

УДК 621.9.025.7

Контактные напряжения на передней поверхности инструментов, оснащенных композитами на основе кубического нитрида бора, при точении закаленной стали

С. А. Клименко¹⁾, С. Ан. Клименко¹⁾, А. С. Манохин¹⁾,
 Ю. А. Мельничук¹⁾, М. Ю. Копейкина¹⁾, А. А. Чумак¹⁾

¹⁾ *Институт сверхтвёрдых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины,
 ул. Автозаводская, 2, 04074, г. Киев, Украина*

Article info:

Paper received:

April 9, 2017

The final version of the paper received:

May 25, 2017

Paper accepted online:

May 29, 2017

Correspondent Author's Address:

atmu@meta.ua

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по определению геометрических параметров зоны контакта стружки с передней поверхностью инструментов, а также усадки стружки при чистовом точении закаленной стали ХВГ инструментами, оснащенными композитами из поликристаллических сверхтвёрдых материалов cBN-Si₃N₄ (3–5 % об.) и cBN-Si₃N₄ (3–5 % об.)-TiC (45 % об.) с различным содержанием кубического нитрида бора. На основе экспериментально установленных значений составляющих сил резания выполнен теоретический расчет уровня максимальных нормальных и касательных контактных напряжений для двух типов инструментов: с высоким (ВН) и низким (ВЛ) содержанием бора, а также показан характер их распределения вдоль участка контакта стружки с передней поверхностью инструментов. Показано, что при точении закаленной стали ХВГ инструментом с композитом группы ВЛ в зоне контакта возникают нормальные напряжения до 3,0 ГПа и касательные – 0,18 ГПа при скорости резания 200 м/мин, при точении инструментом с композитом группы ВН – 2,1 ГПа и 0,58 ГПа соответственно при скорости резания 100 м/мин.

Ключевые слова: режущий инструмент, поликристаллический сверхтвёрдый композит, кубический нитрид бора, усадка стружки, контактные напряжения, точение, закаленная сталь.

1. ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование технологий механической обработки изделий из конструкционных материалов, в том числе закаленных сталей, связано с повышением производительности за счет увеличения скорости резания, что, в свою очередь, обусловлено созданием новых режущих инструментов с применением высокоэффективных инструментальных композитов, таких как сверхтвёрдые материалы (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (cBN) [1].

Согласно стандарта ISO 513-2012 композиты на основе cBN в зависимости от содержания последнего делятся на две группы – ВН, ВЛ. Композиты группы ВН – с 70–95 % об. cBN являются существенно монофазными по своей структуре. К группе ВЛ относятся композиты с 40–65 % об. cBN. Матрица, дисперсность структуры которой соответствует субмикронному диапазону, мультифазная и имеет сложный химический состав на основе керамических компонент с TiN, Ti(C, N), TiC, TaN, TiB₂, Si₃N₄, SiC, MAX-фаз.

Отличие химических составов и физико-механических свойств композитов обуславливает особенности эффективного применения оснащенных ими режущих инструментов.

Высокая твердость, модуль упругости, трещиностойкость и теплопроводность позволяет инструментам из композитов группы ВН эффективно обрабатывать закаленные стали на скоростях резания до 120–150 м/мин. Дальнейшее увеличение скорости резания приводит к снижению стойкости инструмента в связи с увеличением температуры резания и интенсификации процессов химического взаимодействия на контактных участках инструмента.

В сравнении с ПСТМ группы ВН композиты группы ВЛ имеют меньшие модуль упругости и теплопроводность, но при этом характеризуются меньшей интенсивностью химического взаимодействия с обрабатываемым материалом при высоких температурах, что позволяет оснащать ими режущие инструменты, которые способны проводить чистовую токарную обработку закаленных сталей со скоростями резания до 270–300 м/мин [2].

Нужно отметить, что последнее во многом определяется особенностями контактного взаимодействия инструмента со стружкой в зоне резания, в частности различными напряжениями на контактных участках инструментов, что и обуславливает интенсивность их изнашивания.

Возможности совершенствования композитов инструментального назначения связаны с

расширением представлений о процессах, протекающих на контактных участках инструментов в зоне резания, в частности с представлениями об особенностях их напряженного состояния, что дает дополнительную информацию для формирования комплекса требований, предъявляемых к физико-механическим свойствам такого композита, реализация которых обуславливает работоспособность инструментов в эксплуатации.

