

Инструмент, порошки, пасты

УДК 621.941:534.141

В. М. Бушля*, **О. А. Гутниченко****,
Дж. М. Жу, Я.-Е. Штоль (г. Лунд, Швеция)
С. Гуннарссон (г. Хагфорс, Швеция)
*volodymyr.bushlya@iprod.lth.se
**oleksandr.gutnichenko@iprod.lth.se

Износ и стойкость резцов с композитами на основе КНБ при непрерывном чистовом точении закаленной холодноштамповой стали

Представлены результаты сравнения работоспособности инструментов, оснащенных композитами на основе КНБ с керамической связкой и без связки, а также композитом, содержащим вюртцитный нитрид бора. Работоспособность оценивали по показателям износостойкости, величине силы резания, параметрам качества обработанной поверхности и состояния поверхностного слоя обработанных образцов из закаленной холодноштамповой стали при непрерывном точении. Исследования проводили в условиях высокоскоростной ($v_p = 120\text{--}180$ м/мин) обработки как с применением СОТС, так и без нее. Наилучшая работоспособность инструмента по указанным критериям обеспечивается при использовании композита на керамической связке, содержащего малое количество КНБ.

Ключевые слова: КНБ композиты, износ, “белый слой”, штамповые стали, точение закаленных сталей.

ВВЕДЕНИЕ

Инструментальные стали для холодной деформации представляют собой целый класс материалов, используемых для производства оснастки для операций вырубки,ковки и штамповки. Особенности таких материалов – высокие прочность и ударная вязкость, хорошая прокаливаемость и высокая износостойкость, которые обусловлены специальным легированием. Экономичным способом обработки изделий из таких сталей является механическая обработка в закаленном состоянии, хотя высокие прочность и твердость характеризуют эти материалы как труднообрабатываемые.

В [1, 2] показано, что одним из основных направлений применения инструментов, оснащенных композитами на основе КНБ, является обработка ста-

лей высокой твердости, в частности подшипниковых и инструментальных. В [1] показано, что применение в инструментах композитов с малым содержанием КНБ оказывается более эффективным по сравнению с композитами, содержащими большое количество КНБ, даже при прерывистом точении инструментальной стали M50. В [3], напротив, показано, что инструменты с композитом с 50 %-ным содержанием КНБ на керамической связке являются более работоспособными в сравнении с резами, оснащенными композитом с 90 %-ным содержанием КНБ на металлической связке, в условия непрерывного точения закаленной стали AISI 4340 (52 HRC). При этом увеличение прерывистости обрабатываемой поверхности заготовки положительно сказывается на стойкости инструмента с композитом с 90 %-ным содержанием КНБ – при значительной прерывистости обрабатываемой поверхности его износостойкость в несколько раз выше, чем у инструмента, оснащенного композитом с 50 % КНБ. Аналогичные выводы о высокой работоспособности инструмента, оснащенного композитом с высоким содержанием КНБ и связкой на основе кобальта, при прерывистом точении подшипниковой стали AISI 52100 (62 HRC) показаны в [4]. Как видно из приведенных данных, работоспособность инструментов с композитом на металлической связке и содержанием КНБ более 90 % достаточно исследована, тогда как для инструментов с композитами на керамической связке или без связки она изучена слабо. В [5] проведена оценка работоспособности инструментов, оснащенных композитом на основе КНБ без связки и показано, что при непрерывном точении подшипниковой стали с большими подачами его период стойкости $T > 20$ мин при скорости резания $v_p = 120$ м/мин. В то же время в [6] показано, что при непрерывном точении никелевого суперсплава Инконель 718 такой инструмент имеет низкую износостойкость при средних скоростях резания и сравнимую с износостойкостью инструмента с композитом, содержащим 50 % КНБ, при очень высоких ($v_p > 480$ м/мин) скоростях резания. Следует отметить результаты [7], где указано, что присутствие металлической связки в композите приводит к интенсивному износу инструмента в условиях высокоскоростной обработки вследствие высокого химического сродства металлов связки с материалом заготовки.

В данной работе проведено экспериментальное сравнение обрабатываемости закаленной холодноштамповой стали инструментами на основе КНБ в условиях высокоскоростного финишного точения. Подвергали испытаниям инструменты, оснащенные четырьмя разными композитами на основе КНБ. Исследовали вопросы как износостойкости инструментов, так и достигаемого качества обработанной поверхности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальные исследования проводили при продольном точении на станке с ЧПУ SMT 500 мощностью 70 кВт. Обрабатывали образцы ($\varnothing 150 \times 400$ мм) из закаленной штамповой стали для холодного деформирования Caldie, химический состав которой представлен в табл. 1 [8].

Таблица 1. Химический состав обрабатываемого материала

Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Основа	0,7	0,2	0,5	5,0	2,3	0,5

Данная сталь характеризуется особо высокой прокаливаемостью. После закалки и высокотемпературного отпуска ее микроструктура представляет

собой игольчатый мартенсит и M_6C -карбиды (рис. 1), твердость достигает 60,1 HRC. При уменьшении диаметра образца в процессе обработки твердость снизилась до 58,6 HRC.

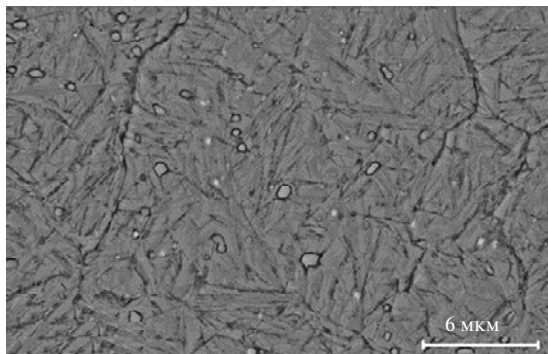


Рис. 1. Микроструктура холодноштамповой стали Caldrie после закалки.

Резцы оснащали сменными круглыми режущими пластинами с фаской RNGN 090300S01020. При установке их в резцедержатель передний продольный и поперечный углы составляли -6° .

Инструменты оснащали четырьмя композитами на основе КНБ:

- с 50 %-ным содержанием КНБ на керамической связке (LcBN);
- с 93 %-ным содержанием КНБ на керамической связке (HcBN);
- без связки, 3 %-ная добавка Si_3N_4 (BcBN);

– с вюртцитной и кубической фазами нитрида бора также без связки (wBN–cBN).

Микроструктура композитов представлена на рис. 2, данные по составу композитов и их свойствам приведены в табл. 2.

