; б – ВЛ-CBN**



**Зависимость скорости изнашивания инструментов из PCBN от скорости резания при точении стали ШХ15 (62 HRC) ( $S = 0,1$  мм/об;  $t = 0,2$  мм): 1 – CBN100, 2 – WBN565, 3 – томал-10, 4 – борсинит, 5 – wBN (55 об. %)–TiN, 6 – wBN (55 об. %)–TiC, 7 – cBN (55 об. %)–TiC**

# ПОВЫШЕНИЕ СОСТОЙКОСТИ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ, ОСНАЩЕННЫХ РСВН, ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ТОЧЕНИИ

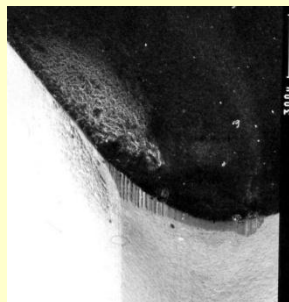
А. Нитридная добавка в шихту

PCBN



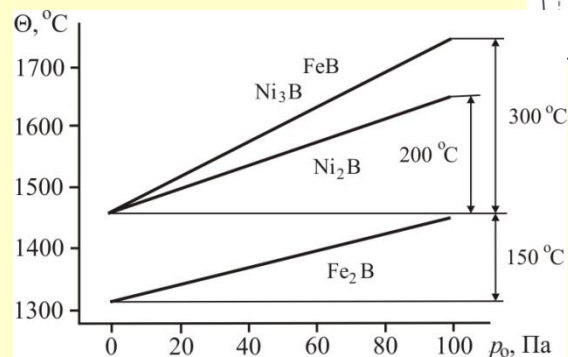
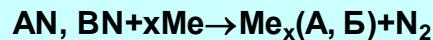
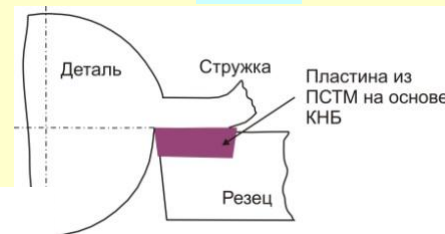
Б. Нитридная добавка в покрытие

$P_1, T_1 < T$



ПГ-10Н-01  
 $v = 75$  м/мин

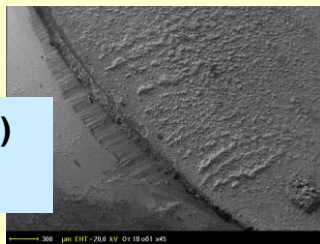
$N_2$



$\uparrow v (T_2)$

ШХ15 (60-62 HRC)

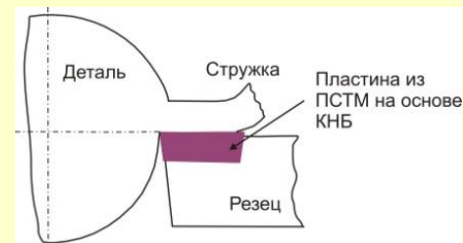
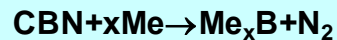
$v = 100$  м/мин



Износ инструмента

Повышение износостойкости инструмента при высокой скорости резания

$P_2, T_2 > T_1$



# «АКТИВНОЕ» ПОКРЫТИЕ

Система (CBN-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/NbN) – (Fe-Ni-Cr)

1080–1100 °C



Образование соединений типа (Fe, Ni, Cr)<sub>x</sub>Si/Nb<sub>y</sub>, (Fe, Ni, Cr)<sub>x</sub>Si/Nb<sub>y</sub>O<sub>z</sub> при взаимодействии в системах Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/NbN – (Fe, Ni, Cr)

+ N<sub>2</sub> →

1530–1680 °C



Образование соединений типа (Fe, Ni, Cr)<sub>x</sub>B<sub>y</sub>, (Fe, Ni, Cr)<sub>x</sub>B<sub>y</sub>O<sub>z</sub> при взаимодействии в системе CBN – (Fe, Ni, Cr)

+ N<sub>2</sub> →

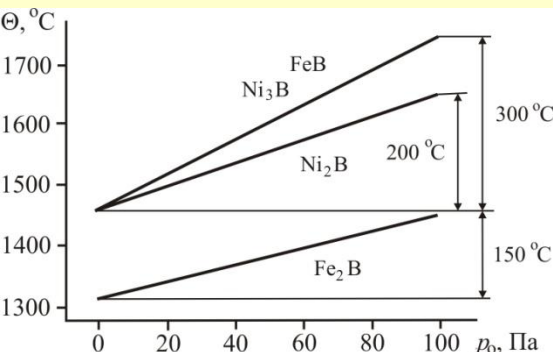
1400–1440 °C



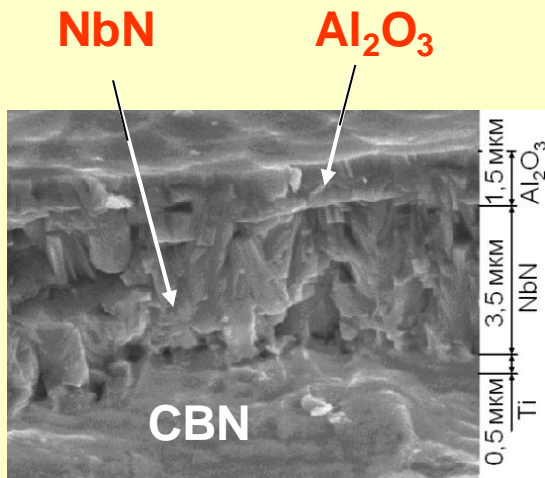
Образование и плавление эвтектик типа Me-Me<sub>x</sub>B<sub>y</sub>, Me-Me<sub>x</sub>B<sub>y</sub>O<sub>z</sub> в системах (CBN-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/NbN) – (Fe, Ni, Cr)

→ Износ

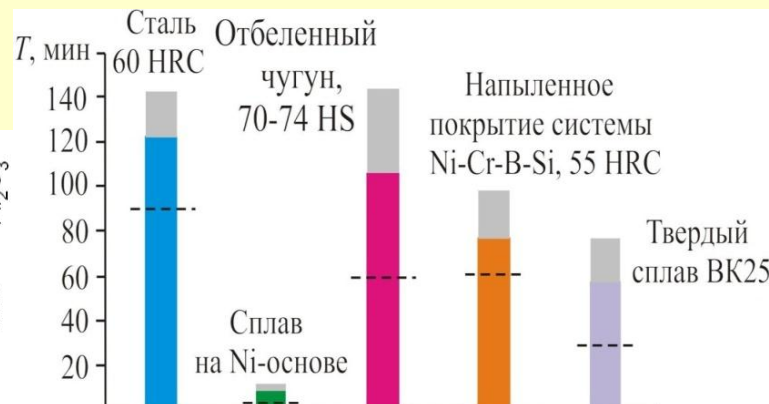
Модельная схема влияния химического взаимодействия в зоне резания на износ инструмента, оснащенного ПСТМ на основе CBN