В настоящее время в технической литературе имеется гамма публикаций, отражающих результаты экспериментальных и модельных исследований напряженного состояния режущих инструментов [3–7], однако, результаты работ по изучению напряженного состояния инструментов, оснащенных ПСТМ на основе cBN, в зависимости от содержания последнего авторам настоящей работы неизвестны. Учитывая перспективность и различные области применения инструментов, оснащенных ПСТМ групп ВН и ВЛ, такие исследования весьма актуальны как с научной, так и практической точки зрения. Их результаты важны для решения задач как создания композитов инструментального назначения, так и оценки работоспособности оснащенных ими инструментов в эксплуатации.

Целью данной работы являлось исследование контактных напряжений на передней поверхности инструментов из поликристаллических сверхтвердых материалов на основе cBN с различным содержанием последнего.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Методика исследований

Экспериментальные исследования проводились на токарно-винторезном станке ФТ-11 при чистовом точении образцов из закаленной стали ХВГ (60–62 HRC) инструментами с механическим креплением сменных неперетачиваемых пластин RNMN 0703T из ПСТМ на основе cBN групп ВН – cBN-Si₃N₄ (3–5 % об.) и ВЛ – cBN-Si₃N₄ (3–5 % об.)-TiC (45 % об.).

Зона контакта стружки с передней поверхностью инструмента характеризуется длиной (L) и площадью контакта (A), активной длиной режущей кромки (b). Для четкой визуализации зоны контакта, на режущие пластины методом вакуумно-дугового напыления наносилось информационное покрытие из алюминия толщиной 2 мкм.

Составляющие силы резания измерялись универсальным динамометром УДМ-600 (ОАО ВНИИинструмент», Россия), входящим в аппаратный комплекс, позволяющий в режиме online фиксировать уровень составляющих силы резания. Динамометр откалиброван эталонным динамометром ДОСМ-200.

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

Поперечная усадка стружки ξ определялась экспериментально по зависимости

$$\xi = a_{ст} / a_{ср}, \quad (1)$$

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

среза

$$a_{ср} = S \cdot \frac{t}{b}, \quad (2)$$

где b – активная длина режущей кромки; для инструмента с круглой режущей пластиной находится по формуле

$$b = r \cdot a \cos\left(\frac{r-t}{r}\right) + a \sin\left(\frac{S}{r}\right), \quad (3)$$

где r – радиус при вершине инструмента (радиус режущей пластины).

Толщина стружки $a_{ст}$ определялась по ее поперечному шлифу на микроскопе Neophot 21.

Микроскопические исследования длины контакта стружки (L) с передней поверхностью инструмента выполнялись с помощью микроскопов Neophot 21 и MicroViev U500X.

Значение контактных напряжений на передней поверхности инструмента определялись по экспериментальным данным о составляющих силы резания и площади контакта инструмента со стружкой по методике, изложенной в [8].

2.2. Результаты исследований

Результаты исследования геометрических параметров контактных зон на передней поверхности инструментов, оснащенных ПСТМ на основе cBN, представлены на рис. 1–2, а также в табл. 1. Использование инструментов с информационным покрытием позволило четко выделить исследуемые участки инструментов и определить их геометрические параметры.

Анализ результатов проведенных исследований показывает, что для инструментов из композитов cBN-Si₃N₄ (3–5 % об.) и cBN-Si₃N₄ (3–5 % об.)-TiC (45 % об.) увеличение подачи приводит к увеличению длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента, что обусловлено увеличением толщины среза. При этом коэффициент усадки стружки снижается вследствие увеличения температуры резания.

При использовании инструментов группы ВЛ следует отметить меньшие значения длины контакта в сравнении с инструментами из ПСТМ группы ВН, что объясняется комплексным изменением параметров процесса резания – увеличением температуры обработки и изменением условий трения на контактных участках инструмента.

Исследования показали, что при работе инструментами двух типов со скоростью резания 100 м/мин (рис. 2) коэффициенты усадки стружки (ξ) имеют близкие значения, что говорит о почти одинаковой степени пластической деформации в зоне резания. При увеличении скорости резания до 200 м/мин (рис. 2) коэффициент усадки стружки для инструмента с низким содержанием нитрида бора уменьшается, что связано с более благоприятными условиями стружкообразования – уменьшением степени деформации материала на контактной поверхности инструмента и увеличением скорости схода стружки по передней поверхности инструмента, в результате чего снятие припуска реализуется при меньшей силе резания.