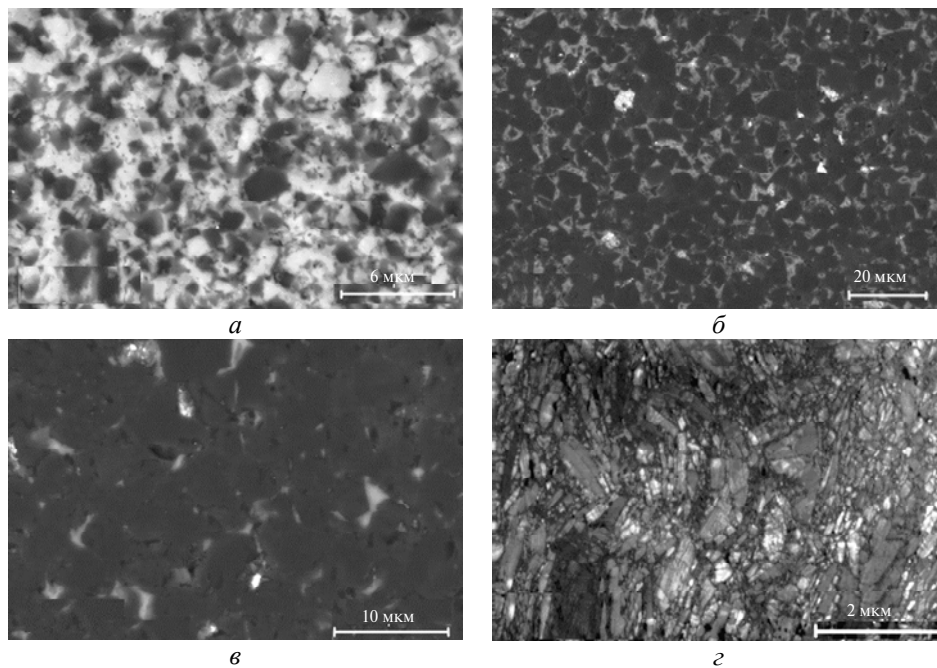


Рис. 2. Микроструктура инструментальных материалов: LcBN (а); HcBN (б); BcBN (в); wBN–cBN (г).

Таблица 2. Состав и свойства использованных инструментальных материалов

Материал	Связка	Содержание cBN	HK, ГПа	K_{IC} , МН/м ^{3/2}	k , Вт/(м·К)
LcBN [9]	TiC, TiB ₂ , Al ₂ O ₃ , AlN	50	27	4,04	44
HcBN [10]	AlN, AlB ₂	93	32–36	10,3	100
VcBN [11]	добавка Si ₃ N ₄	97	40–42	12,6	180
wBN–cBN [10]	wBN	50	38	11,7	56

Суммарно было проведено 48 экспериментов по определению работоспособности инструментов как при обработке “в сухую”, так и с охлаждением. Значения скорости резания (120, 150, 180 м/мин) и подачи (0,05, 0,1 мм/об) выбирали характерными для чистовых операций, исходя из рекомендаций производителей инструмента. Меньшие значения скорости резания типичны для инструментов, оснащенных композитами с высоким содержанием кубического нитрида бора, а большие – для инструмента с композитом LcBN. В качестве смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) применяли 8 %-ную эмульсию Sitala D 201-03 Shell. Глубина резания во всех экспериментах была постоянной: $t_p = 0,3$ мм.

Работоспособность инструмента определяли по величине фаски износа (VB_b) согласно ISO 3685:1993 [12] после завершения обработки. При величине подачи $S = 0,05$ мм/об длина пути резания до окончания теста составляла $L = 2500–3100$ м в зависимости от степени уменьшения диаметра заготовки при точении. Аналогичная величина при подаче $S = 0,1$ мм/об составляла $L = 1200–1600$ м. Наибольший путь резания был у инструмента с композитом VcBN, а наименьший – с LcBN. Измерение фаски износа проводили на оптическом стереомикроскопе Leica MZ16. Сканирующий электронный микроскоп HRSEM LEO/Zeiss 1560б “Carl Zeiss” (Германия) применяли для детального анализа изношенных участков инструментов. 3D-геометрический анализ изношенного инструмента проводили на микроскопе InfiniteFocus Real3D, “Alicona” (Австрия). Энергодисперсионную рентгеновскую спектроскопию (ISIS 300 Microanalysis System, “Oxford Instruments Microanalysis Group”, Великобритания) применяли для анализа продуктов износа материалов инструментов. Состояние поверхностного слоя оценивалось по шероховатости обработанной поверхности, по величине поверхностного деформационного упрочнения, а также по изменению фазового состава поверхностного слоя. Оценку степени деформационного упрочнения проводили с помощью системы наноиндентирования NanoTest Vantage. Оценку фазового состава материалов инструментов и фазового состава поверхностного слоя обработанного образца проводили на дифрактометре STOE Darmstadt с источником CuK α .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 приведены результаты экспериментов по износостойкости инструментов из рассмотренных выше композитов. Как видно, инструменты, оснащенные композитами с высоким содержанием КНБ, показали низкую износостойкость – в большинстве случаев величина износа линейно растет с увеличением скорости резания. Увеличение скорости от 120 до 180 м/мин приводит к 80–90 %-ному увеличению износа инструментов с композитами HcBN и VcBN. Для инструмента с композитом LcBN наблюдали увеличение

износа на 30–35 %, в то время как для инструмента с композитом, содержащим вюртцитный нитрид бора, имела место наивысшая чувствительность к скорости резания – износ увеличивался на 120–160 % соответственно.

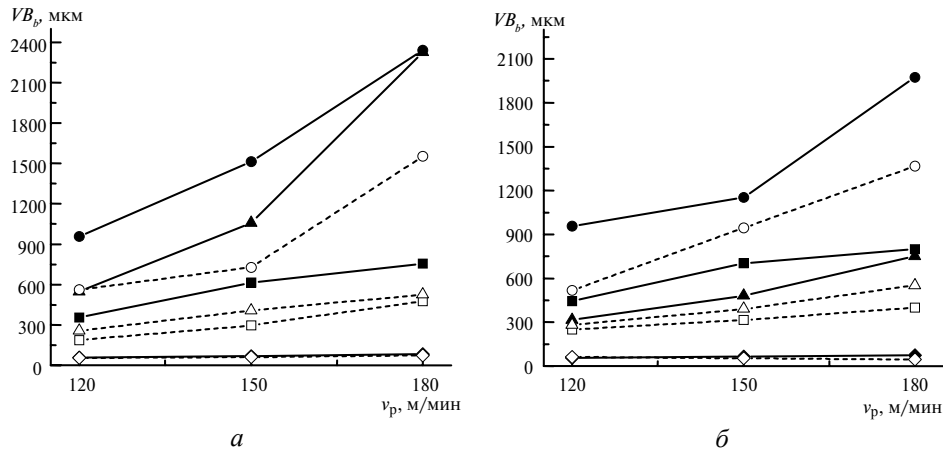


Рис. 3. Влияние скорости резания на величину фаски износа по задней поверхности инструмента: без СОТС – VcBN (■), HcBN (▲), wBN–cBN (●), LcBN (◆); с СОТС – VcBN (□), HcBN (△), wBN–cBN (○), LcBN (◇); $S = 0,05$ (а) и $0,1$ (б) мм/об.

