

**А.С. Манохін, к.т.н.**

**С.А. Клименко, д.т.н., проф.**

**М.Ю. Копейкіна, к.т.н., с.н.с.**

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля  
НАН України*

**В.В. Рошупкін, д.т.н., проф.**

**М.М. Ляховицький, к.т.н., с.н.с.**

**М.А. Покрасін, к.т.н., с.н.с.**

*Інститут металургії та матеріалознавства ім. О.О. Байкова РАН*

## **ВПЛИВ ШВИДКОСТІ РІЗАННЯ НА ПАРАМЕТРИ ТЕРМОБАРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ**

*Наведено результати дослідження впливу швидкості різання на температуру різання і розмір контактних напружень при точінні загартованої сталі ШХ15 інструментом, оснащеним ПНТМ на основі КНБ.*

*Ключові слова: контактне напруження, загартована сталь, полікристалічні надтверді матеріали.*

**Вступ. Постановка проблеми.** Термобаричне навантаження в зоні різання визначає працездатність інструменту, обмежує продуктивність обробки, справляє значний вплив на структурний стан та фазовий склад матеріалу як поверхневого шару виробів так й інструментального матеріалу [1, 2]. Визначення напруженості процесу різання від теплового та силового навантаження є необхідною умовою для розробки високоефективних технологій обробки, особливо при обробці матеріалів високої твердості, таких як загартованих сталей. Найбільш працездатним інструментом для такої обробки є інструмент, оснащений полікристалічними надтвердими матеріалами (ПНТМ) на основі кубічного нітриду бору (КНБ) [3].

Інтенсивність термобаричного навантаження на різальному інструменті в значній мірі обумовлена умовами, при яких реалізується обробка.

**Результати досліджень.** Для вимірювання температури в зоні обробки зазвичай використовують природну термопару, але зважаючи на низьку електропровідність використовуваних у роботі ПНТМ на основі КНБ виміряти електрорушійну силу, що виникає в ланцозі природної термопари КНБ – сталева заготовка, досить важко. Тому необхідно або застосовувати спеціальні коригувальні пристрої або, використовувати штучну термопару.

В [4] температура різання визначалася методом екстраполяції на вершину різця результатів вимірювання температури в точках на опорній поверхні різального інструменту, що істотно спрощує проведення досліджень, однак знижує точність отриманих результатів. Підвищити точність експериментально-розрахункового способу визначення температури різання можна шляхом застосування програмного забезпечення, що дозволяє вирішувати завдання теплофізики з використанням методу скінчених елементів [5, 6].

Дана методика дозволила отримати математичну модель, що описує залежність температури в контрольній точці інструменту від умов обробки. При різанні загартованої сталі ШХ15 (60–62 HRC) інструментом, оснащеним ПНТМ на основі КНБ, отримана така залежність температури в контрольній точці  $T_c$  від змінюваних факторів:

$$\begin{aligned} \dot{O}_n = & -4,79 + 89,1962L - 86,8571L^2 \\ & + 0,166\dot{O}_p + 0,2005L\dot{O}_p, \end{aligned}$$

де  $L$  – довжина контакту стружки з передньою поверхнею інструменту;  $T_p$  – температура різання.

Розв'язуючи рівняння відносно  $T_p$ , знаходимо середню температуру різання. Отримані результати наведені на рисунку 1.

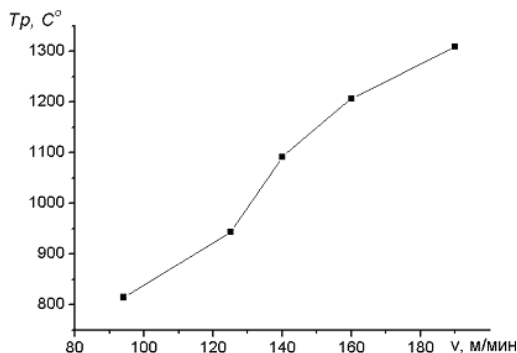


Рис. 1. Залежність температури різання від швидкості різання  
( $S = 0,12$  мм/об.;  $t = 0,2$  мм)

Зношування інструменту в процесі обробки також інтенсивно впливає на температуру різання. Аналіз експериментальних даних [7], які характеризують залежність температури різання загартованих вуглецевих сталей від величини фаски зносу на задній поверхні інструменту з ПНТМ на основі КНБ свідчать, що така залежність

відповідає виразу  $T = 618 \cdot h_3 + T_0$  ( $h_3 = 0,05-0,6$  мм), де  $T_0$  – температура різання при обробці гострозагостреним інструментом.