Влияние давления азота на изменение температуры образования боридов Fe и Ni



Излом инструмента с покрытием

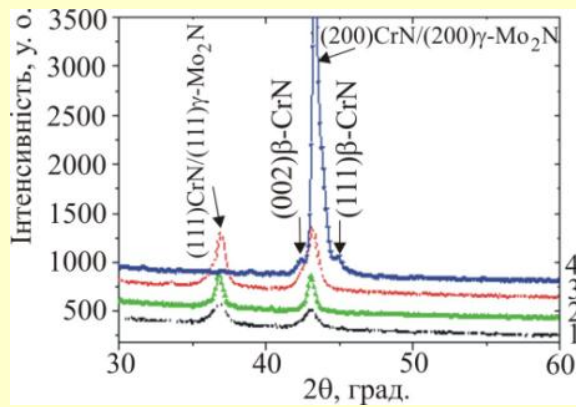
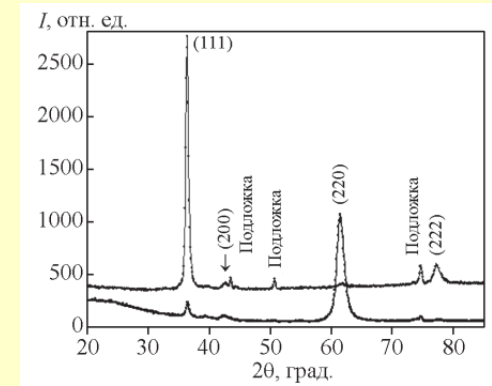
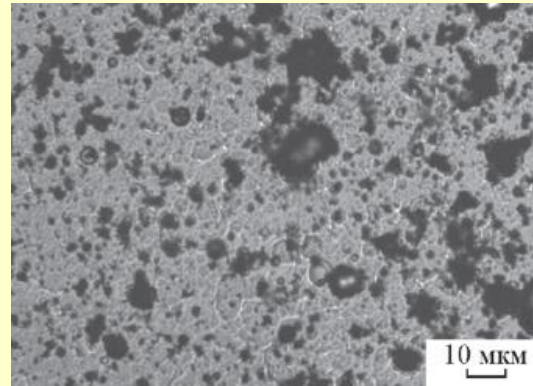
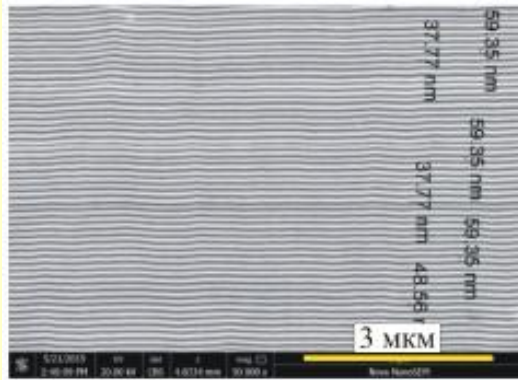


Повышение (над чертой) стойкости для инструмента с покрытием

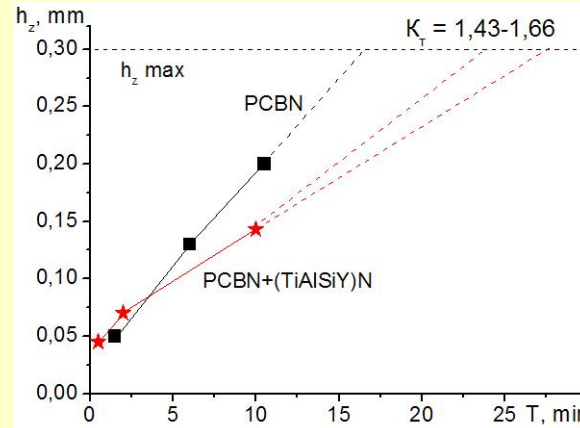
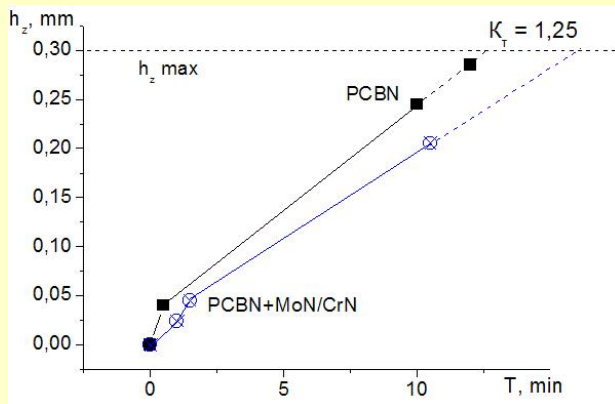
# НАНОСТРУКТУРНЫЕ ПОКРЫТИЯ С ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ТВЕРДОСТЬЮ

Покрытие MoN/CrN ( $H_{0,5} = 38$  ГПа)

Покрытие (TiAlSiY)N ( $H_{0,5} = 49,5$  ГПа)



На рентгendifракционных спектрах выявляется однофазное состояние с ГЦК решеткой, имеет место формирование текстуры с осью [111], которая перпендикулярна плоскости роста. Формирование текстуры отвечает расположению параллельно плоскости роста наиболее плотно упакованных слоев металлических атомов и атомов азота. Размер кристаллитов  $\sim 140$  нм.



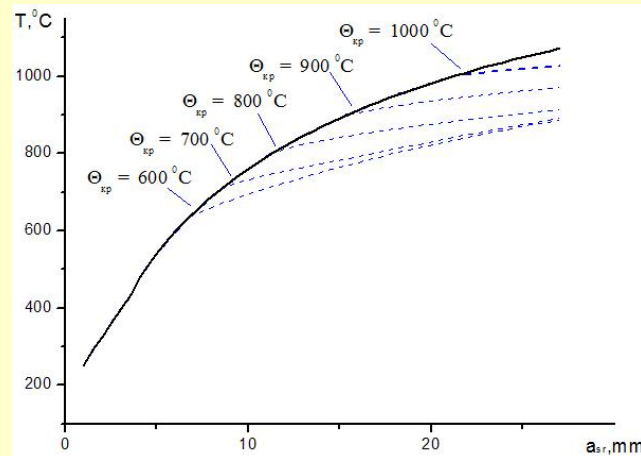
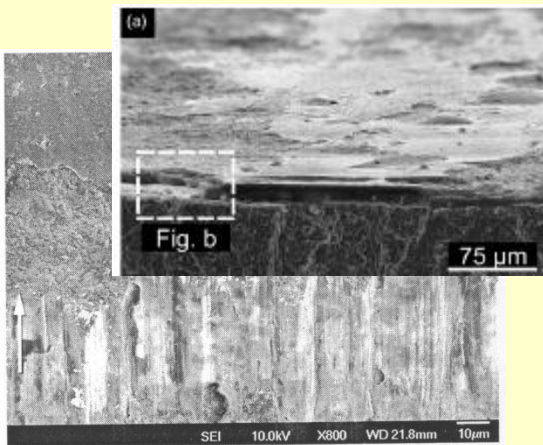
Износ по задней поверхности инструмента с покрытием MoN/CrN (а) и (TiAlSiY)N (б) при точении стали ХВГ (62 HRC).

