

УДК 621.9

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.99428>

# Механические свойства поверхностного слоя режущих элементов из поликристаллических сверхтвердых композитов на основе кубического нитрида бора

С.А. Клименко<sup>1</sup> • А.С. Манохин<sup>1</sup> • Н.Н. Белоусова<sup>2</sup> • А.Г. Колмаков<sup>3</sup> • Е.О. Насакина<sup>3</sup> • М.Л. Хейфец<sup>4</sup> • И.М. Закрев<sup>5</sup>

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

2 - Житомирский государственный технологический университет, г. Житомир, Украина;

3 - Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва, Россия;

4 - Президиум НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь;

5 - Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

Received: 30 March 2017 / Accepted: 28 April 2017

***Аннотация.** Предложено оценивать параметры механических свойств поверхностного слоя рабочих элементов из поликристаллических сверхтвердых композитов на основе кубического нитрида бора режущих инструментов по результатам анализа сканограмм, полученных методом склерометрирования. Представлено теоретическое обоснование метода и рассмотрены термодинамические показатели механических свойств поверхностного слоя – величину активационного барьера запуска процесса производства энтропии и способность к производству энтропии при приложении дозированного воздействия. Приведены результаты экспериментальных исследований работоспособности режущих инструментов из сверхтвердых композитов, полученные при точении закаленных сталей, подтверждающие теоретические выкладки.*

***Ключевые слова:** поликристаллические сверхтвердые композиты, кубический нитрид бора, механические свойства, поверхностный слой, режущие инструменты.*

## Введение.

Контактное взаимодействие в зоне резания характеризуется как комплекс процессов адгезии, диффузии, микро- и макродеформирования и разрушения, химического взаимодействия, включающего в различных средах окисление, азотирование, наводороживание, контактно-реактивное плавление и др. Эти процессы определяют механизм изнашивания поверхностей режущих инструментов и возможности инструментов по эффективной обработке и формированию заданного состояния поверхностного слоя у обрабатываемых изделий.

Количественное описание текущего физико-химического и механического состояния материала инструмента и обрабатываемого материала в контактной зоне для конкретных условий процесса механической обработки, изучение эволюции и возможности трансформации поверхностей инструмента в контактной зоне под действием термобарических условий процесса резания, составляет научную базу для совершенствования режущих инструментов и процессов механической обработки, используется в мотивации выбора или создания материалов для режущих инструментов. Особенности контактного взаимодействия инструмента со стружкой и изделием в зоне резания обусловлены химическим составом, состоянием материалов рабочей части применяемого инструмента и обрабатываемого изделия, условиями термобарического нагружения в контактной зоне (конструкция инструмента, его геометрические параметры, режимы резания).

Свойства материала, определяющие его эффективность в режущем инструменте, могут быть условно разделены на объемные физико-механические, поверхностные механические и химические [1].

Если для оценки объемных механических свойств материалов разработаны многочисленные, во многих случаях ставшие традиционными, методы и оборудование, то определение численных показателей поверхностных механических свойств материала изделия вызывает известные трудности. В [2] для этого предложено сканировать поверхностный слой исследуемого объекта алмазным индентором в режиме упруго-пластического деформирования и измерять статистические характеристики сопротивления его перемещению.

Представив модель поверхностного слоя как систему случайно распределенных структурно-энергетических барьеров различной мощности, препятствующих распространению упруго-пластических деформаций, можно оценить механические свойства поверхностного слоя изделия комплексом численных характеристик [3].

Целью настоящих исследований была реализация предложенного подхода на примере поликристаллических сверхтвердых композитов (ПСК) на основе кубического нитрида бора инструментального (сBN) назначения [4].