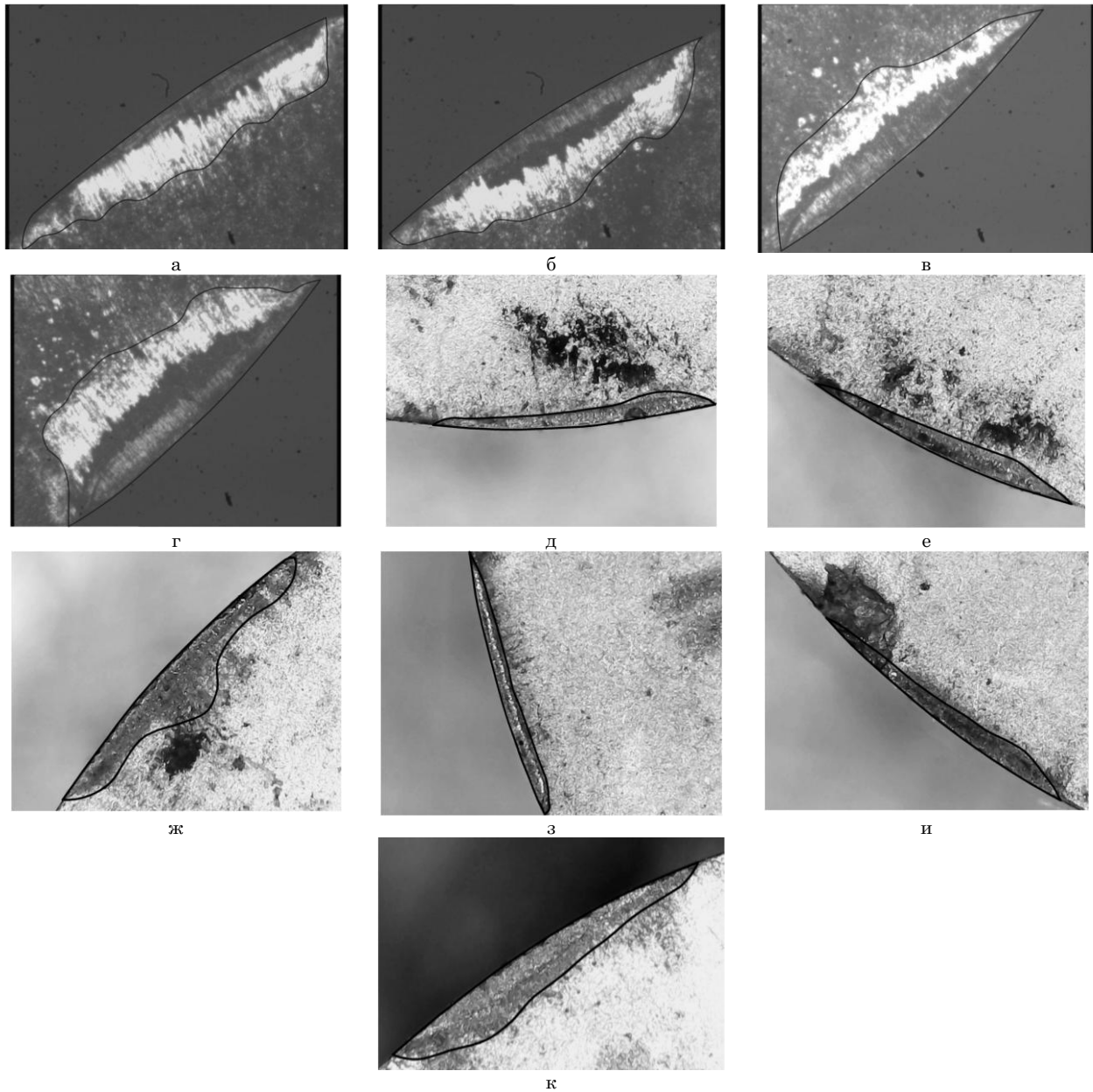


Рисунок 1 – Контактные участки инструментов из ПСТМ на основе cBN групп BH (а-г) и BL (д-к):
 а-ж – $v = 100$ м/мин; з-к – $v = 200$ м/мин; а, д, з – $S = 0,1$ мм/об; б – $S = 0,12$ мм/об; в – $S = 0,14$ мм/об; г – $S = 0,16$ мм/об;
 е, и – $S = 0,19$ мм/об; ж, к – $S = 0,29$ мм/об; а-г – Neophot 21, $\times 160$; д-к – MicroView U500X, $\times 100$