Износостойкость инструментов существенно зависит так же и от величины подачи. Увеличение подачи до $S = 0,1$ мм/об, что по условиям теста сопровождалось двукратным сокращением пути резания, приводит практически к такому же увеличению износа инструмента (см. рис. 3, б). Инструмент, оснащенный композитом LcBN, и в данном случае имел лучшие показатели – его износ с увеличением подачи возрос только на 70–80 %. При подаче $S = 0,05$ мм/об и обработке без СОТС для инструментов с композитами HcBN и wBN–cBN наблюдали аномально высокие значения износа при повышенных скоростях резания (см. рис. 3, а). Это связано с интенсивным образованием лунки износа в непосредственной близости от режущей кромки – в указанных случаях наблюдали слияние лунки с фаской износа по задней поверхности инструмента.

Очевидным является и влияние охлаждения на стойкость инструмента (см. рис. 3). Во всех случаях использование СОТС приводит к снижению износа инструмента. Для инструментов из всех композитов, кроме LcBN, наблюдали снижение износа на 50–80 %. Для инструмента с композитом LcBN величина износа уменьшилась на 10–17 %.

Приведенные выше экспериментальные результаты свидетельствуют о значительном росте износа инструмента вследствие увеличения скорости, подачи и при обработке без СОТС. Можно предположить, что это связано с ростом температуры в зоне резания. Отмеченное в большей степени характерно для инструментов, оснащенных композитами с высоким содержанием кубической и вюртцитной фаз BN, в то время как для инструмента с композитом LcBN, имеющим связку на основе TiC, износ в меньшей степени зависит от указанных параметров в исследованном диапазоне условий резания.

Данная тенденция хорошо подтверждается результатами наблюдения за изменением сил резания в процессе обработки. Из трех составляющих силы резания радиальная является наиболее чувствительной к степени износа инструмента, что является типичным при применении инструментов с круглы-

ми режущими пластинами. Как показали исследования при точении в течение 400 с, для инструментов, оснащенных композитами с высоким содержанием BN, наблюдается линейный рост радиальной силы (рис. 4), в то время как для резцов с композитом LcBN сила несколько снижается. Нужно отметить, что некоторое уменьшение радиальной силы в первые 20–80 с процесса резания (см. рис. 4) имеет место и для инструментов с другими композитами.

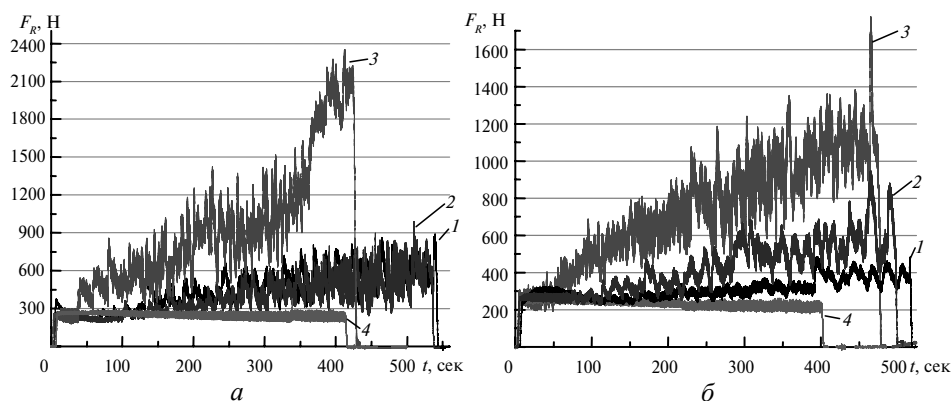


Рис. 4. Изменение радиальной составляющей силы резания в процессе резания без охлаждения (а) и с СОТС (б): VcBN (1), HcBN (2), wBN-cBN (3), LcBN (4); $v_p = 180$ м/мин, $S = 0,1$ мм/об.

Отмеченное снижение радиальной силы связано с изменением геометрических параметров инструмента в процессе изнашивания – формирование лунки износа на участке защитной фаски приводит к увеличению до определенной величины переднего угла инструмента и, соответственно, снижению силы. Одновременно с износом инструмента по передней поверхности происходит его износ по задней поверхности, обуславливающий увеличение радиальной силы. Как следует из рис. 5, износ инструмента, оснащенного композитом LcBN, характеризуется выраженной лункой на передней поверхности при малом значении фаски на задней поверхности VB_b , в то время как у резцов с остальными композитами интенсивно проявляются оба вида износа.

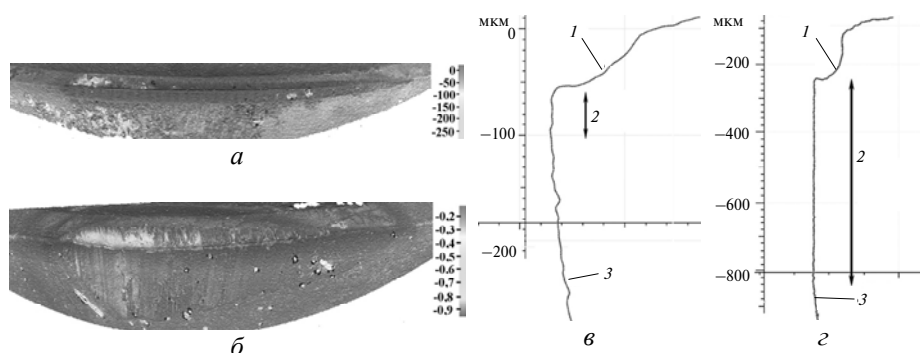


Рис. 5. 3D-вид изношенной поверхности инструмента с композитами LcBN (а) и HcBN (б); поперечное сечение изношенного участка инструмента с композитами: LcBN (в) и HcBN (г): 1 – лунка; 2 – фаска износа; 3 – задняя поверхность.

На рис. 4 видно, что сила резания дестабилизируется после определенного пути резания и характеризуется значительными флуктуациями в ходе обра-

ботки для инструментов из всех рассматриваемых композитов, кроме LcBN. Традиционно такие изменения силы ассоциируются с выкрашиванием или поломкой инструмента.

Для подтверждения данного положения проведены специальные исследования. Выполняли точение с СОТС инструментом, оснащенным композитом wBN–cBN, для которого такие изменения силы наиболее выражены. Процесс резания прерывали сразу после визуального проявления дестабилизации радиальной силы. На режущем инструменте наблюдали лунку на передней поверхности и равномерную фаску износа на задней поверхности ($VB_b \approx 0,21$ мм) (рис. 6). Других видов износа или каких-либо дефектов не наблюдали.