#### Теоретическое обоснование.

В соответствии с современными представлениями, поверхностный слой изделий рассматривается как открытая термодинамическая система, которая обменивается с внешней средой веществом, энергией и энтропией. Возникновение в нем микроповреждений связано с формированием в локальном объеме материала критической плотности внутренней энергии, накопленной при предельной деформации. Указанный критерий эквивалентен условию перехода термодинамической системы через точку бифуркации после преодоления активационного барьера, которым обладает материал поверхностного слоя изделия после накопления в процессе эксплуатации критического значения энтропии [5]. Время достижения критического значения энтропии зависит от состояния материала поверхностного слоя изделия [6]:

$$[H] = H_0 + \int_0^{\tau} H(t) dt,$$

где  $[H]$  – критическое значение энтропии;  $H_0$  – величина энтропии в материале поверхности изделия, обусловленная ее наследственностью;  $H(t)$  – функция, описывающая производство энтропии в процессе функционирования поверхностного слоя изделия;  $\tau$  – время до достижения энтропией критического значения;  $t$  – текущее время.

Таким образом, для оценки состояния рабочей поверхности изделия необходимо располагать значениями трех статистических термодинамических параметров материала ее поверхностного слоя – величиной активационного барьера, при достижении которого запускается процесс производства энтропии, способностью к производству энтропии при приложении дозированного воздействия и величиной исходной энтропии.

Прямое измерение указанных величин позволило бы прогнозировать эксплуатационные свойства обработанных поверхностей. Однако численно могут быть оценены первые два параметра, так как энтропия является функцией состояния системы и оценено может быть только ее изменение. Поэтому может быть выполнено ранжирование материалов только относительно эталона.

Для экспериментальной оценки величины активационного барьера материала поверхностного слоя изделия и способности материала к производству энтропии перспективным является применение метода склерометрирования, при котором исследуемая поверхность сканируется нагруженным сферическим индентором радиусом  $r$ . Выбором нормальной нагрузки  $P$  на индентор размер деформируемой области исследуемого образца может быть приближен к подвергаемому деформации в процессе эксплуатации.

Фиксируемая сканограмма может представлять собой изменение тангенциальной силы сопротивления контактному взаимодействию с индентором либо изменение глубины внедрения индентора в исследуемый поверхностный слой вдоль трассы сканирования (рис. 1, а).

Сканограмма тангенциального усилия  $F$  на инденторе состоит из участков, знак производной на которых характеризует две стадии деформирования материала образца: на участках с положительной производной ( $0a$ ,  $bc$ , ...) имеет место стадия упругого деформирования материала и системы крепления индентора, на которой она запасает упругую энергию, а на участках с отрицательной производной ( $ab$ ,  $cd$ , ...) протекает стадия разгрузки индентора и преимущественного пластического деформирования материала (рис. 1, б).

Точки пиковых нагрузок на индентор ( $a$ ,  $c$ ,  $e$ , ...) характеризуют уровень активационного барьера материала образца, т. к. именно при этих значениях усилия начинается его пластическое деформирование и накопление энтропии. Функция диссипации, описывающая производство энтропии при пластическом деформировании материала, имеет вид [7]:

$$dH / dt = F(t)v(t)/T(t)$$

где  $F$  – тангенциальное усилие на инденторе;  $v(t)$  – скорость перемещения индентора относительно поверхности образца;  $T$  – температура.

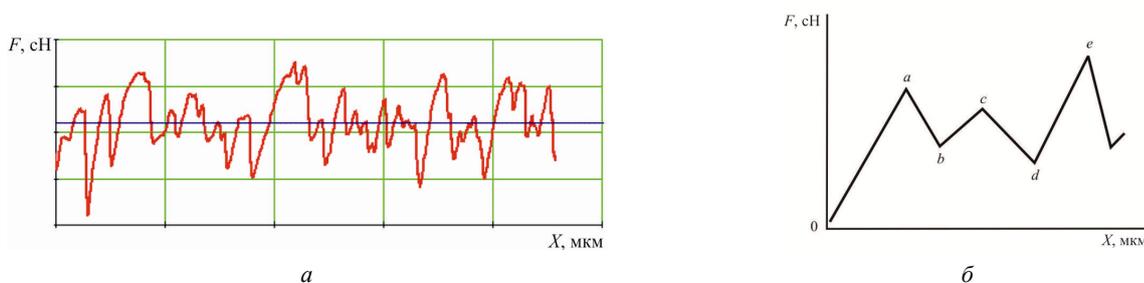


Рис. 1. Типичная сканограмма поверхностного слоя образца (зависимость тангенциальной силы на инденторе от координаты  $X$ ) (а) и ее схема (б)

Процесс сканирования проводится с малой скоростью, поэтому  $T(t) = \text{const}$ , так как размеры поверхности образца велики по сравнению с деформируемым объемом, обеспечивая термостабилизацию трассы сканирования.