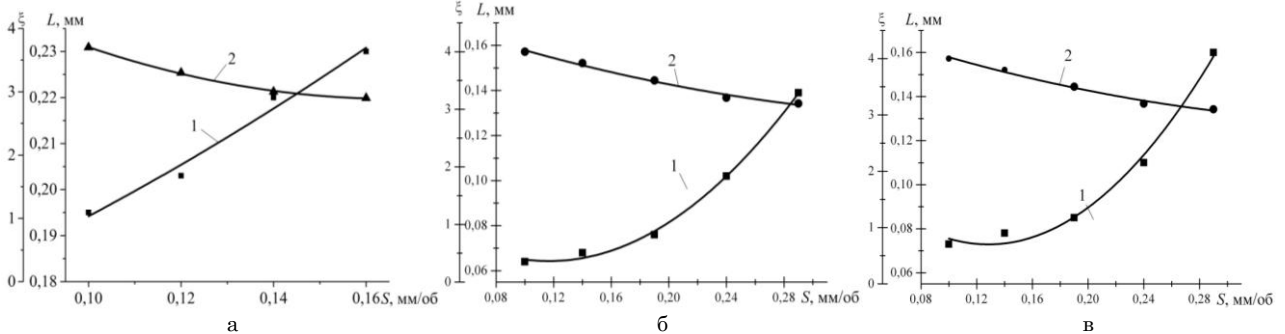


Рисунок 2 – Зависимость длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента (1) и коэффициента усадки стружки (2) от подачи при точении инструментом из ПСТМ на основе cBN:
 (а, б – $v = 100$ м/мин; в – $v = 200$ м/мин): а – группы BH; б, в – группы BL

Таблица 1 – Коэффициент усадки стружки, длина контакта стружки с передней поверхностью и активная длина режущей кромки инструментов

ПСТМ	v , м/мин	S , мм/об	t , мм	ζ	L , мм	b , мм
ВН	100	0,10	0,2	3,7	0,195	1,25
		0,12		3,3	0,203	1,31
		0,14		3,0	0,214	1,32
		0,16		2,9	0,230	1,35
ВЛ	100	0,10	0,2	4,0	0,073	1,45
		0,14		3,8	0,078	1,47
		0,19		3,5	0,085	1,50
		0,24		3,2	0,110	1,57
		0,29		3,1	0,160	1,65
	200	0,10		3,5	0,064	1,44
		0,14		2,9	0,068	1,50
		0,19		2,6	0,076	1,53
		0,24		2,1	0,102	1,56
		0,29		1,9	0,139	1,70

Для определения напряженного состояния инструмента в зоне контакта со стружкой использован метод определения средних значений касательных (q_F) и нормальных (q_N) напряжений по экспериментально определенным составляющим силы резания и длине контакта стружки с передней поверхностью (L). Напряжения рассчитывались по зависимостям

$$q_F = \frac{F}{b \cdot L} \text{ и } q_N = \frac{N}{b \cdot L}, \quad (4)$$

где N , F – нормальная сила N и сила трения F , действующие на передней поверхности инструмента соответственно.

Многочисленные исследования показали, что нормальные и касательные напряжения распределяются вдоль контакта стружки с передней поверхностью неравномерно. Нормальные напряжения у режущей кромки достигают максимума, а в точке отрыва стружки от резца они равны нулю. Касательные напряжения, наоборот, имеют более равномерное распределение у режущей кромки и в середине контакта остаются относительно постоянными, а в точке отрыва стружки они снижаются к нулю.

