

Исследование процессов обработки

УДК 941.025.7:621.9.011

С. Ан. Клименко, А. С. Манохин, С. А. Клименко* (г. Киев)
*atmu@ism.kiev.ua

Исследование параметров контактной зоны и напряжений на передней поверхности инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, при точении закаленной стали

Выполнен комплекс экспериментальных исследований геометрических параметров зоны контакта инструмента с обрабатываемым материалом. Определены усадка стружки, силы резания и температура на передней поверхности инструмента, оснащенного поликристаллическими сверхтвердыми материалами на основе кубического нитрида бора, при чистовом точении закаленной стали. Оценены нормальные и касательные напряжения на участке контакта инструмента со стружкой. Показано, что на участки пластического и упругого контактов инструмента со стружкой приходится соответственно 70 и 30 % от нормальной силы, действующей на передней поверхности резца.

Ключевые слова: инструмент, поликристаллический сверхтвердый материал, кубический нитрид бор, закаленная сталь, напряжение, контактная зона.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими показателями, во многом определяющими эффективность процесса обработки резанием, являются нормальные и касательные напряжения на передней поверхности инструмента. От их величин зависят как работоспособность режущего инструмента, так и возможности по повышению производительности обработки и достижению требуемого качества обработанной поверхности изделий.

Оценка величины контактных напряжений на передней поверхности инструмента связана с определением размерных параметров контактной зоны на режущем инструменте с учетом наличия у стружки усадки. Знание длины контакта стружки L с передней поверхностью инструмента имеет большое значение при аналитических расчетах показателей и компьютерном моделировании процесса резания.

Среди возможных способов определения значения L можно выделить методы скоростной киносъемки, оценки следов от стружки на передней поверх-

© С. АН. КЛИМЕНКО, А. С. МАНОХИН, С. А. КЛИМЕНКО, 2015

ности инструмента, аналитические и численные расчеты. Однако наиболее часто длину контакта стружки с передней поверхностью инструмента определяют на основании полуэмпирических зависимостей [1]. Анализ результатов расчетов, выполненных с использованием этих формул, показывает существенное их отличие [2]. Кроме того, необходимо принять во внимание, что эти зависимости в большинстве случаев получены для твердосплавных инструментов и при оценке параметров контактной зоны применительно к инструментам из поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (КНБ) [2, 3] правомерность их использования недостаточно экспериментально обоснована. В этой связи при оценке напряжений, имеющих место на передней поверхности режущего инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, с учетом эмпирических данных о силе резания, представляет интерес проведение исследований, направленных на получение экспериментальных данных, которые позволили бы уточнить зависимость L от условий обработки, а также оценить соотношение длины пластического и упругого участков контактной зоны со стружкой на передней поверхности режущего инструмента.

Целью настоящей работы была оценка длины контактного участка инструмента со стружкой и контактных напряжений на передней поверхности инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, при точении закаленной стали.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проводили на токарно-винторезном станке ФТ-11 при точении стали ШХ15 (60–62 HRC) инструментом с механическим креплением сменных неперетачиваемых режущих пластин RNMN 070300Т (ТУ2-037-636–89) из ПСТМ марки киборит. На рабочие поверхности пластин методом вакуумно-дугового напыления наносилось медное покрытие толщиной 5 мкм. Микроскопические исследования контактных участков инструмента выполняли с помощью микроскопа Neophot 21 и сканирующего электронного микроскопа Zeiss EVO 50 XVP (“Carl Zeiss”, Германия).

Как характеристики зоны контакта на передней поверхности инструмента рассматривали длину контакта L , площадь контактного участка A и активную длину режущей кромки b . Изображение контактного участка на передней поверхности инструмента фиксировали с помощью микроскопа Neophot 21 при увеличении $\times 12,5$.

Составляющие силы резания измеряли универсальным динамометром УДМ-600 конструкции ОАО “ВНИИинструмент” (г. Москва, Россия), откалиброванного с использованием образцового динамометра ДОСМ-200. Мгновенные значения составляющих силы резания фиксировали с помощью специального аппаратного комплекса, в состав которого входят модуль измерения, оснащенный аналогово-цифровым преобразователем, и персональный компьютер.