При регистрации усилия на инденторе датчиками с линейной зависимостью между усилием и перемещением

$$F(t) = kl(t),$$

$$v(t) = dl(t)/dt + v_0,$$

где  $l(t)$  – отклонение индентора в процессе сканирования от его среднего положения;  $v_0$  – линейная скорость перемещения образца, задаваемая системой привода;  $k$  – постоянная. Так как скорость колебаний индентора существенно выше скорости перемещения образца вдоль трассы сканирования, то значением  $v_0$  можно пренебречь.

Подставив (3) и (4) в (1), с учетом (2), получим:

$$dH = \frac{k}{T} l(t) dl(t),$$

откуда

$$\Delta H = \frac{k}{T} \sum_{i=0}^{N-1} l_i \Delta l_i,$$

где  $N$  – количество вершин сканограммы на длине трассы сканирования;  $l_i$ ,  $\Delta l_i$  – смещение и изменение смещения индентора в  $i$ -той точке сканограммы.

Так как  $\Delta l_i = l_i - l_{i-1}$ ,  $l_i = \mu + x_i$ , где  $\mu$  – математическое ожидание отклонения индентора от положения, заданного конструкцией склерометра, то с учетом

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{N-1} \mu x_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{N-1} \mu x_{i-1}$$

при достижении больших  $N$  и выборе расстояния между отсчетами равным периоду корреляции поверхности, получим

$$\Delta H = \frac{k}{T} \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2,$$

так как  $x_i$  – центрированная случайная величина, то

$$\frac{k}{T} \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2 = ND,$$

где  $D$  – дисперсия случайной величины  $x$ .

Таким образом, величина энтропии  $\Delta H$ , производимой в материале образца при его сканировании, пропорциональна дисперсии  $D$  отклонения индентора:

$$\Delta H = \frac{k}{T} ND.$$

Активационный барьер определяется как точка, являющаяся вершиной сканограммы (рис. 1), абсолютная величина барьера  $A_i$  рассчитывается как

$$A_i = A_j K_j,$$

где  $A_j$  – координата сканограммы, мм;  $K_j$  – чувствительность прибора, Н/мм.

Средние величины  $A_{\text{ср}}$  и  $D$  на длине трассы сканирования определяются выражениями:

$$A_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N A_i}{N},$$

$$D = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [F(t)_i - M[F]]^2,$$

где  $F(t)_i$  и  $M[F]$  – тангенциальная сила на инденторе текущая и математическое ожидание соответственно;  $n$  – количество ординат сканограммы на длине трассы сканирования.

#### Методика экспериментальных исследований.

Исследования производились с использованием прибора «Микрон-Гамма» (Национальный авиационный университет) с индентором Виккерса с радиусом округления вершины  $r = 0,5$  мкм. Сканирование поверхностного слоя образцов производилось при нагружении силой  $P = 100$  сН. Определялись следующие параметры: математическое ожидание тангенциальной силы контактного взаимодействия индентора с поверхностным слоем исследованных образцов материалов  $M[F]$ , математическое ожидание глубины внедрения индентора в поверхностный слой исследованных образцов материалов  $M[h]$ , величины дисперсии

этих параметров  $\sigma[F]$ ,  $\sigma[h]$ , средняя величина активационного барьера для исследуемого поверхностного слоя, при достижении которого запускается процесс производства энтропии,  $A_{cp}$ .

При сравнении нескольких материалов, нужно учитывать их различные свойства, обуславливающие различную глубину внедрения индентора при одинаковой нагрузке, что дополнительно влияет на величину  $F(t)$ . Сравнивать свойства поверхностного слоя образцов таких материалов можно по удельным (отнесенным к площади контакта индентора и исследуемого образца) или по относительным (по отношению к принятому эталонному образцу) показателям.