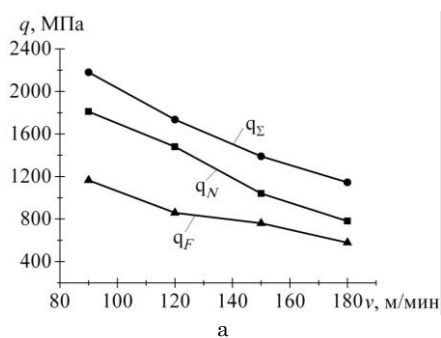


Рисунок 3 – Зависимость максимальных нормальных (q_N), касательных (q_F) и эквивалентных ($q_{\Sigma} = \sqrt{q_N^2 + q_F^2}$) контактных напряжений от скорости резания при точении

($S = 0,14$ мм/об; $t = 0,2$ мм) инструментами из композитов cBN-Si₃N₄ (3–5 об. %) (а) и cBN-Si₃N₄ (3–5 об. %)-TiC (45 об. %) (б)

Экспериментальные значения главных составляющих силы резания для исследуемых типов инструментов в зависимости от скорости резания и подачи представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Экспериментальные значения составляющих силы резания

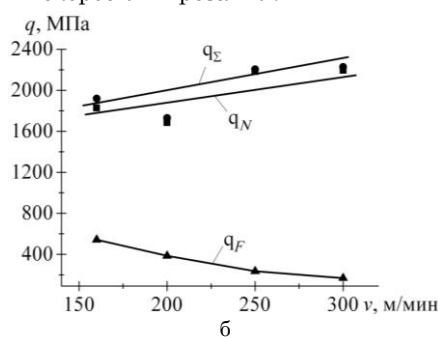
ПСТМ	v , м/мин	S , мм/об	t , мм	P_y , Н	P_z , Н
ВН	90	0,14	0,2	205	105
	120			148	85
	150			120	72
	180			102	65
ВЛ	160	0,10	0,2	100	90
	200			120	80
	250			100	100
	300			120	100

Зная размер пятна контакта и значение главных составляющих силы резания можно определить уровень напряжений, действующих на передней поверхности режущего инструмента. Результаты расчетов приведены на рис. 3.

Расчеты показали (рис. 3 а), что в случае использования инструментов с ПСТМ группы *ВН*, величина максимальных нормальных напряжений в диапазоне скоростей 90–180 м/мин монотонно снижается и находится в пределах 1,80–0,75 ГПа, что объясняется более интенсивным снижением нормальной составляющей силы резания по сравнению с уменьшением длины контакта передней поверхности инструмента со стружкой.

Тангенциальная составляющая контактных напряжений монотонно снижается при увеличении скорости резания, что связано с ростом температуры резания и составляет от 1,2 до 0,5 ГПа в зависимости от скорости обработки.

Анализ результатов расчетов, проведенных для инструментов с низким содержанием cBN (рис. 3 б) показывает, что уровень эквивалентных (q_{Σ}) и нормальных (q_N) напряжений монотонно возрастает с увеличением скорости резания и имеет в среднем на 30 % большие значения напряжений по сравнению с напряжениями, имеющими место при работе инструментом, оснащенным композитом cBN-Si₃N₄ (3–5 об. %). При этом следует отметить, что инструменты группы *ВЛ* работают со значительно большими скоростями резания.



Отмеченный эффект связан с тем, что при работе инструмента с низким содержанием сBN с увеличением скорости резания длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента интенсивно уменьшается при относительно высоком значении нормальной составляющей силы резания, в результате чего нормальные напряжения увеличиваются и достигают среднего значения 2,0 ГПа.

Что касается касательных напряжений, которые в нашем случае находились в диапазоне от 0,52 до 0,13 ГПа в зависимости от скорости обработки, то они имеют в среднем в 2,0–2,5 раза меньшие значения в сравнении с инструментами группы ВН, что объясняется более высокой температурой резания (1 200–1 300 °С), характерной для скорости резания 200–300 м/мин, в результате чего в зоне резания обрабатываемый материал размягчается, что приводит к значительному снижению уровня касательных напряжений.

Для установления закона распределения нормальных и касательных напряжений вдоль зоны контакта стружки с передней поверхностью инструмента используются различные экспериментальные методы. Нужно отметить, что с их помощью удается получить достоверные значения распределения напряжений только на расстоянии 0,15–0,20 мм от вершины резца [9]. При этом считается, что нормальные контактные напряжения имеют наибольшую величину у вершины лезвия инструмента, монотонно снижаясь до нуля по мере удаления от нее.

Что касается характера распределения касательных контактных напряжений, то их принято считать практически постоянными на участке пластического контакта, а на участке упругого контакта касательные напряжения плавно снижаются до нуля.