Поперечную усадку стружки определяли экспериментально с использованием коэффициента

$$\xi = \frac{a_{\text{ст}}}{a_{\text{ср}}},$$

где $a_{\text{ст}}$ – средняя толщина стружки в поперечном сечении; $a_{\text{ср}}$ – средняя расчетная толщина сечения среза:

$$a_{\text{ср}} = S \frac{t}{b},$$

где b – активная длина режущей кромки; t – глубина резания. Для инструмента с круглой режущей пластиной b определяют по формуле

$$b = ra_{\text{cp}} \cos\left(\frac{r-t}{r}\right) + ra_{\text{cp}} \sin\left(\frac{S}{r}\right),$$

где r – радиус режущей пластины.

Толщину стружки $a_{\text{ст}}$ определяли по ее поперечным шлифам с использованием микроскопа Neophot 21 при увеличении $\times 20$.

При выделении составляющих силы резания, действующих на задней поверхности инструмента, использовали их экстраполяция на нулевую толщину среза.

Средние значения нормальных $q_{N\text{cp}}$ и касательных $q_{F\text{cp}}$ напряжений на передней поверхности инструмента определяли по экспериментальным данным о силах резания в соответствии с методикой, изложенной в [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 представлены микроснимки контактных участков передней поверхности режущего инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, в зависимости от режимов обработки образцов из закаленной стали. Применение инструментов с медным покрытием позволило отчетливо выделить контактный участок инструмента и проанализировать его размерные характеристики. Результаты исследований представлены в табл. 1 и на рис. 2.