Исследования поверхностей инструментов выполнялись на оптическом микроскопе Neophot 21 и электронном микроскопе AG-EVO (Zeiss).

Выполнялись две серии экспериментов. В первой использовались композиты различного химического состава и механических свойств, во второй – композиты в состояниях, отвечающих различным величинам износа, оснащенных ими режущих инструментов (табл. 1).

Обработка образцов производилась по одной технологии с обеспечением шероховатости поверхности  $Ra$  0,08 мкм.

Инструментами, оснащенными круглыми режущими пластинами RNMN 070300 из приведенных в табл. 1 композитов, выполнялась токарная обработка закаленных сталей ШХ15 и ХВГ (62–64 HRC). Обработка производилась как без ударной нагрузки, так и в условиях резания с ударом, обусловленным наличием на обрабатываемом образце продольного паза шириной 3 мм.

Все режущие пластины обработаны по одинаковой технологии с использованием суспензии на основе алмазного порошка АСМ 28/20 и шлифовальных кругов 1А1 200-10-5 АСМ 28/20 В2-01-4. Шероховатость рабочих поверхностей режущих пластин  $Ra$  0,08.

Во второй серии экспериментов определялись показатели механических свойств поверхностного слоя образцов композитов после их термобарического нагружения в режущем инструменте в условиях, отвечающих различной степени его износа по задней и передней поверхностям. За критерий износа принималась ширина фаски на задней поверхности инструмента  $h_3$ . Склерометрирование проводилось в непосредственной близости от участка износа на передней поверхности.

Табл. 1.

## Материалы исследованных образцов

Серия	Состав смеси, размер зерна, твердость по Кнупу, модуль Юнга
1	cBN 55% (КМ 3/2); TaN 45% (1-30 мкм); 31,9 ГПа; 515 ГПа
	cBN 55% (КМ 3/2); TiC 45% (4,5-7 мкм); 37,1 ГПа; 530 ГПа
	cBN 75% (КМ 3/2); TiC 25% (4,5-7 мкм); 40,2 ГПа; 620 ГПа
2	cBN 60% (КМ 3/2); TiN 10%; Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 30%
	cBN 60% (КМ 3/2); TaN 15%; Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 15%; SiC 10%

## Экспериментальные результаты.

В табл. 2 приведены результаты склерометрирования поверхностного слоя поликристаллических сверхтвердых композитов серии 1.

Табл. 2.

## Результаты склерометрирования образцов серии 1

Композит	Показатели				
	$M[h]$ , мкм	$\sigma[h]$ , мкм <sup>2</sup>	$M[F]$ , сН	$\sigma[F]$ , сН <sup>2</sup>	$A_{cp}$ , сН
cBN-TaN 45%	4,07	0,22	4,79	0,45	5,06
cBN-TiC 45%	4,19	0,13	5,64	0,44	5,94
cBN-TiC 25%	3,85	0,16	5,51	0,48	5,73

Сравнение полученных результатов показывает, что наибольшим значением активационного барьера при меньшей способности к производству энтропии характеризуется поверхностный слой образца композита cBN-TiC 45%. Инструмент, оснащенный таким материалом обладает высокой работоспособностью при чистовой обработке изделий из закаленной стали ШХ15 (рис. 2).

Для композита cBN-TaN 45%, так же содержащего 55% cBN, показатели свойств поверхностного слоя отличаются в меньшую сторону, что связано с большей зернистостью исходного порошка составляющей TaN. Инструмент, оснащенный этим композитом, имеет существенно меньшую работоспособность при точении закаленной стали.

В случае обработки с динамическими нагрузками, в анализ следует принимать также показатели объемных механических свойств материалов режущих инструментов. При точении с «ударом» закаленной стали ХВГ наибольшей работоспособностью обладает инструмент, оснащенный композитом cBN-TiC 25%, характеризующийся большими величинами твердости и модуля упругости.

В табл. 3 приведены результаты склерометрирования поверхностного слоя поликристаллических сверхтвердых композитов серии 2.