Зная размер участков контакта и уровень контактных напряжений, можно построить эпюры распределения нормальных и касательных контактных напряжений на передней поверхности инструмента (рис. 4).

Анализ эпюр распределения напряжений по длине контакта стружки с передней поверхностью инструментов из ПСТМ группы ВЛ показывает, что нормальные напряжения достигают 3,0 ГПа (рис. 4 в), для инструментов из композита группы ВН – 2,1 ГПа (рис. 4 а). Увеличение уровня нормальных напряжений при работе инструментами с низким содержанием сBN объясняется тем, что при высоких скоростях резания происходит интенсивное уменьшение длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента, при этом составляющие силы резания почти не меняются и находятся в диапазоне значений 100–120 Н, в результате чего нормальные напряжения возрастают.

Что касается касательных напряжений, то их уровень для инструментов из композита группы ВЛ имеет меньшие значения – 0,18 ГПа (рис. 4 г) по сравнению с инструментами из ПСТМ группы ВН – 0,58 ГПа (рис. 4 б). Такой характер изменения касательных напряжений на контактном участке передней поверхности инструмента, оснащенного композитом с низким содержанием сBN, связан с двумя причинами. В связи с пониженным содержанием сBN композит группы ВЛ обладает меньшей теплопроводностью в сравнении с ПСТМ с высоким содержанием сBN, что обуславливает более интенсивный отвод тепла в стружку. В совокупности с высокой температурой резания в контактной зоне, отвечающей используемому диапазону скоростей резания, это способствует снижению механических свойств обрабатываемого материала в тонком приконтактном слое стружки, изменению условий трения в контактной зоне, вследствие чего снижаются касательные контактные напряжения.

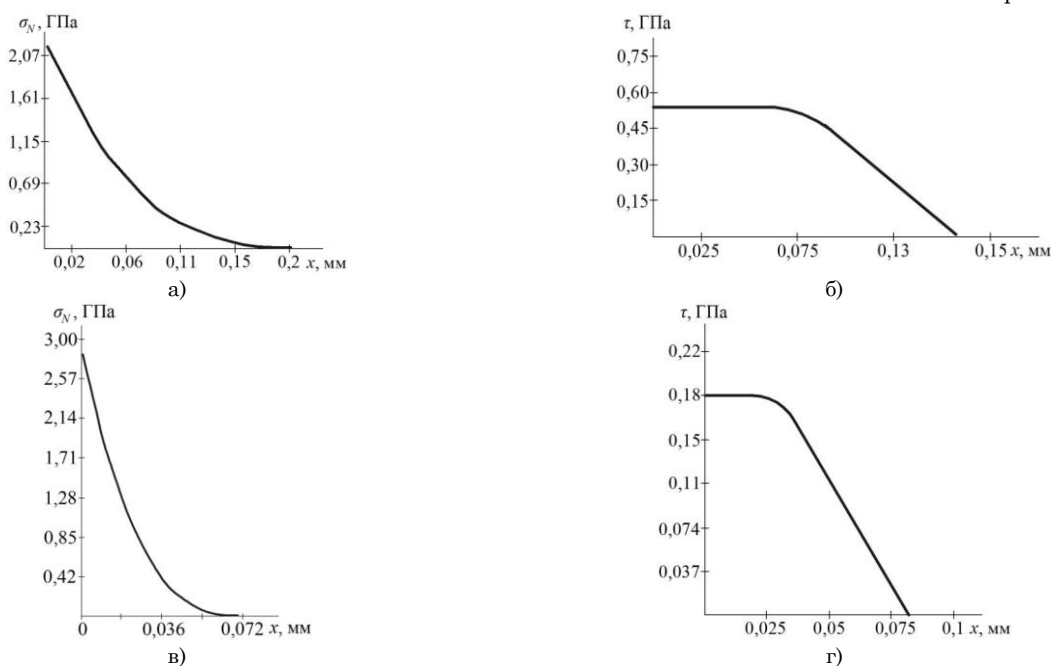


Рисунок 4 – Распределение нормальных (а, в) и касательных (б, г) напряжений вдоль контактного участка передней поверхности инструментов из ПСТМ на основе сBN: а, б – группы ВН ($v = 100$ м/мин; $S = 0,12$ мм/об; $t = 0,2$ мм); в, г – группы ВЛ ($v = 200$ м/мин; $S = 0,10$ мм/об; $t = 0,2$ мм)