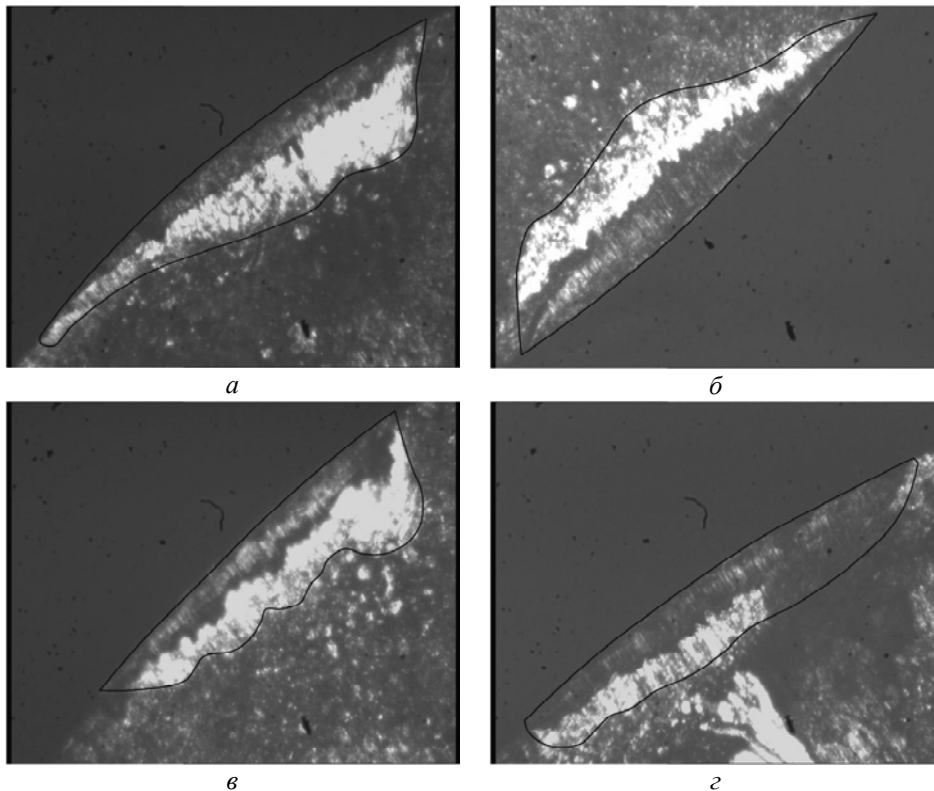


Рис. 1. Контактные участки передней поверхности инструмента ($t = 0,2$ мм) при изменении скорости резания $v = 1,0$ (а), $1,5$ (б), $2,0$ (в), $2,5$ (г) м/с ($S = 0,14$ мм/об) и подачи $S = 1,0$ (д), $0,12$ (е), $0,14$ (ж), $0,16$ (з) мм/об ($v = 1,5$ м/с).

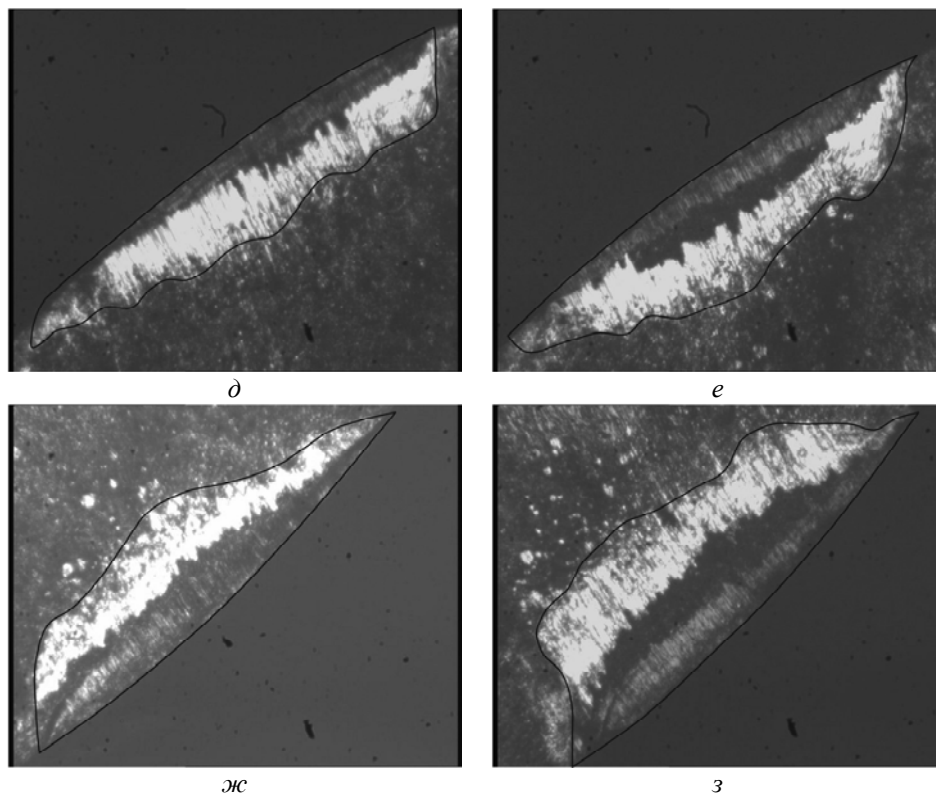


Рис. 1. (Продолжение).

Расчет длины контакта инструмента со стружкой выполняли по формуле [1]

$$L = a_{\text{ср}} \xi^{0,1} \left[\xi(1 - \text{tg } \gamma) + \frac{2}{\cos \gamma} \right], \quad (1)$$

где γ – передний угол инструмента.