На рис. 4. показаны изношенные участки инструментов (см. табл. 3), оснащенных рассматриваемыми композитами (см. табл. 1).

Как видно из приведенных данных, у всех образцов рассмотренных композитов на основе  $cBN$  поверхностный слой вблизи участка износа характеризуется пониженной величиной активационного барьера, что связано с эволюцией структуры материалов под действием термобарического нагружения в процессе эксплуатации инструментов. Исключение составляет образец композита  $cBN-TaN-Si_3N_4-SiC$ , работавший в инструменте на этапе, близком к этапу приработки ( $h_3 = 0,15$  мм), которому отвечает повышение механических свойств материала [8, 9].

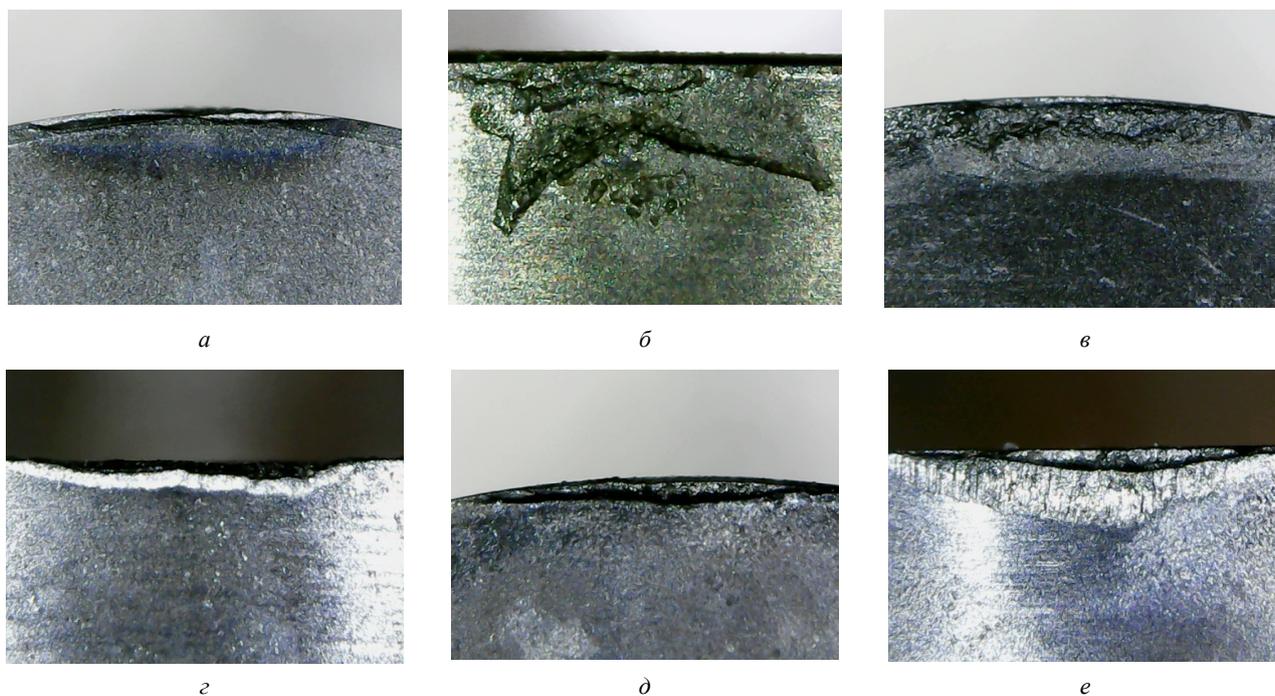


Рис. 2. Контактные участки передней (*a, в, д*) и задней (*б, з, е*) поверхностей инструментов, оснащенных композитами  $cBN-TaN$  45% (*a, б*),  $cBN-TiC$  45% (*в, з*),  $cBN-TiC$  25% (*д, е*), после точения стали ШХ15 (62–64 HRC) ( $v = 215$  м/мин,  $S = 0,19$  мм/об,  $t = 0,2$  мм,  $T = 6,2$  мин). □ 125