Рис. 6. Вид изношенного участка инструмента с композитом wBN–cBN после 40 с точения с охлаждением; $v_p = 180$ м/мин, $S = 0,05$ мм/об.

В отсутствие дефектов на контактных участках инструмента изменение сил можно объяснить нестабильностью состояния поверхностей инструмента, в частности за счет появления и удаления продуктов изнашивания, связанных с химическим взаимодействием контактирующих материалов. В [13] для инструментов, оснащенных wBN–cBN, и в [14] для инструментов с HcBN показано наличие трибохимического слоя разной природы на изношенных поверхностях. Показано [13], что при достижении критической толщины продуктов взаимодействия происходит их локальное отслоение, после этого непосредственно следует интенсивное схватывание между ювенильными поверхностями инструмента и обрабатываемого образца. С учетом данных [14], такое явление может быть также связано с удалением с контактных поверхностей инструмента продуктов взаимодействия в виде жидкой фазы. При таких условиях имеет место существенное изменение условий трения, что отражается на силах резания. Кроме флуктуации сил при значительном износе инструмента наблюдаются и отдельные всплески их значений, которые, скорее всего, обусловлены выкрашиванием или сколами. Исследования авторов показали, что сколы по передней поверхности наиболее часто наблюдали при резании инструментом, оснащенным композитами HcBN и wBN–cBN при интенсивных режимах обработки (рис. 7, а). Вероятно, сколы возникают вследствие одновременного развития лунки на передней и фаски износа на задней поверхностях инструмента. Так, увеличение фаски износа VB_b связано с ростом радиального износа, что приводит к смещению зоны контакта стружка–инструмент по передней поверхности от исходной режущей кромки. Однако сформировавшаяся лунка значительной глубины (см. рис. 5, з) препятствует такому перемещению зоны контакта, что обуславливает уменьшение величины контактного участка и радиуса завивания стружки, способствует увеличению растягивающих напряжений на передней поверхности инструмента и приводит к сколам.

Кроме сколов на участке лунки в непосредственной близости от режущей кромки наблюдали формирование параллельных ей трещин (см. рис. 7, б).

Такие трещины наиболее характерны для работы инструментами с композитами HcBN и WcBN без охлаждения. Для инструментов, оснащенных композитом HcBN, в области трещин наблюдали незначительные сколы. Для инструментов с композитом WcBN поломок не зафиксировано.

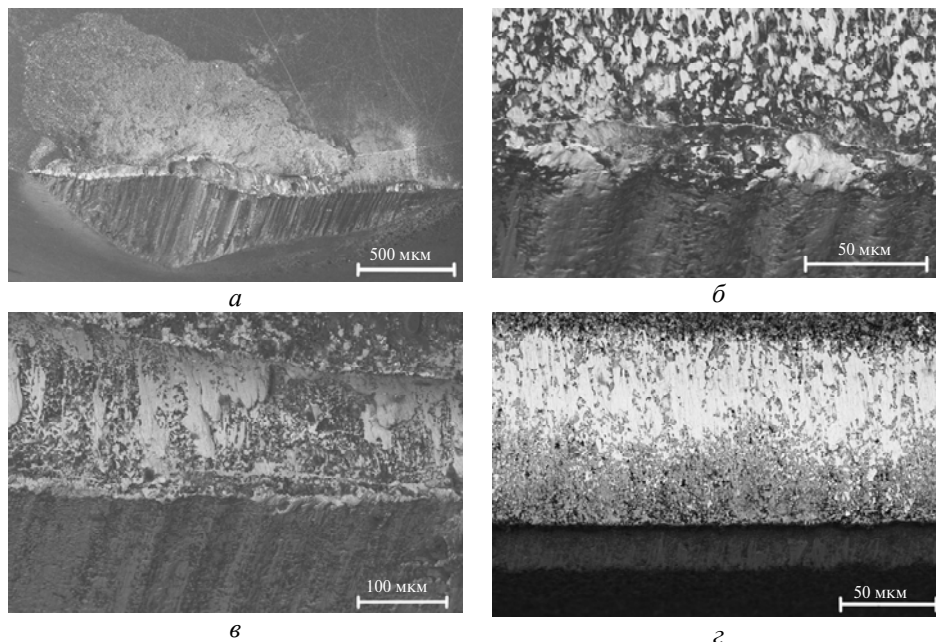


Рис. 7. Скол по передней поверхности инструмента с композитом wBN–cBN (а); трещина на передней поверхности инструмента с композитом HcBN (б); слой налипшего обрабатываемого материала на контактных поверхностях инструментов с композитами HcBN (в) и LcBN (г); условия резания с СОТС (а) и без СОТС (б–г): $v_p = 180$ м/мин, $S = 0,05$ мм/об.

Вид слоя материала, перенесенного на контактные поверхности инструмента, является дополнительной отличительной особенностью инструментов, оснащенных композитами с различным содержанием КНБ. На рис. 7, в видно, что материал заготовки создает равномерное покрытие как на передней, так и на задней поверхностях инструментов с HcBN. У резцов с LcBN наибольшее количество металла заготовки сконцентрировано на окраинах контактных зон (см. рис. 7, г). Видно, что на контактных участках такого инструмента в окрестности режущей кромки находится слой продуктов трибозаимодействия контактирующих материалов. Как показано в [15, 16], подобный слой для инструмента, оснащенного композитом LcBN со связкой Ti(C,N), состоит из частично окислившегося железа со значительно повышенным содержанием углерода и вкраплениями Mn и S. При этом указано, что данный слой активно и выборочно реагирует с компонентами инструментального композита – фаза Ti(C,N) слабо подвержена такому химическому взаимодействию. Авторы отмечают, что упомянутый трибохимический слой, при условии его стабильности, выступает диффузионным барьером для фаз материала инструмента, а также барьером для окислительной среды.

Для инструмента с композитом wBN–cBN слой материала заготовки, перенесенного на контактные поверхности, имеет меньшую толщину и представляет собой равномерный налет. Его толщина весьма мала при обработке с охлаждением и несколько усиливается при точении без СОТС.

В условиях настоящего эксперимента, вне контактных участков на передней поверхности инструмента, наблюдали формирование покрытия из материалов продуктов износа. При точении с охлаждением указанный эффект имел значимый характер (рис. 8, *a*). Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭРС) материала покрытия (см. рис. 8, *б*) показала наличие в нем Fe, O, C, а также элементов, входящих в состав материала инструмента и СОТС. Наличие углерода в покрытии связывать исключительно со взаимодействием на поверхностях трения некорректно, так как СОТС представляет собой эмульсию на основе масла.