# «САМОАДАПТИВНЫЕ» ПОКРЫТИЯ

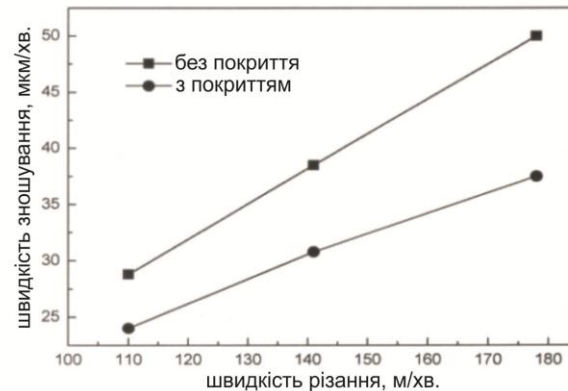
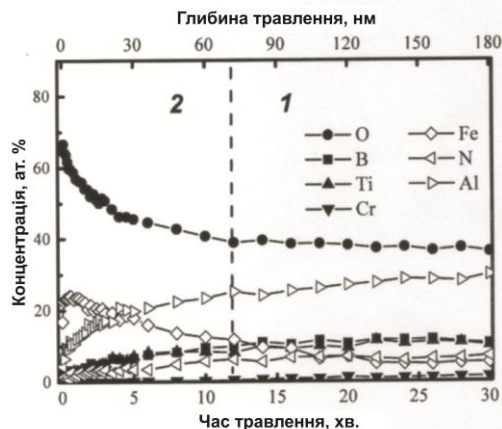
Покрытие  $\text{AlN-Ti(Cr)B}_2$  ( $\text{HV}_{0,5} = 22,18$  ГПа). В процессе резания имеет место формирование полиоксидных вторичных структур - стеклоподобных трибопленок. В слое на глубине до 70 нм при  $T < 1000$  °C образуются ограниченных твердые растворы на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3$  систем ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-AlN}$ ) – термостойкие до 1400 °C

$\text{AlN} + \text{O}_2 = \text{Al}_x\text{O}_y\text{N}_z - \theta_{\text{кр}} \sim 900\text{-}1000$  °C (1200 °C в равновесных условиях);

$\text{Ti(Cr)B}_2 + 2,5\text{O}_2 = (\text{TiCr})\text{O}_2 + \text{B}_2\text{O}_3 - \theta_{\text{кр}} \sim 700$  °C;  $\text{Ti(Cr)B}_2 + \text{O}_2 = (\text{TiCr)B} + \text{B}_2\text{O}_3 - \theta_{\text{кр}} \sim 700$  °C

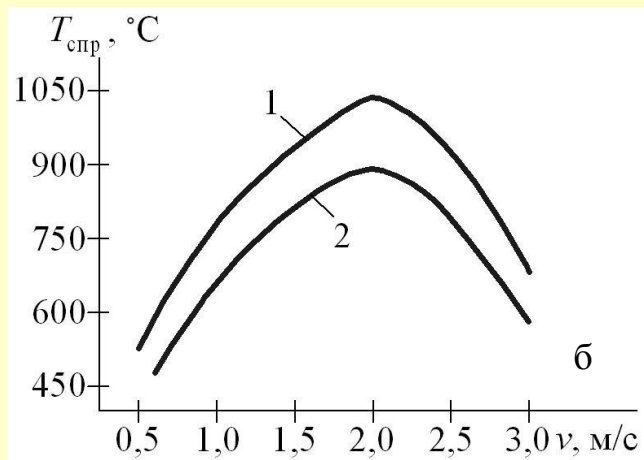
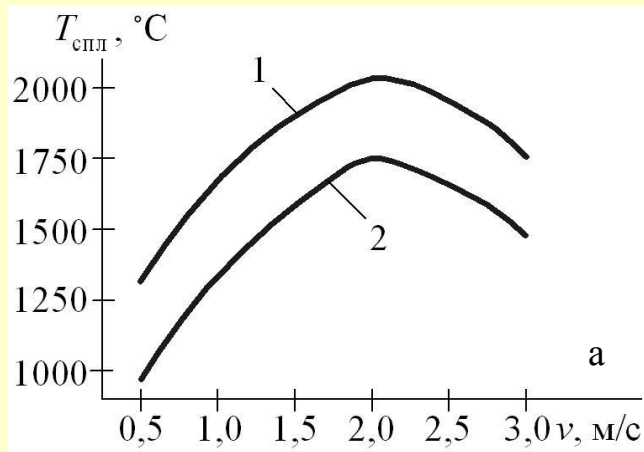


Интенсивное снижение коэффициента трения с началом образования вторичных структур при достижении значения контактной температуры  $\theta_{\text{кр}}$  вызывает существенное снижение силы резания (20%) ( $v = 150$  м/мин,  $\theta_{\text{кр}} \approx 800$  °C) и скорости изнашивания инструмента

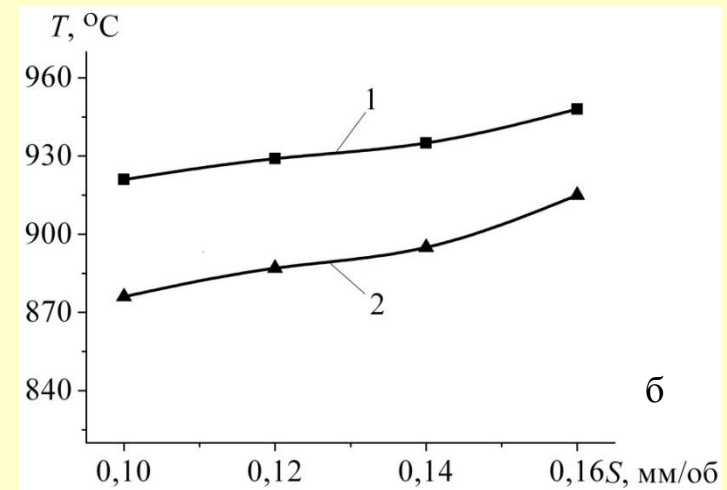
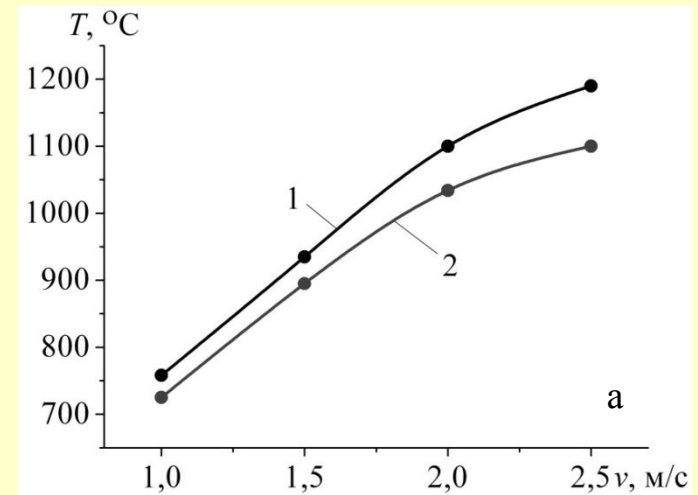