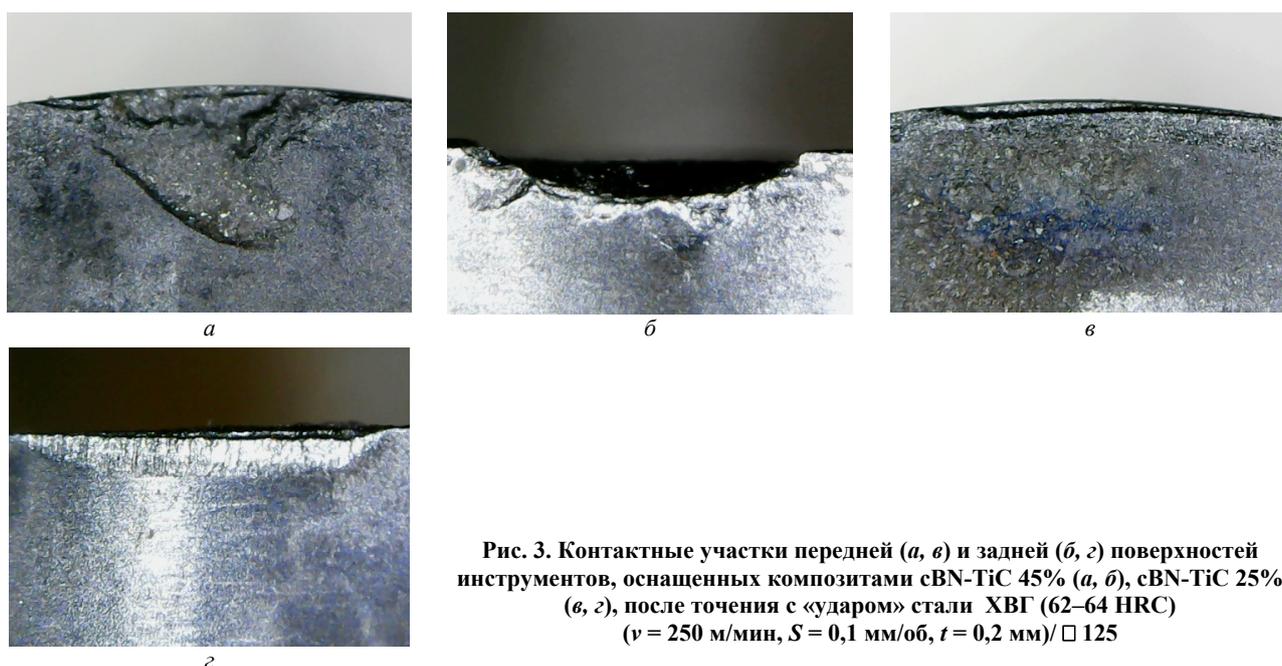


Рис. 3. Контактные участки передней (*a, в*) и задней (*б, з*) поверхностей инструментов, оснащенных композитами  $cBN-TiC$  45% (*a, б*),  $cBN-TiC$  25% (*в, з*), после точения с «ударом» стали ХВГ (62–64 HRC) ( $v = 250$  м/мин,  $S = 0,1$  мм/об,  $t = 0,2$  мм) □ 125

Табл. 3.

Результаты склерометрирования образцов серии 2

Композит	Исследуемый участок	$M[F_T], \text{сН}$	$\square[F_T], \text{сН}^2$	$A_{\text{ср}}, \text{сН}$
cBN-TiN-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	исходный	7,79	0,83	8,65
	вблизи участка износа ( $h_3 = 0,35 \text{ мм}$ )	5,71	0,89	6,26
cBN-TaN-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -SiC	исходный	6,87	0,69	7,28
	вблизи участка износа ( $h_3 = 0,15 \text{ мм}$ )	7,29	0,66	7,64
	вблизи участка износа ( $h_3 = 0,35 \text{ мм}$ )	7,3	1,4	5,95

Величина износа по задней поверхности инструмента, оснащенного ПСК на основе cBN,  $h_3 = 0,35 \text{ мм}$  близка к критической стадии [8], для которой характерна интенсификация изнашивания, что отвечает понижению величины активационного барьера и увеличению скорости производства энтропии в поверхностном слое композита на контактом участке.