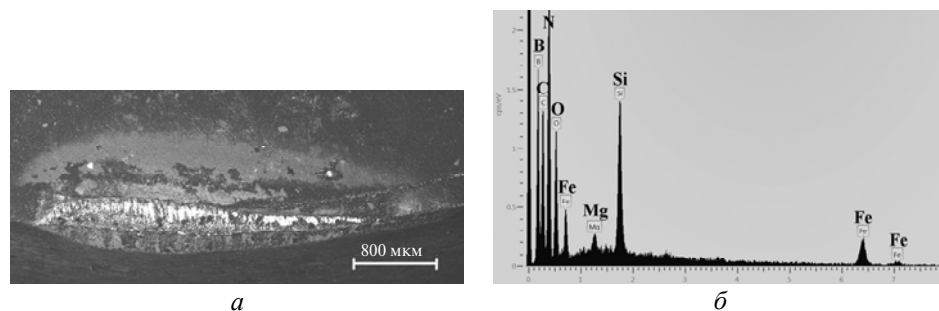


Рис. 8. Вид передней поверхности инструмента с композитом ВcBN при обработке с СОТС ($v_p = 150$ м/мин, $S = 0,1$ мм/об) (*a*) и ЭРС-анализ материала покрытия на неконтактных участках инструмента (*б*).

При обработке без СОТС интенсивность формирования слоя покрытия на передней поверхности инструмента значительно снижалась. Однако в случае катастрофического износа, который наблюдали у инструментов с композитами НсBN и wBN–сBN при скорости резания $v_p = 180$ м/мин и подаче $S = 0,05$ мм/об, интенсивность образования покрытия резко возрастала (рис. 9, *a*). Отдельные частицы покрытия принимают сферическую форму (см. рис. 9, *б*), состав покрытия согласно проведенному ЭРС-анализу аналогичен отмеченному выше. В [14] показано, что данное явление связано с эффектом контактно-реактивного плавления в зонах взаимодействия материала инструмента, обрабатываемого материала и окружающей среды и выносом продуктов взаимодействия контактных участков.

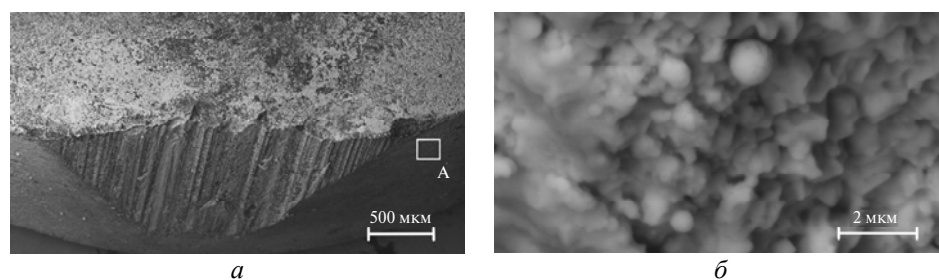


Рис. 9. Вид изношенного участка инструмента с композитом НсBN при точении без СОЖ ($v_p = 180$ м/мин, $S = 0,05$ мм/об) (*a*); фрагмент покрытия на неконтактном участке инструмента (зона А) (*б*).

Мониторинг сил резания показал, что наступлению катастрофического износа инструмента предшествовали сколы на его поверхностях. Значительная глубина лунки, и вследствие этого невозможность ее продвижения по

передней поверхности инструмента при износе, приводит к уменьшению площади контакта со стружкой и увеличению контактных напряжений. При таких условиях наличие трещин в материале инструмента и положительного переднего угла инструмента повышает вероятность его скалывания. Можно предположить, что глубина лунки является более чувствительным критерием износа инструмента, чем ширина фаски износа по задней поверхности VB_b .

На рис. 10 представлена зависимость шероховатости поверхности R_a от пути резания (и соответственно износа инструмента) при точении со скоростью резания $v_p = 150$ м/мин как с СОТС, так и без охлаждения. Видно, что обработка инструментом, оснащенным композитом LcBN, обеспечивает шероховатость обработанной поверхности $R_a \approx 0,1$ мкм, в то время как при использовании резцов, даже неизношенных, с остальными рассматриваемыми композитами, была достигнута шероховатость $R_a \approx 0,15-0,3$ мкм. Увеличение износа инструмента в ряде случаев приводит к некоторому снижению шероховатости обработанной поверхности, что связано с увеличением фактического радиуса при вершине инструмента, однако в большинстве случаев наблюдается возрастание шероховатости по мере износа инструмента. Следует отметить, что работа с СОТС приводит к улучшению качества обработанной поверхности, а при обработке инструментом с композитом BcBN обеспечивается формирование шероховатости поверхности на уровне, получаемом при использовании инструмента с композитом LcBN (см. рис. 10).

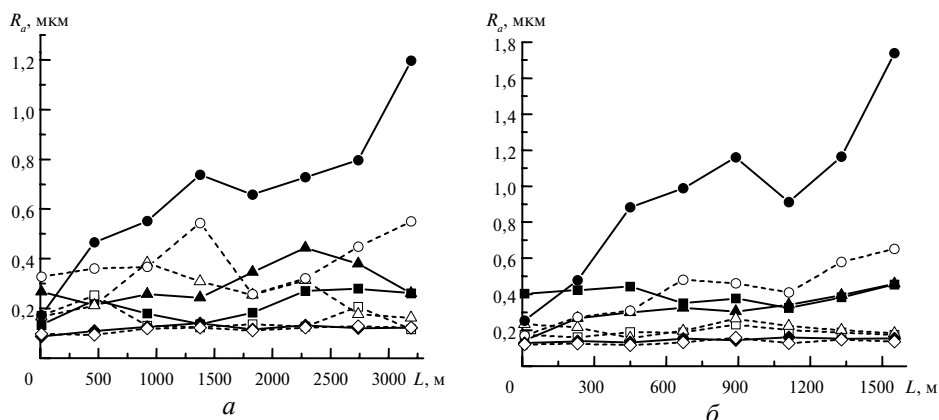


Рис. 10. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от пути резания при скорости $v_c = 150$ м/мин, $S = 0,05$ (а), $0,1$ (б) мм/об: без СОТС – BcBN (■), HcBN (▲), wBN-cBN (●), LcBN (◆); с СОТС – BcBN (□), HcBN (△), wBN-cBN (○), LcBN (◇).