## ТЕМПЕРАТУРА ВСПЫШКИ НА ЛОКАЛЬНОМ ПЯТНЕ КОНТАКТА ДЛЯ ИНСТРУМЕНТА С РСВН



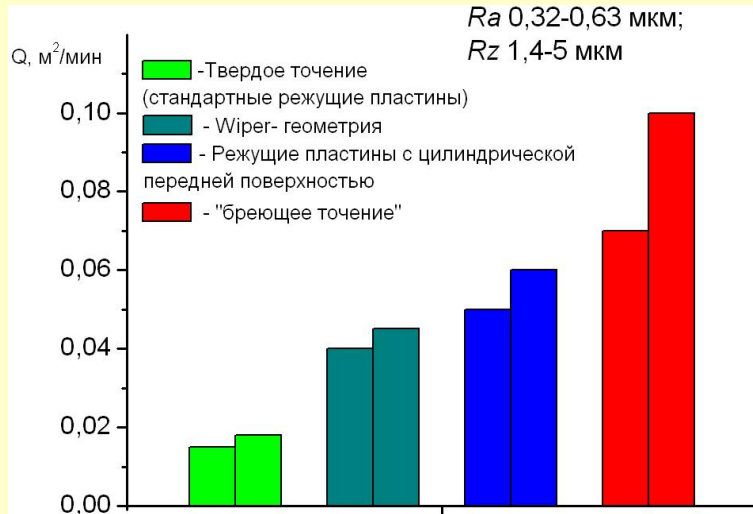
## ТЕМПЕРАТУРА В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ИНСТРУМЕНТОМ С РСВН



**Изменение величины температурных вспышек на пластичном (а) и упругом участка контакта (б) в зависимости от скорости резания для инструмента: 1 - без покрытия; 2 – с покрытием ( $S = 0,14$  мм/об;  $t = 0,2$  мм;  $h_3 = 0,3$  мм)**

**Изменение температуры резания от скорости (а) и подачи (б) при точении стали ШХ15 для инструмента: 1 – без покрытия; 2 – с покрытием (а -  $S = 0,14$  мм/об;  $t = 0,2$  мм; б -  $v = 1,5$  м/с;  $t = 0,2$  мм)**

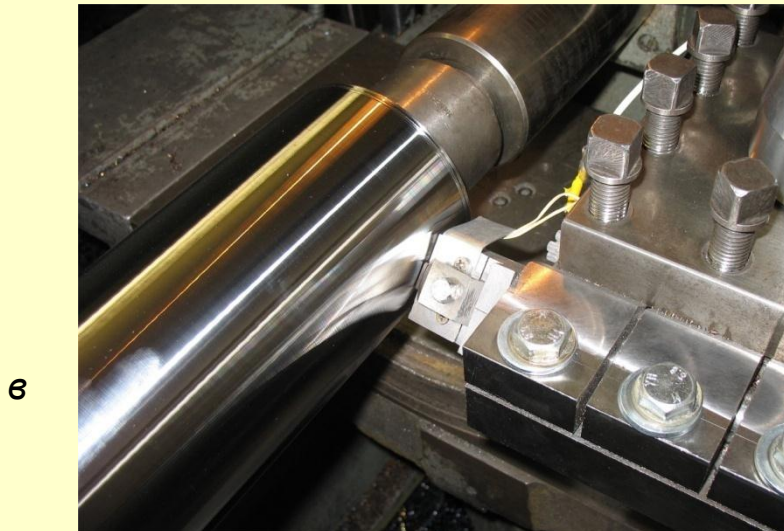
# КОНСТРУКЦИИ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ВЫСОКУЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОБРАБОТКИ И КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННЫХ ИЗДЕЛИЙ



а



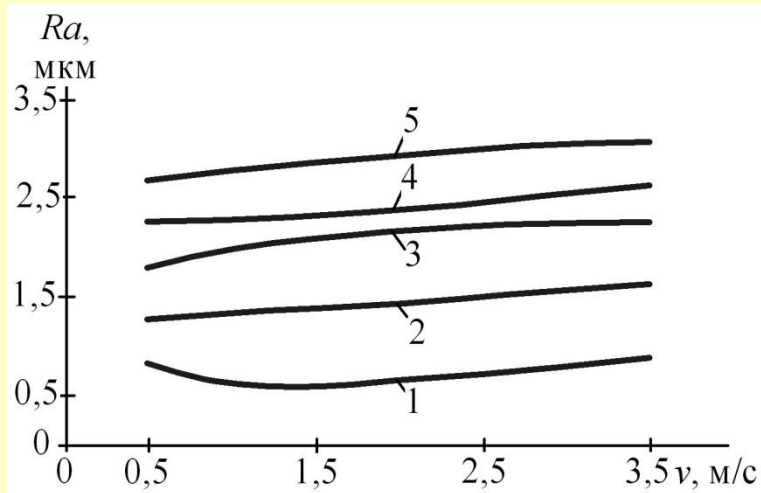
б



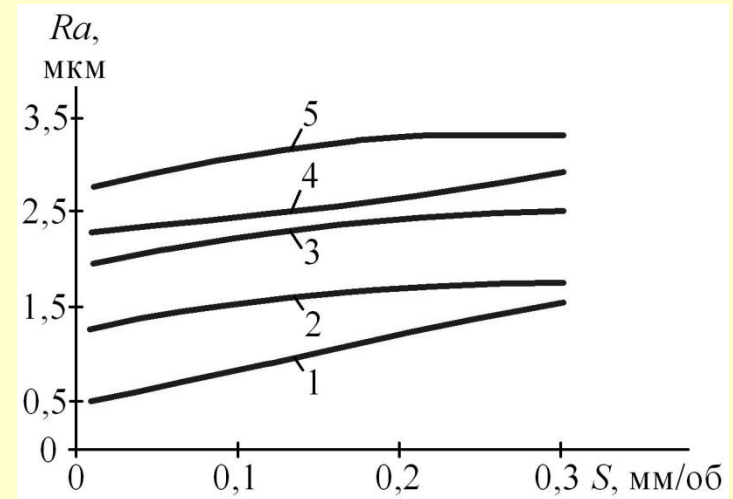
в

Производительность финишной обработки инструментами, оснащенными PCBN (а), обработка детали из закаленной стали резцом с цилиндрической передней поверхностью (б) и «бреющим» резцом (в). Материал детали сталь ШХ15 (60-62 HRC). Материал инструмента: б – PCBN «борсинит»; в – PCBN «киборит»

# ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ



а

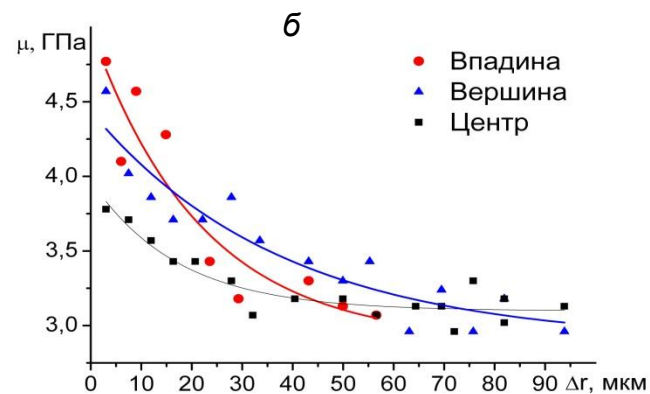
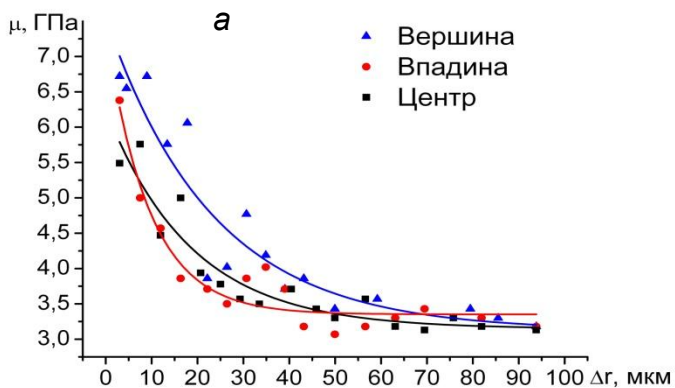
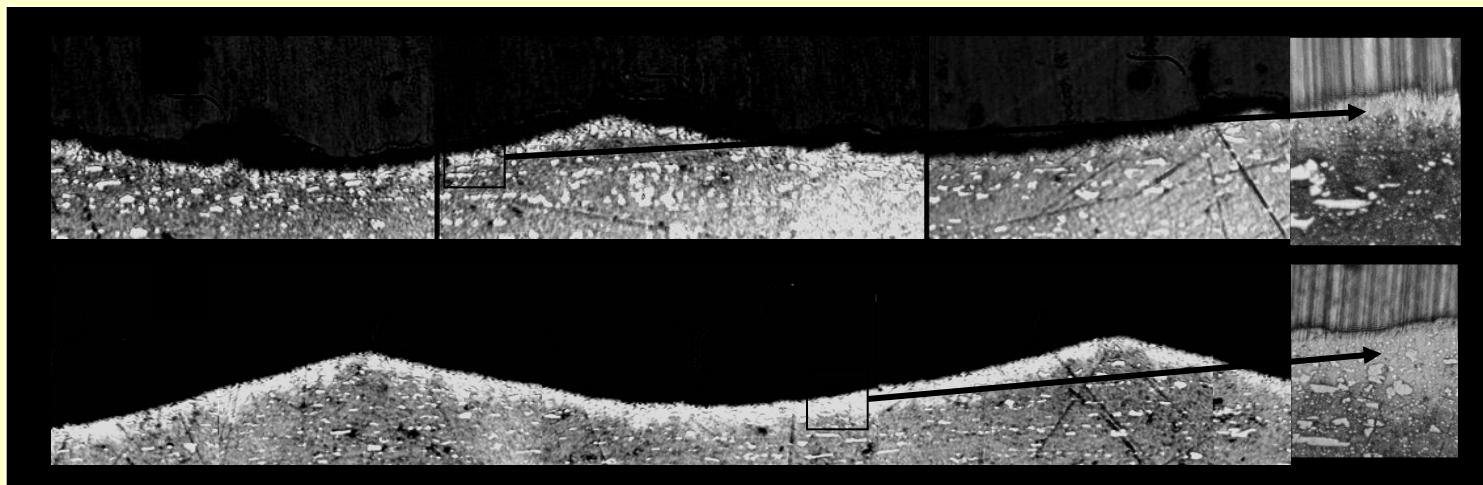


б

Влияние скорости резания (а) ( $S = 0,05$  мм/об;  $t = 0,15$  мм;  $h_3 = 0,1$  мм) и подачи (б) ( $v = 1,2$  м/с;  $t = 0,15$  мм;  $h_3 = 0,1$  мм) на шероховатость обработанной поверхности:

- 1 – газопламенное покрытие, напыленное из порошковой проволоки  $Fe_{80}B_{20}$ ;
- 2 – электродуговое покрытие, напыленное из порошковой проволоки  $Fe_{80}B_{20}$ ;
- 3 – электродуговое покрытие, напыленное из порошковой проволоки  $Fe_{79}Cr_{16}B_5$ ;
- 4 – газопламенное покрытие, напыленное порошком  $Fe_{80}B_{20}$ ;
- 5 – газопламенное покрытие, напыленное порошком  $Fe_{79}Cr_{16}B_5$

# СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗДЕЛИЙ



Обрабатываемый материал: ШХ-15 60-60 HRC;  $S = 0,95$  мм/об;  $v = 0,95$  м/с;  $t = 0,15$ ;  $\lambda = 60^\circ$

Инструмент	$P_x$	$P_y$	$P_z$	$R_z$	Средняя толщина “белого” слоя, мкм	
					вершина	впадина
а) $\rho = 12-16$ мкм	250	575	400	17	2,6	6
б) $\rho = 80-100$ мкм	200	1040	320	17	5,2	11

# ТИПОРАЗМЕРЫ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН, ВЫПУСКАЕМЫХ ИСМ НАН УКРАИНЫ

Режущие пластины (сменные многогранные неперетачиваемые) из:

## PCBN:

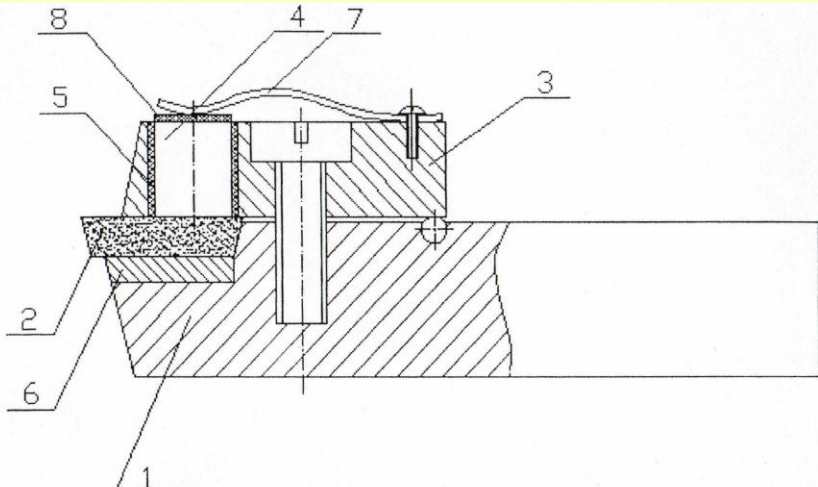
- группа BH (сBN > 70 об. %) (торговая марка «Киборит», «Гереронит», «Борсинит»)
- группа BL (сBN 45–65 об. %) (система сBN (55 об. %)-TiC)
- группа BC (BH с покрытием) (системы (TiAlSiY)N, MoN/CrN, BN<sub>ам</sub>, AlN-Ti(Cr)B<sub>2</sub>)