#### Выводы.

Как показывают результаты исследований, для оценки механических свойств поверхностного слоя образцов поликристаллических сверхтвердых композитов на основе кубического нитрида бора перспективно использование результатов сканирования поверхностного слоя алмазным индентором. Предложено характеризовать механические свойства поверхностного слоя образцов величиной активационного барьера, при достижении которого запускается процесс производства энтропии, и способностью к производству энтропии при приложении дозированного воздействия, которые определяются по результатам склерометрирования.

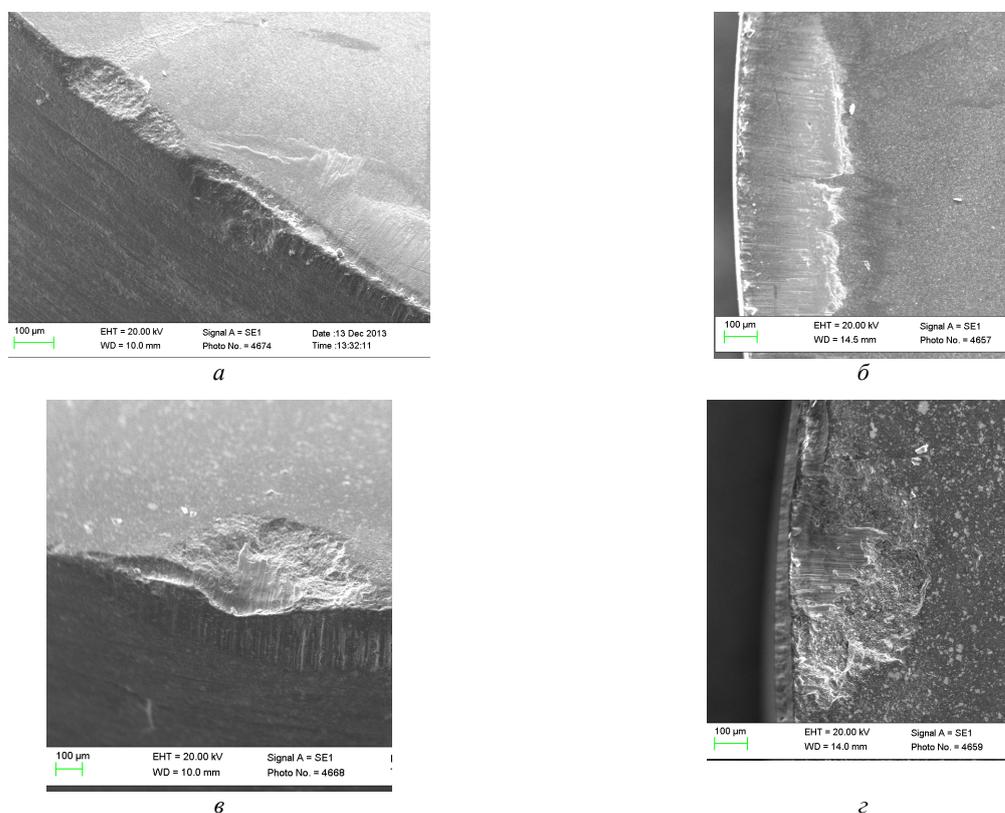


Рис. 4. Вид контактных поверхностей режущих инструментов после обработки стали ШХ15 ( $v = 140 \text{ м/мин}$ ): а, б – cBN-TiN-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>;  $h_3 = 0,30 \text{ мм}$ ; в, г – cBN-TaN-SiC;  $h_3 = 0,35 \text{ мм}$

Большой износостойкостью обладают режущие инструменты, оснащенные поликристаллическими сверхтвердыми композитами, поверхностный слой которых характеризуется большими значениями активационного барьера, при достижении которого запускается процесс производства энтропии, и меньшей способностью к производству энтропии при приложении дозированного воздействия.