Таблица 1. Усадка стружки и параметры участка контакта инструмента со стружкой

Режим резания			Усадка стружки ξ	Длина контакта		Активная длина режущей кромки		Площадь контактного участка. A , мм ²
v , м/с	S , мм/об	t , мм		$L_{\text{экср}}$, мм	$L_{\text{расч}}$, мм	$b_{\text{экср}}$, мм	$b_{\text{расч}}$, мм	
1,0	0,14	0,2	3,8	0,245	0,231	1,34	1,33	0,321
1,5			3,0	0,214	0,201	1,32	1,33	0,287
2,0			2,5	0,178	0,165	1,31	1,33	0,231
2,5			2,3	0,158	0,151	1,35	1,33	0,213
1,5	0,1	0,2	3,7	0,195	0,187	1,25	1,28	0,248
	0,12		3,3	0,203	0,195	1,31	1,31	0,264
	0,14		3,0	0,214	0,201	1,32	1,33	0,287
	0,16		2,9	0,23	0,224	1,35	1,35	0,321

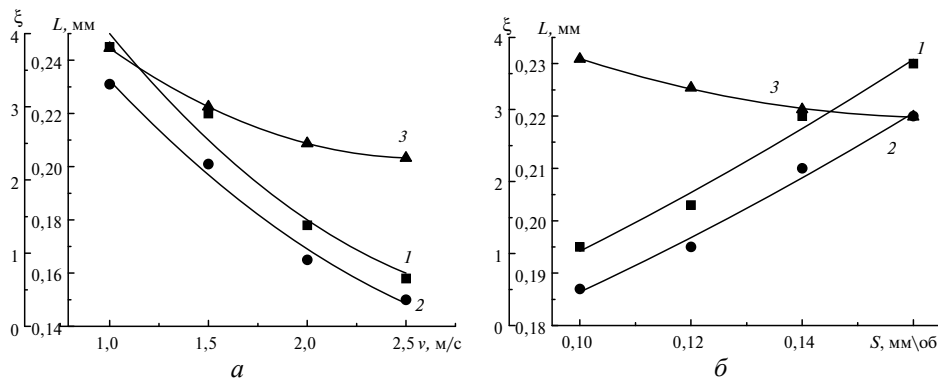


Рис. 2. Экспериментальная (1) и рассчитанная (2) по формуле (1) зависимость длины контакта инструмента со стружкой и усадки (3) стружки от скорости резания (а) и подачи (б).

Экспериментальные зависимости величины усадки стружки от скорости резания и подачи при точении стали ШХ15 аппроксимируются выражениями

$$\xi(v) = 0,6v^2 - 3,1v + 6,3, \quad S = 0,14 \text{ мм/об}; \quad (2)$$

$$\xi(S) = 187,5S^2 - 62,25S + 8,05, \quad v = 1,5 \text{ м/с}. \quad (3)$$

Анализ результатов исследований показывает уменьшение длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента с ПСТМ на основе КНБ при росте скорости резания, что связано с повышением температуры в зоне резания и снижением коэффициента трения, а также меньшей усадкой стружки, что приводит к интенсификации трения скольжения на передней поверхности инструмента. С ростом подачи длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента увеличивается, что обусловлено изменением толщины среза. Усадка стружки при этом снижается менее интенсивно в сравнении с ее изменением при увеличении скорости резания, что ведет к росту длины контакта с передней поверхностью инструмента. Отличие между экспериментальными данными и результатами теоретических расчетов длины контакта по формуле (1) при изменении скорости резания не превышает $\sim 7\%$, а при изменении подачи – $\sim 5\%$. Такое отличие между полученными результатами связано тем, что зависимость (1) получена для случая точения стали твердосплавными инструментами, а для пары трения твердый сплав–сталь характерна несколько бóльшая величина коэффициента трения, чем для пары трения ПСТМ на основе КНБ–сталь.

На долю участка пластического контакта стружки с передней поверхностью инструмента приходится 30–80 % от ее общей длины [2, 5, 6]. В каждом конкретном случае эта доля определяется физико-механическими характеристиками обрабатываемого и инструментального материалов, а также условиями термобарического нагружения в контактной зоне, в частности скоростью резания. Для более точной оценки размера участков пластического и упругого контактов стружки с передней поверхностью инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, при точении закаленной стали проведены специальные исследования (рис. 3).