Зазначимо, що структурний стан контактних поверхонь різального інструменту безпосередньо пов'язаний з процесом їх зношування. Структурні та фазові складові поверхневих шарів інструменту, утворені внаслідок контактної взаємодії, що супроводжуються зношуванням, в свою чергу, справляють вплив на механічні та різальні властивості інструменту і, таким чином, визначають період його стійкості за даних умов обробки. Визначення параметрів термобаричного навантаження на різальний інструмент залежно від технологічних режимів надасть змогу встановити кореляційні зв'язки між експлуатаційними показниками (стійкістю, якістю обробки) інструменту за даних умов та структурним станом контактних поверхонь інструменту.

Величина нормальних та тангенціальних напружень на границі контакту інструмент-оброблюваний матеріал при обробці різанням має значний вплив на характер та інтенсивність зношування інструментів з полікристалів ПНТМ. З їх зростанням активізується абразивне зношування інструменту внаслідок занурення та мікрорізання поверхні інструменту твердими включеннями (в основному карбідами) зі складу оброблюваного матеріалу. Внаслідок збільшення нормальних напружень, відповідно до виразу  $\tau_a = \tau_0 + \beta \cdot p$ , підвищується міцність адгезійних зв'язків та зростає доля адгезійного механізму в процесі зношування. Відомо також, що механічна активація, в тому числі, за рахунок тангенціальних напружень на контактних ділянках, дозволяє реалізовуватися хімічним реакціям взаємодії, що характеризуються величиною вільної енергії Гіббса  $\Delta G_p < 0$ . Це, в свою чергу, призводить до швидкого зношування інструменту внаслідок реалізації механізмів хімічної взаємодії матеріалу інструменту з елементами, що входять до складу оброблюваного матеріалу та оточуючого середовища.

Враховуючи вказане, важливо визначити залежність величини контактних напружень від умов процесу обробки конструкційних матеріалів інструментами з ПНТМ на основі КНБ. Для цього було проведено серію експериментальних досліджень з вимірювання сили різання при обробці загартованої сталі ШХ15 залежно від швидкості різання.

Складові сили різання вимірювалися універсальним динамометром УДМ-600 конструкції "ВНДІінструмент". Дані вимірювань складових сили різання фіксувалися з використанням спеціально розробленого і виготовленого апаратно-програмного комплексу, що має модуль вимірювання, оснащений АЦП та оброблялися на персональному

комп'ютері. Це дало можливість проводити запис і обробку інформації за допомогою ЕОМ в режимі реального часу [8].

Графіки залежності складових сили різання від швидкості різання (глибина різання 0,2 мм, подача 0,12 мм/об) наведені на рисунку 2.

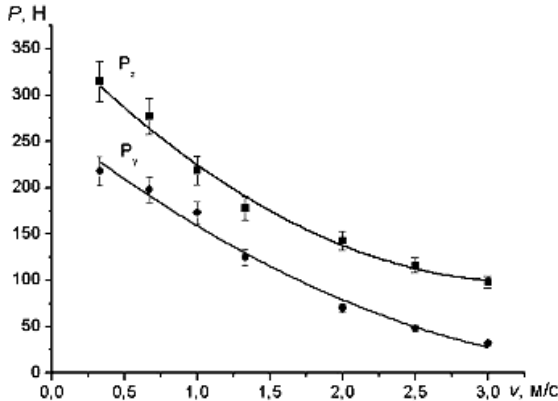


Рис. 2. Залежність складових сили різання від швидкості різання

Розрахунок напружень здійснимо за такою методикою.

У роботах [9, 10] показано, що середня питома сила тертя  $q_F$  при різанні металів є інваріантом і для широкого спектра умов різання змінюється незначно. При цьому величина  $q_F$  визначається властивостями оброблюваного матеріалу та температурою різання:

$$q_{Fcc} = \left[ -k_T \cdot 10^{-3} \left( \varphi - 600^\circ \right) \right] S_B \quad [9],$$

де  $S_B$  – істинна напруга оброблюваного матеріалу в момент утворення шийки при розтягу зразка (для загартованої до 60 HRC сталі марки ШХ15  $S_B$  становить 1600 МПа [3]). Коефіцієнт  $k_T$ , у даному випадку, прийнятий 0,75, що краще відображає вплив високих температур на властивості матеріалу при обробці інструментом з ПНТМ на основі КНБ, та забезпечує збіжність розрахованих та експериментальних величин складових сили різання.