Для анализа причин такого влияния материала инструмента и износа инструмента на шероховатость обработанной поверхности выполнена 3D-микроскопия изношенных инструментов, а также измерены радиусы округления режущих кромок r и оценено их изменение вдоль режущих кромок. Из рис. 11, а видно, что в процессе износа инструмента с композитом LcBN радиус округления режущей кромки на рабочем участке снижается на треть (от номинального $r \approx 15$ мкм до величины $r \approx 10$ мкм). Однако в области участка инструмента, ответственного за формирование обработанной поверхности, радиус округления режущей кромки снижается до $r \approx 5$ мкм (см. рис. 11, а, в), т. е. имеет место самозатачивание инструмента в процессе его изнашивания. Как отмечено в [17], явление самозатачивания композитов LcBN характерно также в условиях высокоскоростного точения никелевого суперсплава

Инконель 718. Для резцов с композитом wBN данное явление проявляется в наибольшей мере: радиус округления режущей кромки в среднем снижается до $\rho \approx 5$ мкм, а в зоне формирования неровностей на обработанной поверхности – до $\rho \approx 2$ мкм (см. рис. 11, *а*). Снижение радиуса округления режущей кромки, по данным [18], приводит к уменьшению шероховатости обработанной поверхности вследствие снижения минимальной толщины срезаемого слоя и возможности снятия малых стружек. Из рис. 11, *б* видно, что, хотя самозатачивание наблюдается и для инструментов с композитами HcBN и wBN-cBN , изменение радиуса округления режущей кромки в этом случае носит равномерный характер, а его значение составляет $\rho = 10\text{--}12$ мкм.

Следует отметить, что для обработки инструментом с композитом wBN-cBN при относительно небольшом радиусе округления изношенной режущей кромки наблюдали высокие параметры шероховатости обработанной поверхности (см. рис. 10). При износе такого инструмента имело место формирование проточин вдоль фаски износа по задней поверхности (см. рис. 11, *з*). По данным Ваггу и Вугне [19], образование проточин связано с течением пластифицированного слоя трибохимического взаимодействия на контактных участках инструментов с композитами на основе КНБ. Как следствие, формирование такого слоя нестабильно, наблюдается более интенсивная диффузия элементов материала инструмента в обрабатываемый материал, что ведет к повышенному износу инструмента в областях такого течения.

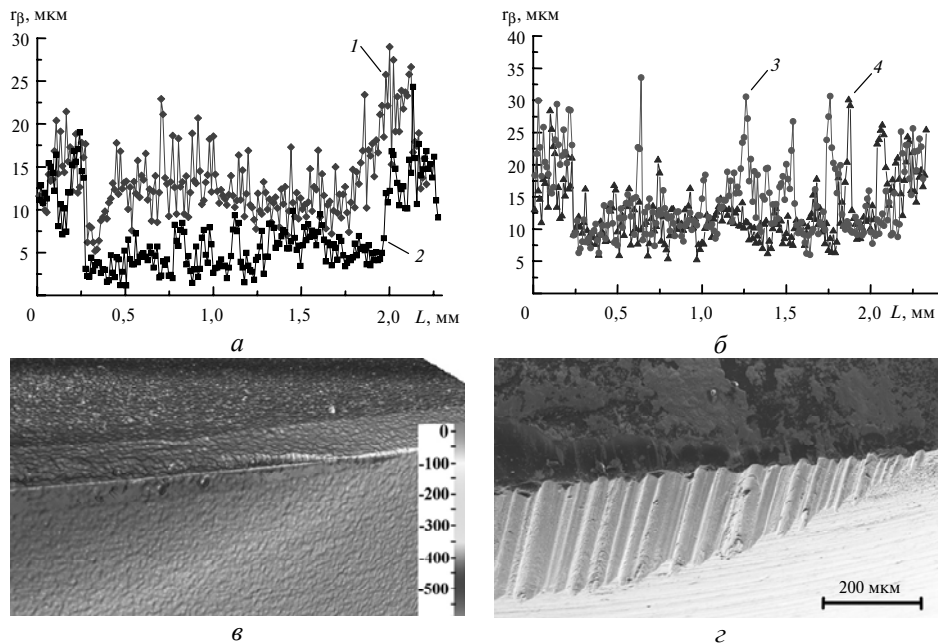


Рис. 11. Изменение радиуса округления режущей кромки инструмента с композитами LcBN (1), wBN (2) (*а*) и wBN-cBN (3), HcBN (4) (*б*); 3D-вид изношенного участка инструмента с композитом LcBN ($v_p = 120$ м/мин, $S = 0,1$ мм/об, с СОТС) (*в*); морфология изношенного участка инструмента с композитом wBN-cBN ($v_p = 150$ м/мин, $S = 0,1$ мм/об, без СОТС) (*з*).

Кроме параметров шероховатости поверхности важную роль играют и другие параметры поверхностного слоя, характеризующие его качество. Известно, что при шлифовании и точении закаленных сталей инструментами с

КНБ возможно формирование поверхностного слоя, микроструктура которого препятствует химическому травлению, и при наблюдении в оптическом микроскопе слой выглядит светлым – “белый слой” [20, 21]. Ниже такого слоя располагается участок с микроструктурой отпущенного мартенсита – “темный слой”. В [22] показано, что наличие “белого слоя” в несколько раз снижает контактную усталостную прочность изделий.

Проведенный авторами комплекс исследований показал, что при высокой степени износа инструмента с композитами с высоким содержанием КНБ в структуре обработанного материала формируются как “белый”, так и “темный” слои (рис. 12, *а*). При обработке резцами, оснащенными композитом LcBN, такие слои не наблюдали. При точении инструментами с композитами wBN–cBN и HcBN в структуре обработанного образца присутствует “белый слой”, а также происходит пластическое течение материала образца в направлении, противоположном подаче (см. рис. 12, *б*). На рис. 12, *б* отчетливо видно интенсивное течение материала под режущей кромкой инструмента, что может быть связано с размягчением поверхностного слоя обрабатываемого образца и его деформацией в направлении области меньшего контактного давления. Подобные эффекты отмечали и другие авторы. В [23, 24] показано, что такая деформация материала может быть связана со значительной величиной минимальной толщины срезаемого слоя, который оттесняется в сторону, обратную подаче. Такое пластическое течение также может возникать при размягчении материала образца из-за высоких температур на задней поверхности инструмента при больших величинах износа VB_b и малой теплопроводности материала инструмента [25].