Вид контактных участков на передней поверхности инструментов (изображения получены в режиме фазового контраста) позволяет заключить, что размер зоны пластического контакта соответствует участку, на котором отсутствует слой медного покрытия, разрушающийся и удаляемый вследствие

термобарического нагружения. Зона упругого контакта соответствует участку передней поверхности инструмента, на который нанесено медное покрытие со следами контакта в виде рисок в направлении схода стружки, оставленных твердыми включениями в ее материале, а также дефектов, связанных с адгезионным взаимодействием между стружкой и инструментом. Количественные характеристики зон пластического и упругого контактов на передней поверхности инструмента приведены в табл. 2 и на рис. 4.

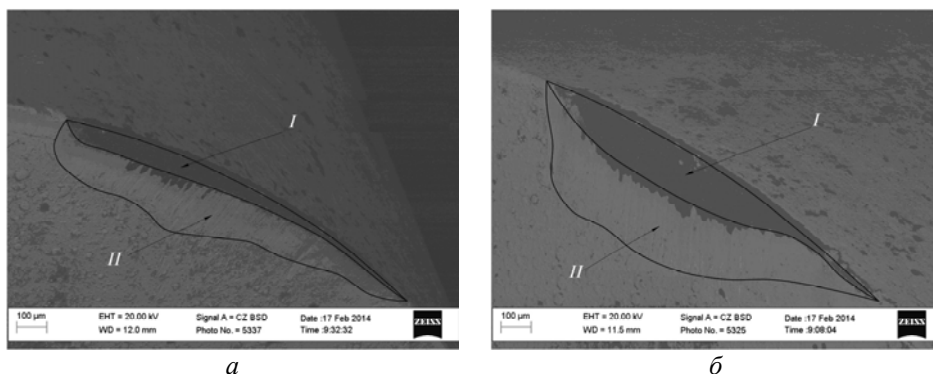


Рис. 3. Контактные участки передней поверхности инструмента (изображения в режиме фазового контраста) при $v = 1,0$ м/с, $S = 0,14$ мм/об, $t = 0,2$ мм (а) и $v = 1,5$ м/с, $S = 0,12$ мм/об, $t = 0,2$ мм (б): зона пластического (I) и упругого (II) контакта.

Таблица 2. Параметры зон контакта инструмента со стружкой

Режим резания		Длина зоны контакта, мм		Площадь зоны контакта, мм ²	
v , м/с	S , мм/об	$L_{пл}$	$L_{упр}$	$A_{пл}$	$A_{упр}$
1,0	0,14	0,078	0,167	0,125	0,196
1,5		0,079	0,135	0,112	0,175
2,0		0,076	0,102	0,096	0,135
2,5		0,074	0,084	0,090	0,123
1,5	0,10	0,064	0,131	0,076	0,172
	0,12	0,070	0,133	0,082	0,182
	0,14	0,079	0,135	0,112	0,175
	0,16	0,095	0,142	0,119	0,202

Анализ полученных данных показывает, что при увеличении скорости резания в диапазоне 1,0–2,5 м/с длина зоны пластического контакта $L_{пл}$ практически не изменяется, а общая длина контакта L инструмента со стружкой снижается за счет уменьшения длины зоны упругого контакта $L_{упр}$. Возможным объяснением слабого изменения размера зоны пластического контакта на передней поверхности инструмента с увеличением скорости резания является “герметизация зоны резания” [7]. С увеличением скорости резания ухудшаются условия проникновения элементов внешней среды в контактную зону на передней поверхности инструмента вследствие увеличения нормальной силы и скорости движения стружки, что и обуславливает некоторую изолированность этого участка. В зоне упругого взаимодействия, где контакт не является сплошным, влияние окружающей среды проявляется более интенсивно из-за относительно свободного доступа.