## Механічні властивості поверхневого шару різальних елементів з полікристалічних надтвердих композитів на основі кубічного нітриду бору

С.А. Клименко, А.С. Манохін, Н.М. Білоусова, О.Г. Колмаков, О.О. Насакіна, М.Л. Хейфець, І.М. Закієв

**Анотація.** Запропоновано оцінювати параметри механічних властивостей поверхневого шару робочих елементів з полікристалічних надтвердих композитів на основі кубічного нітриду бору різальних інструментів за результатами аналізу сканогам, отриманих методом склерометрування. Представлено теоретичне обґрунтування методу і розглянуті термодинамічні показники механічних властивостей поверхневого шару – величина активаційного бар'єру запуску процесу виробництва ентропії, здатність до виробництва ентропії при додатку дозованого впливу. Наведено результати експериментальних досліджень працездатності різальних інструментів з надтвердих композитів, отримані при точінні загартованих сталей, що підтверджують теоретичні викладки.

**Ключові слова:** полікристалічні надтверді композити, кубічний нітрид бору, механічні властивості, поверхневий шар, різальні інструменти.

## Mechanical properties of surface layer of cutting elements from polycrystalline superhard composites based on cubic boron nitride

S. Klimenko, A. Manokhin, N. Belousova, A. Kolmakov, E. Nasakina, M. Kheifets, I. Zakiev

**Abstract.** It was proposed to evaluate the parameters of surface layer's mechanical properties of the working elements of the cutting tools from polycrystalline superhard composites based on cubic boron nitride on the basis of the results of scratch tests. The theoretical rationale of the method was represented and the thermodynamical indicators of mechanical properties of surface layer (the value of the activation barrier of the entropy production start and its production ability when dozed impact was applied) were considered. There were showed the results of the experimental researches of the working capability of the cutting tools from superhard composites, obtained then machining the hardened steels which affirm the theoretical calculation.

**Keywords:** polycrystalline superhard materials, cubic boron nitride, mechanical properties, surface layer, cutting tools.

### References

1. Novikov, N.V. and Klimenko, S.A. (2011), Instrumenty s polikristallicheskimy sverhtverdymi materialami v tehnologijah mehanicheskoy obrabotki, *Protsesy mekhanichnoi obrobky v mashynobuduvanni, zb. nauk. pracz`*, ZhDTU, Zhytomyr, no 10, pp. 3–22.
2. Klimenko, S.A. (2005), Wear resistance ranking of polycrystalline superhard tool materials, *Journal of Superhard Materials*, vol. 27, no 4, pp. 63–69.
3. Zaporozhec, V.V. (1980), Dinamicheskie karakteristiki prochnosti poverhnostnyh sloev i ih ocenka, *Trenie i iznos*, vol. 1, no 4, pp. 602–609.
4. Novikova, N.V. and Klimenko, S.A. (ed.) (2014), *Instrumenty iz sverhtverdyyh materialov*, Mashinostroenie, Moscow, Russia.
5. Lyashko, V.A., Potemkin, M.M. and Klimenko, S.A. (1998), Comparative durability of materials in wear, *Wear*. Vol. 216, pp. 239–243.
6. Pereverzev, E.S. (1979), *O termodinamicheskomo podhode k zadacham dolgovechnosti*, Prochnost' i nadezhnost' slozhnyh sistem, Nauk. dumka, Kyiv, Ukraine.
7. Vol'kenshtejn M.V. (1986), *Jentropija i informacija*, Nauka, Moscow, Russia.
8. Novikova, N.V., (ed.), (2006), *Sverhtverdye materialy. Poluchenie i primenenie*, in 6 vol. Obrabotka materialov lezviynym instrumentom, in Klimenko, S.A. (ed.), ISM im. V.N. Bakulja, IPC «ALKON» NANU, vol. 5, Kyiv, Ukraine.
9. Klymenko S.A., Melniichuk Yu.O. and Vstovskyi H.V. (2009), Fraktalna parametryzatsiia struktury materialiv, yikh obrobliuvanist rizanniam ta znosostiikist rizalnoho instrumentu, INM im. V. M. Bakulia, Kyiv, Ukraine.