## PCD:

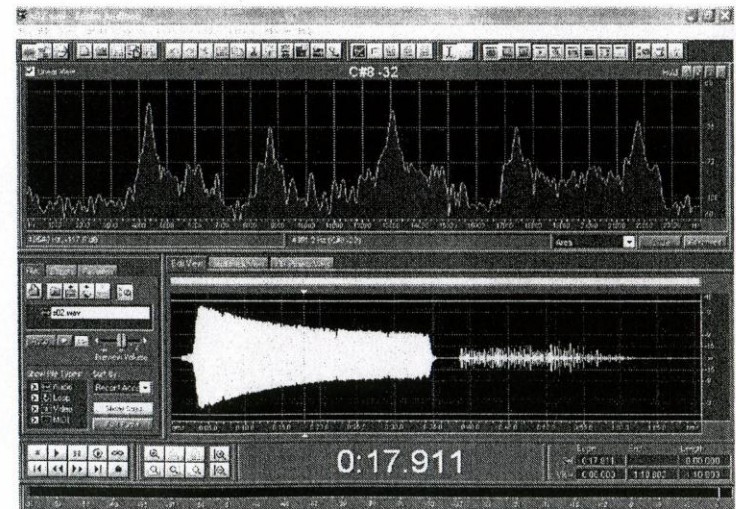
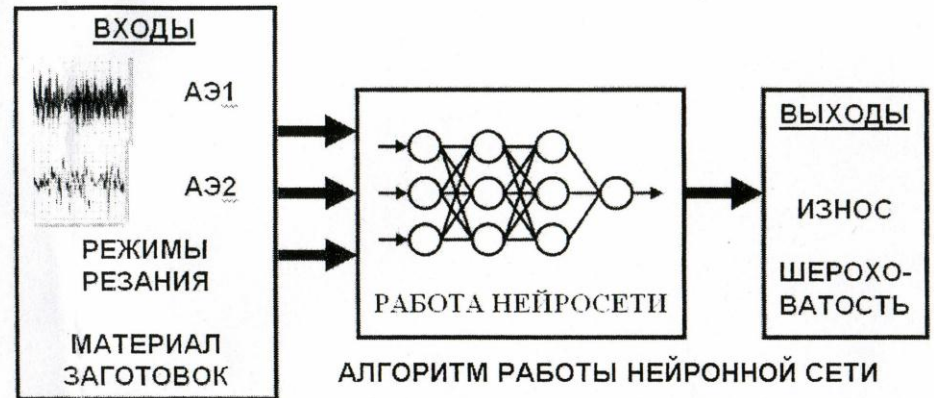
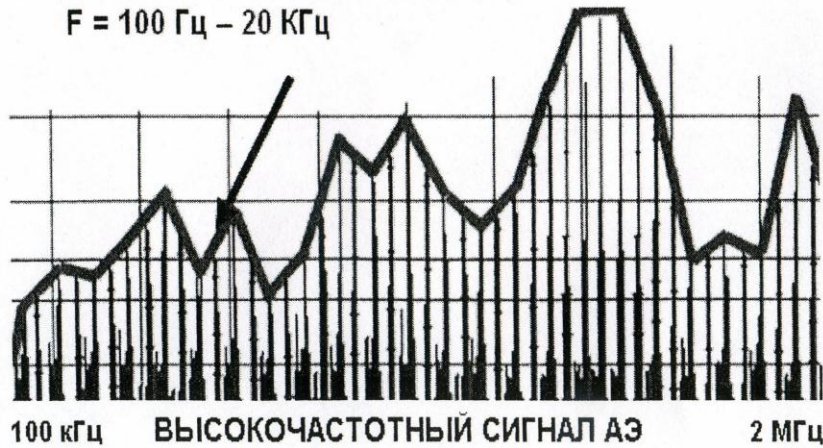
- АТП
- АКП

Обозначение	Форма пластины	D, мм	S <sub>тип</sub> , мм	L, мм	R, мм	α, град
RNMN RBMN RCMN RPMN		4,76 5,56 6,35 7,00	2,38 3,18	-	-	0 5 7 11
SNMN SBMN SCMN SPMN		3,97 4,76 5,56 6,35 7,00	2,38 3,18	L = D	0,4 0,8 1,2 1,6	0 5 7 11
		9,52 12,70 15,80	3,18; 3,97 4,76 5,56		0,4– 3,6	
TNMN TBMN TCMN TPMN		3,97 4,76 5,56 6,35	2,38 3,18	6,88 8,24 9,23 11,00	0,4 0,8 1,2 1,6	0 5 7 11
CNMN CBMN CCMN CPMN		3,97 4,76 5,56 6,35 7,00	2,38 3,18	4,03 4,83 5,64 6,44 8,13	0,4 0,8 1,2 1,6	0 5 7 11
RBMH RCMH RPMH		4,76 5,56 6,35 7,00 9,52 12,70	3,18	-	-	5 7 11

# «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ» ИНСТРУМЕНТ, ОСНАЩЕННЫЙ ДАТЧИКОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ



НИЗКОЧАСТОТНАЯ ОГИБАЮЩАЯ  
 $F = 100 \text{ Гц} - 20 \text{ КГц}$



# ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

На металлической связке



На органической связке



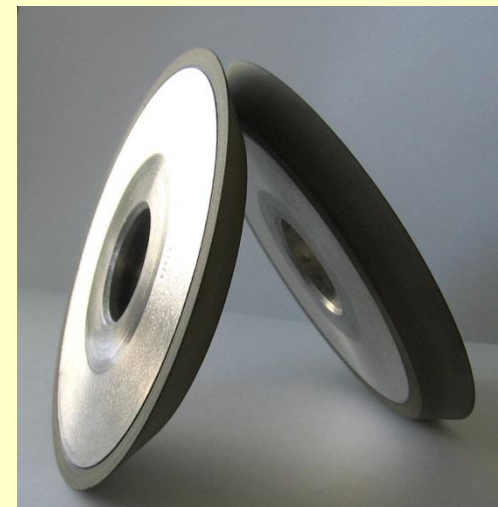
На гальванической связке



На керамической связке

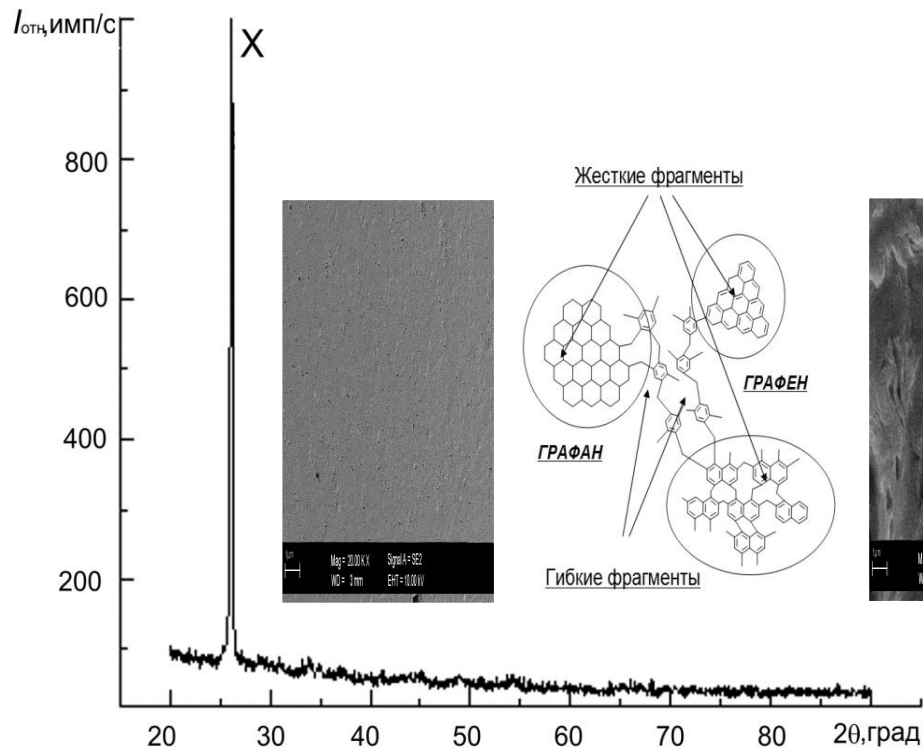


На гибридной керамо-полимерной связке



# АБРАЗИВНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА СВЯЗКАХ ИЗ УГЛЕРОДНОЙ КЕРАМИКИ С МУЛЬТИГРАФЕНОВОЙ СТРУКТУРОЙ