3. ВИВОДИ

Проведенні експериментальні дослідження з використанням інструментів із композитів $\text{cBN-Si}_3\text{N}_4$ (3–5 % об.) і cBN-TiC (45 % об.)- Si_3N_4 (3–5 % об.), з застосуванням інформаційного покриття, дозволили кількісно оцінити розміри пляма контакту стружки з передньої поверхнею інструментів, визначити коефіцієнти усадки стружки в залежності від режимів різання.

З використанням експериментально встановлених значень складових сил різання виконано теоретичний розрахунок рівня максимальних нормальних і касательних контактних напружень для інструментів із ПСТМ на основі cBN і показано характер їх

розподілення вздовж участка контакту на передній поверхні інструмента.

Аналіз епюр розподілення нормальних і касательних напружень вздовж контактних участків на передніх поверхнях для інструментів із композитів на основі cBN груп ВН і ВЛ показав, що при точенні інструментами із ПСТМ з низьким вмістом cBN в зоні контакту виникають нормальні напруження до 3,0 ГПа і касательні – 0,18 ГПа, при точенні інструментом із композита з високим вмістом cBN – 2,1 і 0,58 ГПа відповідно. Збільшення нормальних напружень пов'язано з зменшенням довжини контакту стружки, а касательні напруження мають менші значення в зв'язі з збільшенням температури різання.

Contact stresses on the rake face of cutting tools with PCBN in turning of hardened steel

S. A. Klimenko¹, S. An. Klimenko¹, A. S. Manokhin¹,
Yu. A. Mel'nychuk¹, M. Yu. Kopieikina¹, A. A. Chumak¹

¹ V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine,
2 Avtozavodskaya St., 04074, Kyiv, Ukraine

The paper presents the results of experimental study of determination of the geometric parameters of the contact zone of the chips with the rake face of cutting tools, as well as the shrinkage of chips during the final turning of hardened HVG steel by the tools from polycrystalline superhard materials with different contents of cubic boron nitride. Based on the experimentally established values of the cutting force components, a theoretical calculation of the level of maximum normal and tangential contact stresses for two types of tools: with high (BH) and low (BL) boron content has been conducted, and the nature of their distribution along the contact area of the chips with the rake face of the tools is shown. It is shown that during the turning of hardened HVG steel by the tool with composite of the BL group normal stresses up to 3.0 GPa arise in the contact zone and the tangential are 0.18 GPa at a cutting speed of 200 m/min, while turning by the tool with composite of group BH – 2.1 GPa and 0.58 GPa, respectively, at a cutting speed of 100 m/min.

Keywords: cutting tool, polycrystalline superhard composite, cubic boron nitride, chip shrinkage, contact stresses, turning, hardened steel.

Контактні напруження на передній поверхні інструментів, оснащених композитами на основі кубічного нітриду бору, при точінні загартованої сталі

S. A. Клименко¹, С. Ан. Клименко¹, А. С. Манохін¹,
І. Г. Мельничук¹, М. Ю. Копейкіна¹, А. А. Чумак¹

¹ Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України,
вул. Автозаводська, 2, 04074, м. Київ, Україна

У статті наведені результати експериментальних досліджень щодо визначення геометричних параметрів зони контакту стружки з передньою поверхнею інструментів, а також усадки стружки при чистовому точінні загартованої сталі ХВГ інструментами, оснащеними композитами з полікристалічних надтвердих матеріалів $\text{cBN-Si}_3\text{N}_4$ (3–5 % об.) і $\text{cBN-Si}_3\text{N}_4$ (3–5 % об.)- TiC (45 % об.) з різним вмістом кубічного нітриду бору. На підставі експериментально встановлених значень складових сил різання виконаний теоретичний розрахунок рівня максимальних нормальних і дотичних контактних напружень для двох типів інструментів: з високим (ВН) і низьким (ВЛ) вмістом кубічного нітриду бору, а також показаний характер їх розподілу вздовж ділянки контакту стружки з передньою поверхнею інструментів. Установлено, що під час точіння загартованої сталі ХВГ інструментом з композитом групи ВЛ у зоні контакту виникають нормальні напруження до 3,0 ГПа і дотичні – 0,18 ГПа при швидкості різання 200 м/хв, під час точіння інструментом із композитом групи ВН – 2,1 ГПа і 0,58 Па відповідно при швидкості різання 100 м/хв.