Нормальне напруження легко знайти з виразу:

$$P_y = N = q_N \cdot L \cdot b,$$

де

$$L = a_{sr} \cdot \xi^{0,1} \cdot \left( \xi \cdot \left( -\operatorname{tg}(\gamma g) + \frac{2}{\cos \varphi} \right) \right); \quad [11]$$

$\xi$  – усадка стружки, апроксимація експериментально отриманої залежності величини якої від швидкості різання при обробці ШХ15 (60–62 HRC) описується виразом:

$$o(v) = \begin{cases} 0,79 \cdot v^2 - 4,15 \cdot v + 6,4 & \text{їдè } v \leq 1,4 \text{ їñ;} \\ 11,69 \cdot e^{\frac{-v}{0,617}} + 3,48 \cdot e^{\frac{-v}{0,043}} + 0,92. & \end{cases}$$

Максимальні значення контактних напружень визначимо приймаючи до уваги епіюру їх розподїлу вздовж передньої поверхні інструменту:  $q_N = \frac{\sigma_{Ncp} \cdot L_1}{L \int_0^L \left(1 - \frac{x}{L}\right)^n dx}$ , де  $L_1$  – одинична довжина,  $n = 2,1$ ,

звідки  $q_N = 3,1 \cdot q_{Ncp}$ .

З урахуванням виду епюри розподїлу тангенціальних контактних напружень –  $q_F = \frac{4}{3} \cdot q_{Fcc}$ . При перевірці відповідності розрахованих величин складових сили різання експериментальним значенням, до уваги приймалися складові сили різання на задній поверхні інструменту, розраховані методом екстраполяції на нульову товщину зрізу. Так, при швидкості 2,0 м/с, вони становлять  $P_{z3} = 1,2$  Н та  $P_{y3} = 71,3$  Н на одиницю довжини активної ділянки різальної кромки.

Графіки залежності максимальних контактних напружень та температури від швидкості різання наведено на рисунку 3.

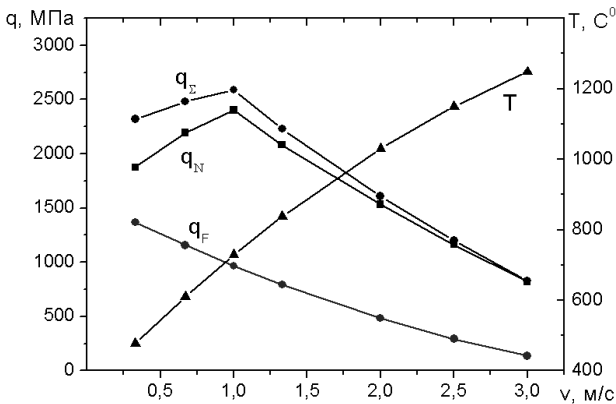


Рис. 3. Залежність величини максимальних нормальних ( $q_N$ ), дотичних ( $q_F$ ), еквівалентних ( $q_\Sigma = \sqrt{q_N^2 + q_F^2}$ ) контактних напружень та температури різання від швидкості різання

Як свідчать результати розрахунків, зі зростанням швидкості різання до величини 3,0 м/с, температура різання досягає значення 1250 °С. Залежність нормальної складової максимальних контактних напружень від швидкості різання має екстремальний характер з максимумом 2400 МПа при  $v = 1$  м/с. При великих швидкостях різання (до 3 м/с) нормальні напруження знижуються до 800 МПа. Наявність екстремуму пояснюється інтенсивним впливом зростання температури і зменшенням усадки стружки та довжини контакту оброблюваного матеріалу з передньою поверхнею інструменту в діапазоні швидкостей до  $v = 1$  м/с. Як наслідок, площа контакту в даних умовах зменшується більш інтенсивно, порівняно з нормальною складовою сили різання на передній поверхні різця, що і обумовлює зростання величини  $q_N$ . Тангенціальна складова контактних напружень монотонно знижується при збільшенні швидкості різання від 0,33 до 3,0 м/с та становить, при вказаних швидкостях, 1370 і 140 ГПа відповідно.

**Висновок.** Аналіз отриманих результатів дає можливість оцінити верхню границю величини термобаричного навантаження на різальний інструмент, оснащений ПНТМ на основі КНБ, в широкому діапазоні зміни швидкості різання при обробці загартованої сталі ШХ15. В свою чергу, це дозволяє створити висновок щодо механізму зношування полікристалічного інструменту, характерному для конкретного діапазону контактних тисків та температур.

### Список використаної літератури:

1. Трент Е.М. Резание металлов : пер. с англ. / Е.М. Трент. – М. : Машиностроение, 1980. – 263 с.
2. Яцерицын П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П.И. Яцерицын, М.Л. Ермоленко, Е.Э. Фельдштейн. – Мн. : Вышэйшая школа, 1990. – 512 с.
3. Сверхтвердые материалы. Получение и применение : в 6 т. / под общ. ред. Н.В. Новикова. – К. : ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – Т. 5 : Обработка материалов лезвийным инструментом / С.А. Клименко, А.А. Виноградов, Ю.А. Муковоз и др. – 2006. – 316 с.