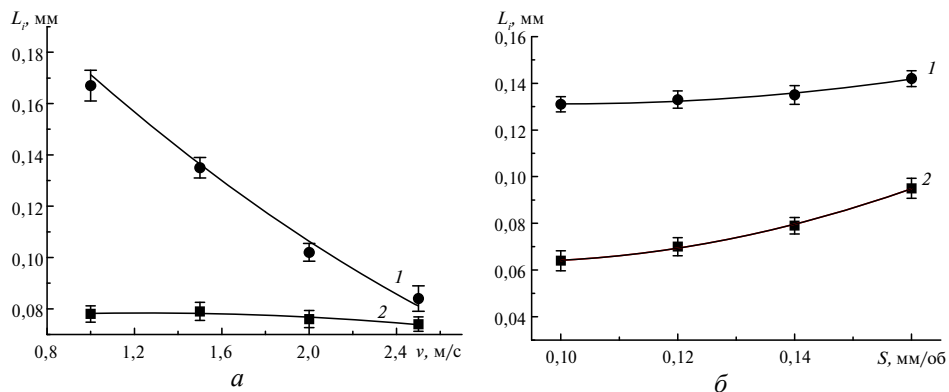


Рис. 4. Влияние скорости резания (a) и подачи (b) на длину зоны упругого (I) и пластического (2) контактов инструмента со стружкой.

Увеличение подачи обуславливает рост зоны пластического контакта передней поверхности инструмента со стружкой за счет изменения толщины среза.

В рассмотренных условиях резания среднее соотношение между длинами зон упругого и пластического контактов составляет $L_{упр}/L_{пл} \approx 1,2$.

Для оценки средних касательных q_{Fcp} и нормальных q_{Ncp} напряжений в зоне контакта передней поверхности инструмента со стружкой была использована методика, описанная в [4].

Особенности контактного взаимодействия между инструментом и стружкой обуславливают сложный характер распределения напряжений в контактной зоне. Для установления характера распределения напряжений используются различные экспериментальные подходы, однако существующими методами удастся получить достоверные результаты только на расстоянии 0,15–0,20 мм от режущей кромки инструмента [5]. Учитывая результаты исследований, приведенные в табл. 1, такие методы не могут быть использованы при обработке закаленной стали инструментом, оснащенным ПСТМ на основе КНБ. В то же время, зная размеры зон пластического и упругого контактов инструмента со стружкой, можно оценить напряженное состояние каждой из составляющих контактного участка инструмента с помощью эпюр распределения нормальных σ_N и касательных τ контактных напряжений (рис. 5).

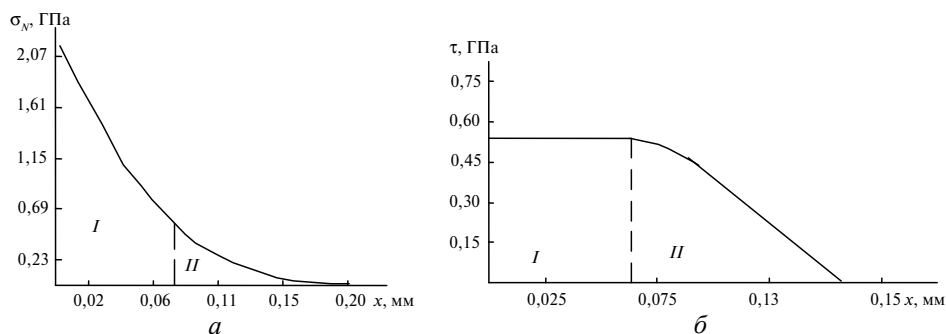


Рис. 5. Распределение нормальных (a) и касательных (b) напряжений на участке контакта инструмента со стружкой ($v = 1,5$ м/с, $S = 0,12$ мм/об, $t = 0,2$ мм): пластический (I) и упругий (II) контакты.

Считается, что нормальные контактные напряжения σ_N имеют наибольшую величину у режущей кромки инструмента, монотонно уменьшаясь до нуля по мере удаления от нее (см. рис. 5, а).