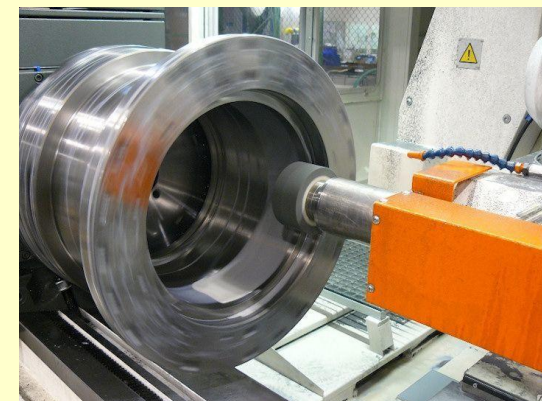
Низкотемпературная технология изготовления абразивных композитов, обладающих характерным динамическим поведением материалов на керамических связках, основана на синтезе структур, включающих слои графена, сшитые ультрадисперсными частицами металлов, оксидов и других неорганических соединений



Дифрактограмма та структура мультиграфенового композиту



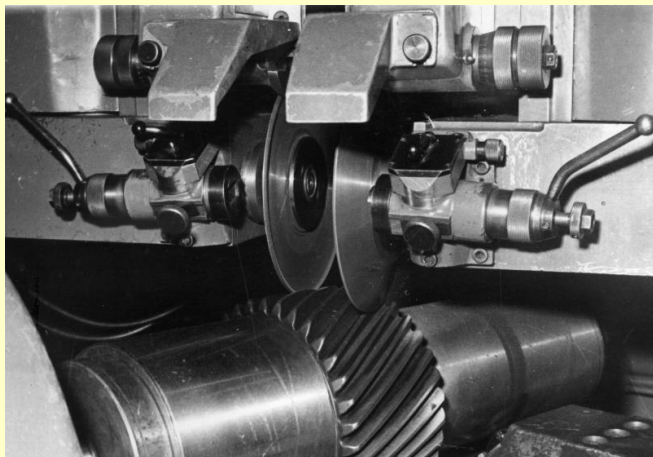
Шлифовальные круги 1А1 80x20x5x20 КВ 160/125 КА03 100%



Шлифование отверстия в детали из сплава ЖС6К



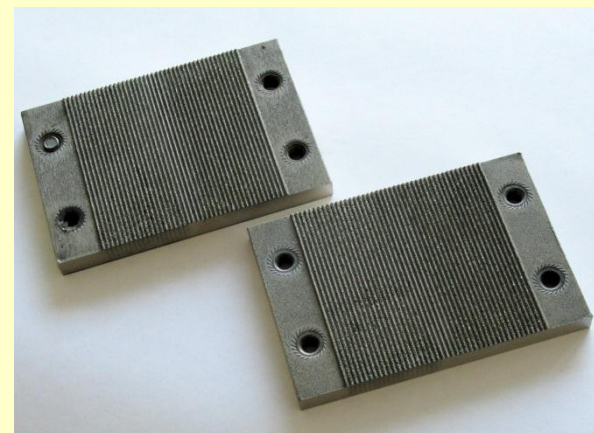
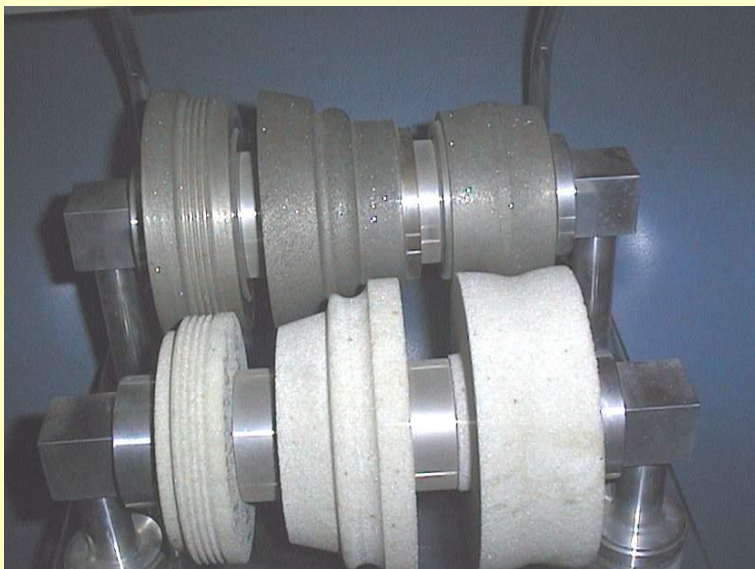
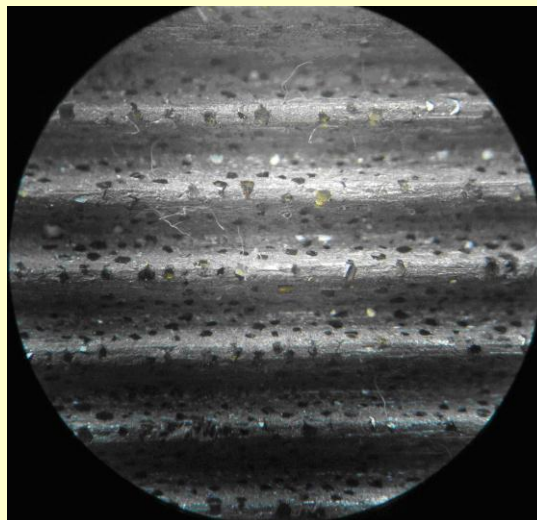
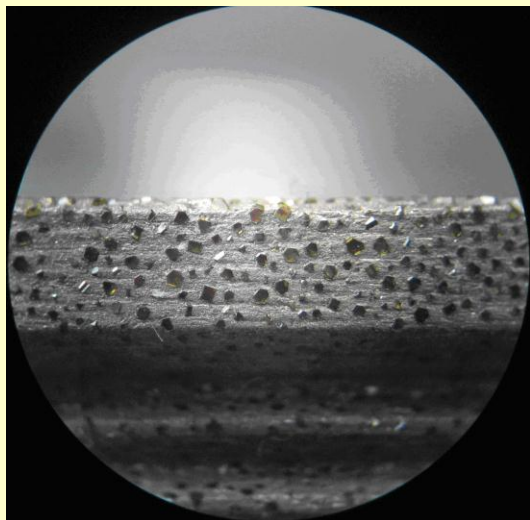
# АЛМАЗНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ВИСОКОТОЧНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС



Шлифовальный круг	Мощность шлифования, Вт	Периодичность правки	Увеличение производительности обработки
Круг с электрокорундом белым	200	после 5–10 зубьев	базовый процесс
Круг с CBN на органической связке	100	посля 1 полного оборота колеса	1,2 раза
Круг з CBN на керамической связке	115	посля 2 полных оборотов колеса	до 2 раз
Круг з CBN на металлической связке	120	пісяля 2 повних обертів колеса	до 2 раз



# ИНСТРУМЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРЕЦИЗИОННОЙ ПРАВКИ АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ



# ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ



**закаленные стали**



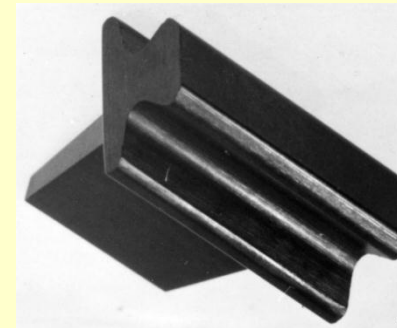
**высокомарганцовистые стали**



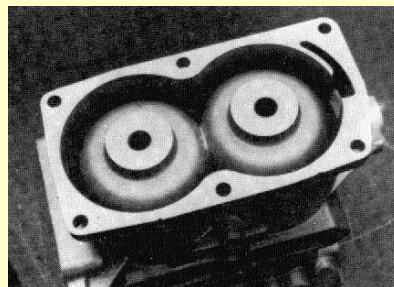
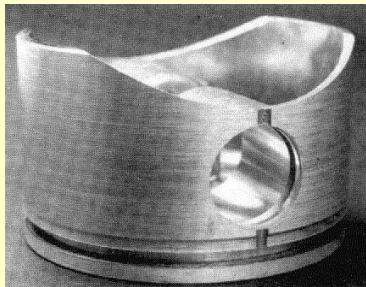
**твердые сплавы**



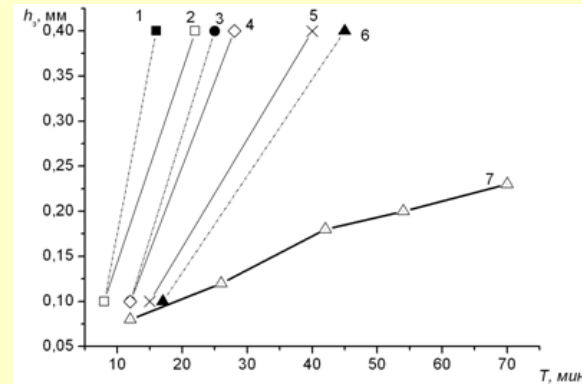
**чугуны**



**керамические материалы**



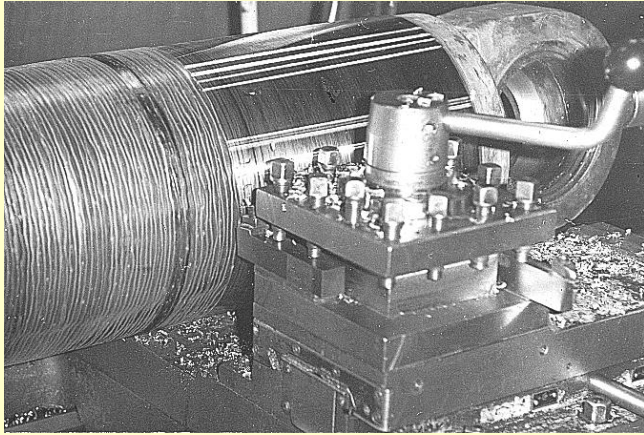
**цветные металлы и сплавы**



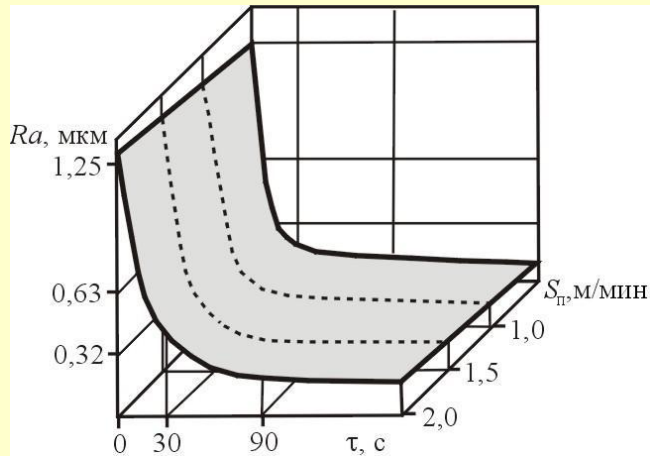
- 1 – БПА без СОТС;
- 2 – БПА с СОТС;
- 3 – АТП без СОТС;
- 4 – АТП с СОТС;
- 5 – ВК8 без СОТС;
- 6 – РСВН без СОТС;
- 7 – РСВН с СОТС

**титановые сплавы (BT22)**

# ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ С НАПЛАВЛЕННЫМИ И НАПЫЛЕННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

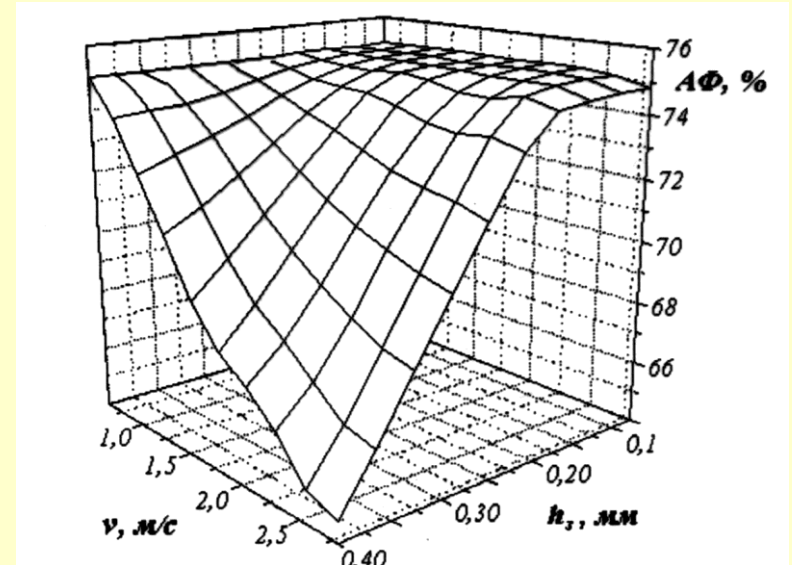


Точение штока подвески самосвала  
Samatzu ND1200 с наплавленным  
покрытием ПП-Нп-18Х1Г1М (42-44 HRC)



Зависимость шероховатости поверхности  
покрытия ПН85Ю15 от времени  
полирования и поперечной подачи круга

# ОБРАБОТКА ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С АМОРФНО- КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ



Зависимость содержания аморфной  
фазы в покрытии, напыленном  
порошком  $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$ , от скорости  
резания и износа инструмента  
( $S = 0,05$  мм/об;  $t = 0,15$  мм)

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

- **совершенствование теории механической обработки** на основе представлений о закономерностях процессов в «цифровом» представлении с использованием возможностей дополненной и виртуальной реальности;
- **создание компьютеризованной системы выбора материала инструмента** для механической обработки с учетом структурного состояния материала изделия;
- **расширение гаммы композитов и покрытий, для оснащения инструментов,** способных адаптироваться к условиям нагружения в зоне обработки и обладающих функционально-ориентированными свойствами, отвечающих различному эксплуатационному нагружению в инструменте;
- **разработка «интеллектуальных» инструментов,** способных к самодиагностике по текущему состоянию (предиктивная аналитика);
- **разширение номенклатуры производства инструментов** из STM, в том числе многолезвийных с рабочими элементами из поликристаллов CBN групп BH, BL, BC, резцов из крупных монокристаллов алмаза, правящих инструментов с CVD-алмазом;
- **разработка 3D-технологий формообразования** сложно-профильного инструмента из STM-содержащего порошкового композиционного материала

**Перспективная цель: соответствие технологий механической обработке концепции «Индустрия-4.0»**