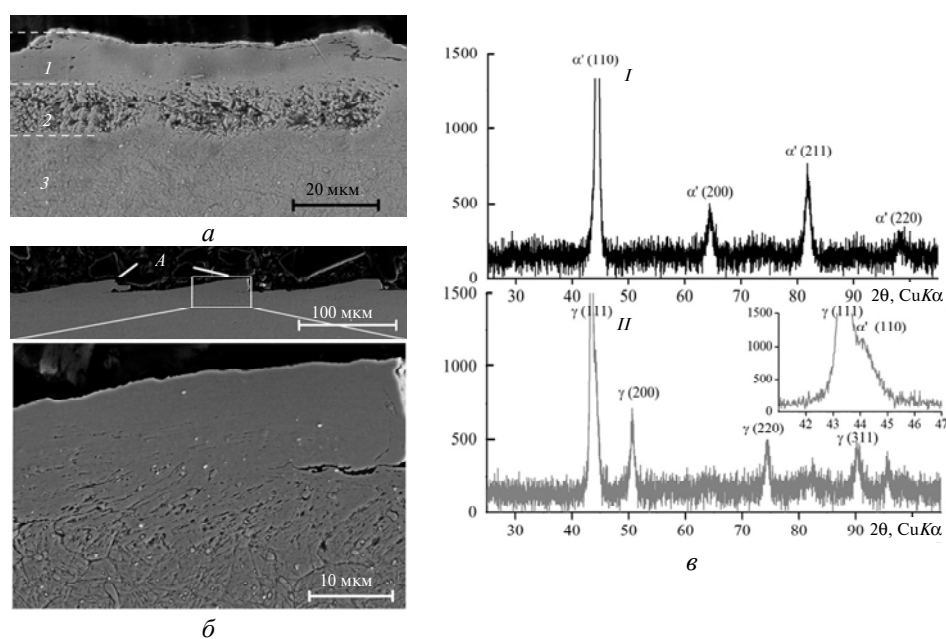


Рис. 12. Поперечное сечение поверхностного слоя образца после точения изношенным инструментом с композитом HcBN ($v_p = 180$ м/мин; $S = 0,1$ мм/об, без СОТС): 1 – “белый слой”, 2 – “темный слой”, 3 – исходный материал (*а*); участки поверхностного слоя образца, деформированные в сторону, обратную подаче, А – пластическое течение (*б*); рентгенограмма исходного материала (*I*) и “белого слоя” (*II*) (*в*).

Проведенным рентгенофазовым анализом поверхностного слоя (см. рис. 12, *в*) показано, что содержание остаточного аустенита в “белом слое” повышается. Значение, определенное по линиям α' (110) и γ (111), свидетельствует об увеличении количества остаточного аустенита с 1,2 % для исходного материала до 78,4 % для “белого слоя”. Такой рост количества остаточного аустенита связывают с превышением температуры на задней поверхности инструмента точки A_{c1} и соответствующим $\alpha \rightarrow \gamma$ превращением. При этом ультрамелкозернистая структура “белого слоя” [26], повторное превращение и повышение количества углерода в твердом растворе вследствие растворения карбидов [27] понижают точки M_n и M_k и, как следствие, стабилизируют аустенит. Действительно, на рис. 12, *б* видно, что в верхних участках “белого слоя” карбиды отсутствуют, а в нижних наблюдается как уменьшение их количества, так и округление формы.

Измерение твердости и модуля упругости материала поверхностного слоя обработанного образца методом наноиндентирования (рис. 13) показало, что в рассмотренных случаях обработки деформационное упрочнение поверхностного слоя практически не наблюдается, а изменения указанных механических характеристик, в основном, обусловлены термическим влиянием. Так, изменение твердости наблюдается в слое материала толщиной 25–30 мкм, что отвечает суммарной толщине “белого” и “темного” слоев. Как и ожидалось, “темный слой” со структурой мартенсита отпуска имеет меньшую твердость, однако и “белый слой”, который для подшипниковых сталей традиционно имеет повышенную твердость [23], в рассматриваемом случае обладал малой твердостью. Вероятно, данное явление связано с отмеченным выше растворением карбидов и наличием значительного количества остаточного аустенита.

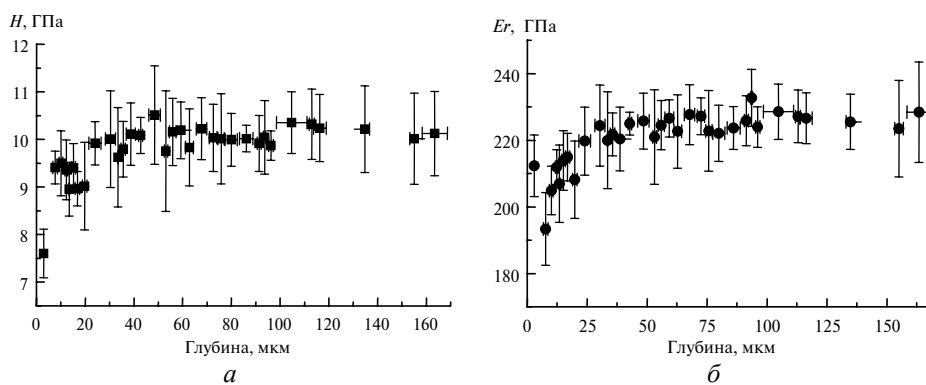


Рис. 13. Распределение твердости (*а*) и модуля упругости (*б*) по глубине поверхностного слоя обработанного образца.

Снижение величины модуля упругости в области термомеханического влияния при наличии в материале “белого слоя” также характерно для никелевых суперсплавов [28].

ВЫВОДЫ

Результаты экспериментальных исследований работоспособности инструментов, оснащенных композитами на основе КНБ с различными связками и содержанием КНБ, которые были проведены в условиях высокоскоростного течения закаленной холодноштамповой стали, показали, что инструмент с

композитом с малым содержанием КНБ и керамической связкой (LcBN) характеризуется наибольшей работоспособностью. Различие в значениях показателей работоспособности (силы резания, износостойкость инструмента, шероховатость обработанной поверхности, структурные изменения в поверхностном слое, механические характеристики материала поверхностного слоя) по отношению к рассмотренным инструментам с другим композитами является температурозависимым, снижается при уменьшении скорости резания, подачи и при использовании СОТС. При обработке с охлаждением применение инструмента с композитом без связки (BcBN) обеспечивает высокое качество обработанной поверхности, что связано с его интенсивным самозатачиванием, однако износ такого инструмента превышает износ инструмента с композитом LcBN в 3–5 раз. Инструменты, оснащенные композитами wBN-cBN и HcBN, во всех рассматриваемых случаях менее работоспособны. Применение инструментов с композитами с высоким содержанием как кубической, так и вюртцитной фаз нитрида бора приводит к формированию в поверхностном слое обработанного изделия “белого слоя”, характеризующегося частичным растворением карбидов, высоким содержанием остаточного аустенита и пониженной твердостью.

Исследования выполнены в рамках проектов ShortCut, SSF/Proviking, а также Sustainable Production Initiative (SPI). Авторы признательны докт. техн. наук И. А. Петруше (Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины), а также SECO TOOLS AB и Uddeholm Tooling AB, Швеция. Авторы выражают признательность Swedish Institute за предоставленную стипендию на проведение исследований.

Представлено результати порівняння працездатності інструментів, що оснащено композитами на основі КНБ з керамічною зв'язкою і без зв'язки, а також композитом, що містить вюртцитний нітрид бору. Працездатність оцінювали за показниками зносостійкості, величиною сили різання, параметрами якості обробленої поверхні і станом поверхневого шару обробленого зразка із загартованої холодноштампової сталі при безперервному чистовому точінні. Дослідження проведено в умовах високошвидкісної ($v_p = 120\text{--}180\text{ м/хв}$) обробки як із застосуванням СОТС, так і без нього. Найкращу працездатність інструменту за вказаними критеріями було забезпечено при використанні композиту на керамічній зв'язці, що містить малу кількість КНБ.