Касательные контактные напряжения τ принято считать постоянными на участке пластического контакта, а на участке упругого контакта они плавно уменьшаются до нуля [5, 8] (см. рис. 5, б). Их распределение можно описать зависимостью

$$\tau(x) = \begin{cases} q_{\text{Фсп}}, & 0 \leq x \leq L0,4; \\ 2q_{\text{Фсп}} \left(-\frac{1}{L}x + 1 \right), & L0,4 \leq x \leq L. \end{cases} \quad (5)$$

ВЫВОДЫ

Исследованы параметры участка контакта инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, при чистовом точении закаленной стали. Предложен оригинальный методический подход к оценке размеров зон пластического и упругого контакта инструмента со стружкой с использованием тонкого медного покрытия, которое дает возможность получать информацию об износе инструмента.

Установлено, что для инструментов из ПСТМ на основе КНБ соотношение между длинами пластической и упругой зон контакта на передней поверхности составляет $\sim 1,2$.

Анализ полученных в результате аналитико-экспериментального исследования эпюр распределения нормальных и касательных контактных напряжений на передней поверхности инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, показал, что на участки контакта инструмента со стружкой, которые характеризуются как зоны пластического и упругого контактов, приходится соответственно ~ 70 и ~ 30 % от нормальной силы, приложенной к передней поверхности инструмента.

Виконано комплекс експериментальних досліджень геометричних параметрів ділянки контакту інструменту з оброблюваним матеріалом. Встановлено усадку стружки, сили різання і температуру на передній поверхні інструменту, оснащеного полікристалічними надтвердими матеріалами на основі кубічного нітриду бору, при чистовому точінні загартованої сталі. Оцінено рівні нормальних і дотичних напружень на ділянці контракту інструменту зі стружкою. Показано, що на ділянки пластичного і пружного контактів інструменту зі стружкою, припадає відповідно 70 і 30 % від нормальної сили, що діє на передній поверхні різця.

Ключові слова: інструмент, полікристалічний надтвердий матеріал, кубічний нітрид бору, загартована сталь, напруження, контактна зона.

A complex of experimental investigation of geometric parameters of the zone of the tool contact with the workpiece material has been carried out. The shrinkage of chips, cutting forces and temperature on the rake face of a tool equipped with cBN-based polycrystalline superhard material in fine turning of hardened steel have been defined. Normal and shear stresses at the region of the tool contact with chips have been assessed. It has been shown that the regions of plastic and elastic contacts account, respectively, for 70 and 30% of normal force acting on the cutter rake face.

Keywords: tool, PSHM, cBN, hardened steel, stress, contact zone

1. Розенберг Ю. А. Резание материалов: Учебник для техн. ВУЗов. – Курган: Изд-во ОАО “Полиграфический комбинат “Заураль”, 2007. – 294 с.

2. *Сверхтвердые материалы. Получение и применение: в 6 т. / Под общей ред. Н. В. Новикова.* – К.: ИСМ им В. Н. Бакуля, ИПШ “АЛКОН” НАНУ, 2006. – Т. 5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С. А. Клименко. – 316 с.
3. *Аранзон М. А. Точение сталей и сплавов резцами из синтетических сверхтвердых материалов: Учеб. пособие.* – Куйбышев: КуАИ, 1977. – 82 с.
4. *Манохин А. С., Клименко С. А., Копейкина М. Ю. и др. Трибология процесса резания инструментом, оснащенный ПСТМ на основе КНБ // Сверхтв. материалы.* – 2014. – № 2. – С. 78–92.
5. *Мазур Н. П., Внуков Ю. Н., Грабченко А. И. и др. Основы теории резания материалов: учебник / Под общ. ред. Н. П. Мазура и А. И. Грабченко.* – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2013. – 534 с.
6. *Вульф А. М. Резание металлов.* – Л.: Машиностроение, 1973. – С. 87–89.
7. *Промтов А. И. Внешняя среда в механике процесса резания // Вопросы механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования: Сб. науч. тр. / НАН Украины. Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля.* – Серия Г: Процессы механической обработки, станки и инструменты. – К., 2002. – С. 44–52.
8. *Зорев Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов.* – М.: Машгиз, 1956. – 318 с.

Ин-т сверхтвердых материалов
им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Поступила 06.05.14