Ключові слова: різальний інструмент, полікристалічний надтвердий композит, кубічний нітрид бору, усадки стружки, контактні напруження, точіння, загартована сталь.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н. В. Новикова, С. А. Клименко. – Москва : Машиностроение, 2014. – 608 с.
2. Новые инструментально-технологические разработки Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины / С. А. Клименко, В. И. Лавриненко, С. В. Сохань и др. // Оборудование и инструменты для профессионалов. – 2017. – № 1. – С. 48–51.
3. Зорев Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н. Н. Зорев. – Москва : Mashgiz, 1956. – 318 с.
4. Остафьев В. А. Расчет динамической прочности режущего инструмента / В. А. Остафьев. – Москва : Машиностроение, 1979. – 168 с.
5. Полетика М. Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента / М. Ф. Полетика. – Москва : Машиностроение, 1969. – 148 с.
6. Клименко С. Ан. Розподіл напружень на передній поверхні різального інструменту із ПНТМ на основі КНБ / С. Ан. Клименко, С. А. Клименко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2015. – Вип. 36. – С. 3–9.
7. Klimentko S. An. Study of the contact zone parameters and stresses on the rake face of a tool equipped by a cBN-based PSHM in turning hardened steel / S. An. Klimentko, A. S. Manokhin, S. A. Klimentko // Journal of Superhard Materials. – 2015. – Vol. 37, No. 2. – P. 125–131.
8. Розенберг Ю. А. Резание материалов / Ю. А. Розенберг. – Курган : Изд-во ОАО «Полиграфический комбинат «Заураль», 2007. – 294 с.
9. Кушнер В. С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластических материалов / В. С. Кушнер. – Иркутск : Изд-во Иркутского ун-та, 1982. – 180 с.

REFERENCES

1. Instrumenti iz sverhtverdih materialov; pod red. N. V. Novikova / S. A. Klimentko. – M. : Mashinostroenie, 2014. – 608 p. [in Russian].
2. Novie instrumentalno_tehnologicheskie razrabotki Institutu sverhtverdih materialov im. V. N. Bakulya NAN Ukrainy / S. A. Klimentko, V. I. Lavrinenko, S. V. Sohan et al. // Oborudovanie i instrumenti dlya professionalov_ – 2017. – № 1. – P. 48–51. [in Russian].
3. Zorev N. N. Voprosi mehaniki processa rezaniya metallov / N. N. Zorev. – Moscow : Mashgiz, 1956. – 318 p. [in Russian].
4. Ostafev V. A. Raschet dinamicheskoi prochnosti reju_shego instrumenta / V. A. Ostafev. – Moscow : Mashinostroenie, 1979. – 168 p. [in Russian].
5. Poletika M. F. Kontaktnye nagruzki na rezhushchikh poverhnostyakh instrumenta / M. F. Poletika. – Moscow : Mashinostroenie, 1969. – 148 p. [in Russian].
6. Klimentko S. An. Rozpodil naprujen na prednii poverhni rizalnogo instrumentu iz PNTM na osnovi KNB / S. An. Klimentko, S. A. Klimentko // Nadiinist instrumentu ta optimizaciya tehnologichnih sistem_ Zb. nauk. prac. – Kramatorsk : DDMA, 2015. – Issue 36. – P. 3–9. [in Ukrainian].
7. Klimentko S. An. Study of the contact zone parameters and stresses on the rake face of a tool equipped by a cBN-based PSHM in turning hardened steel / S. An. Klimentko, A. S. Manokhin, S. A. Klimentko // Journal of Superhard Materials. – 2015. – Vol. 37, No. 2. – P. 125–131.
8. Rozenberg Yu. A. Rezanie materialov / Yu. A. Rozenberg. – Kurgan : PJC “Poligraficheskii kombinat “Zauralye”, 2007. – 294 p. [in Russian].
9. Kushner V. S. Termomechanicheskaya teoriya processa neprerivnogo rezaniya plasticheskikh materialov / V. S. Kushner. – Irkutsk : Irkutsk University, 1982. – 180 p. [in Russian].