Ключові слова: КНБ композити, износ, “білий слой”, штампові сталі, точіння загартованих сталей.

The paper presents the results of comparative study of performance of cutting tools made of ceramic-bound, binderless cBN, and wBN-cBN tool materials. The tool performance was assessed by tool wear-resistance, values of cutting forces, parameters of machined surface quality, and the state of sub-surface layer generated in continuous turning of hardened coldwork tool steel. The tests were carried out under conditions of high-speed machining ($v_c = 120\text{--}180\text{ m/min}$) both with and without a coolant. The best tool performance by the above-mentioned criteria is provided by a low-cBN material with ceramic binder.

Keywords: CBN, wear, white layer, coldwork steels, hard turning.

1. Chou Y. K. Hard turning of M50 steel with different microstructures in continuous and intermittent cutting // *Wear*. – 2003. – **255**. – P. 1388–1394.
2. Aslan E. Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X219 Cr12 cold-work tool steel (62 HRC) // *Mater. Design*. – 2005. – **26**. – P. 21–27.
3. Haplin T., Byrne G., Barry J., Ahearne E. The performance of polycrystalline cubic boron nitride tools in continuous, semi-interrupted, and interrupted hard machining // *J. Eng. Manuf.* – 2009. – **223**. – P. 947–953.
4. Davies M. A., Chou Y., Evans C. J. On chip morphology, tool wear and cutting mechanisms in finish hard turning // *Annals CIRP*. – 1996. – **45**. – P. 77–81.

5. Клименко С. А., Манохин А. С., Мельничук Ю. А. Износ и стойкость инструмента, оснащенного пластинами из ПСТМ на основе КНБ, при чистовом точении закаленных сталей с большими // *Сверхтв. материалы.* – 2012. – № 1. – С. 66–74.
6. *Bushlya V., Gutnichenko O., Zhou J. M. et al.* Effects of cutting speed when turning age hardened Inconel 718 with PCBN tools of binderless and low-cBN grades // *Machining Sci. Techn.* – 2013. – **17**. – P. 497–523.
7. *Dogra M., Sharma V., Sachdeva A., Suri N. M.* Tool life and surface integrity issues in continuous and interrupted finish hard turning with coated carbide and CBN tools // *J. Eng. Manuf.* – 2011. – **226**. – P. 431–444.
8. http://www.uddeholm.com/files/PB_caldie_english.pdf
9. *Spriggs G. E.* Properties of diamond and cubic boron nitride // *Hard materials. Vol. 2A2: Powder metallurgy data. Refractory, hard and intermetallic materials* / Ed. P. Beiss, R. Ruthardt, H. Warlimont. – Springer Materials – The Landolt-Börnstein Database (<http://www.springermaterials.com>).
10. *Жедь В. П., Боровский Г. В., Музыкант Я. А., Иннолитов Г. М.* Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми и керамическими материалами, и их применение: Справ. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
11. *Petrusha I. A., Osipov A. S., Smirnova T. I. et al.* High-E/low-E CBN/Si₃N₄ composite for heavy interrupted cutting // *Proc. 4th Int. Swedish Production Symp., Lund, Sweden, 3–5 May, 2011.*
12. *ISO 3685:1993E* Tool life testing with single-point turning tools.
13. *Bhaumik S. K., Divakar C., Singh A. K.* Machining Ti6Al4V alloy with a wBN–cBN composite tool // *Materials and Design.* – 1995. – **16**. – P. 221–226.
14. *Klimenko S. A., Mukovoz Yu. A., Lyashko V. A. et al.* On the wear mechanism of cubic boron nitride base cutting tools // *Wear.* – 1992. – **157**. – P. 1–7.
15. *Angseryd J., Andrén H.-O.* An in-depth investigation of the cutting speed impact on the degraded microstructure of worn PCBN cutting tools // *Ibid.* – 2011. – **271**. – P. 2610–2618.
16. *M'Saoubi R., Johansson M. P., Andersson J. M.* Wear mechanisms of PVD-coated PCBN cutting tools // *Ibid.* – 2013. – **302**. – P. 1219–1229.
17. *Bushlya V., Zhou J., Avdovic P., Stahl J. E.* Performance and wear mechanisms of whisker reinforced alumina, coated and uncoated PCBN tools when high-speed turning aged Inconel 718 // *Int. J. Adv. Manuf. Techn.* – 2013. – **66**. – 2013–2021.
18. *Knuefermann M. M. W., Read R. F. J., Nunn R. et al.* 22 nm Ra surface finish achieved with AMBORITE DBN45 in ultra-precision turning of hardened steel // *Ind. Diamond Rev.* – 2001. – **2**. – P. 87–92.
19. *Barry J., Byrne G.* Cutting tool wear in the machining of hardened steels. Part II: Cubic boron nitride cutting tool wear // *Wear.* – 2001. – **247**. – P. 152–160.
20. *Guo Y. B., Sahni J.* A comparative study of hard turned and cylindrically ground white layers // *Int. J. Machine Tools Manuf.* – 2004. – **44**. – P. 135–145.
21. *Клименко С. А., Манохин А. С.* Твердое “бреющее” точение // *Сверхтв. материалы.* – 2009. – № 1. – С. 58–74.
22. *Schwach D. W., Guo Y. B.* A fundamental study on the impact of surface integrity by hard turning on rolling contact fatigue // *Int. J. Fatigue.* – 2006. – **28**. – P. 1838–1844.
23. *El-Wardany T. I., Kishawy H. A., Elbestawi M. A.* Surface integrity of die material in high speed hard machining, part I: Micrographical analysis // *J. Manuf. Sci. Eng., Trans. ASME.* – 2000. – **122**. – P. 620–631.
24. *Клименко С. А.* К вопросу о механизме формирования микрогеометрии поверхности при лезвийной обработке // *Сверхтв. материалы.* – 1997. – № 5. – С. 43–53.
25. *Bushlya V., Zhou J. M., Lenrick F. et al.* Characterization of white layer generated when turning aged Inconel 718 // *Proc. Eng.* – 2011. – **19**. – P. 60–66.
26. *Barry J., Byrne G.* TEM study on the surface white layer in two turned hardened steels // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2002. – **325**. – P. 356–364.
27. *Сулима А. М., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д.* Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
28. *Wusatowska-Sarnek A. M., Dubiel B., Czyska-Filemonowicz A. et al.* Microstructural characterization of the white etching layer in nickel-based superalloy // *Metal. Mater. Trans. A.* – 2011. – **42**. – P. 3813–3825.

Division of Production and Materials Engineering, Lund University
 Uddeholm AB, SE-68385 Hagfors, Sweden

Поступила 12.11.13