4. Точение износостойких защитных покрытий / С.А. Клименко, Ю.А. Муковоз, Л.Г. Полонский, П.П. Мельничук. – К. : Техніка, 1997. – 144 с.
5. Манохин А.С. Температура резания при безвершинном точении закаленных сталей / А.С. Манохин // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Житомир : ЖДТУ, 2009. – Вип. 6. – С. 101–111.
6. Манохин А.С. Методика определения температуры резания при обработке инструментом с ПКНБ / А.С. Манохин, С.А. Клименко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. – Вып. 3 (63). Новые технологии в машиностроении. – Харьков : ХАИ, 2010. – С. 92–98.
7. Экспериментальное определение температурного поля реза из эльбора-Р / В.В. Коломиец, В.П. Зубарь, В.В. Голик и др. // Синтетич. алмазы. – 1977. – № 1. – С. 28–30.
8. Система для измерения параметров процесса резания / С.А. Клименко, Ю.А. Мельничук, А.С. Манохин, М.Ю. Копейкина // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика : мат. 7-й Междунар. науч.-практ. конф. (25–27 сент. 2007 г., г. Ялта. – К. : АТМ України, 2007. – С. 49–50.
9. Кушнер В.С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластичных материалов / В.С. Кушнер. – Иркутск : Изд-во Ирк. ун-та, 1982. – 180 с.
10. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента / М.Ф. Полетика. – М. : Машиностроение, 1969. – 150 с.
11. Розенберг Ю. А. Резание материалов / Ю.А. Розенберг. – Курган, 2007. – 292 с.

*Робота виконана за підтримки ДФФД України і РФФД  
(гранти Ф53.7/051, 13-08-90429)*

МАНОХІН Андрій Сергійович – кандидат технічних наук, науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- наукові основи процесу різання;
- різальні інструменти з надтвердих матеріалів.

КЛИМЕНКО Сергій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, заступник директора з наукової роботи Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- наукові основи процесу різання;
- різальні інструменти з надтвердих матеріалів.

Тел.: (044)430–85–00.

E-mail: [atmu@ism.kiev.ua](mailto:atmu@ism.kiev.ua)

КОПЄЙКІНА Марина Юріївна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України

Наукові інтереси:

- наукові основи процесу різання;
- різальні інструменти з надтвердих матеріалів.

РОЩУПКІН Володимир Володимирович – доктор технічних наук, професор, завідувач лабораторією Інституту металургії та матеріалознавства ім. О.О. Байкова РАН.

Наукові інтереси:

- матеріалознавство металів і сплавів;
- теплофізичні властивості матеріалів.

ЛЯХОВИЦЬКИЙ Марк Матвійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту металургії та матеріалознавства ім. О.О. Байкова РАН.

Наукові інтереси:

- матеріалознавство металів і сплавів;
- теплофізичні властивості матеріалів.

ПОКРАСІН Михайло Олексійович – кандидат фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник Інституту металургії та матеріалознавства ім. О.О. Байкова РАН.

Наукові інтереси:

- матеріалознавство металів і сплавів;
- теплофізичні властивості матеріалів.

Стаття надійшла до редакції 22.08.2013



**Манохін А.С., Клименко С.А., Копейкіна М.Ю., Рощупкін В.В., Ляховицький М.М., Покрасін М.А.** Вплив швидкості різання на параметри термобаричного навантаження різального інструменту  
**Манохин А.С. Клименко С.А., Копейкина М.Ю., Рощупкин В.В., Ляховицкий М.М., Покрасин М.А.** Влияние скорости резания на параметри термобарической нагрузки режущего инструмента  
**Манохін А.С., Клименко С.А., Копейкіна М.Ю., Рощупкін В.В., Ляховицький М.М., Покрасін М.А.** Вплив швидкості різання на параметри термобаричного навантаження різального інструменту

УДК 621.91

**Влияние скорости резания на параметри термобарической нагрузки режущего инструмента / А.С. Манохин, С.А. Клименко, М.Ю. Копейкина, В.В. Рощупкин, М.М. Ляховицкий, М.А. Покрасин**

Приведены результаты исследования влияния скорости резания на температуру резания и величину контактных напряжений при точении закаленной стали ШХ15 инструментом, оснащенный ПСТМ на основе КНБ.

УДК 621.91

**Влияние скорости резания на параметри термобарической нагрузки режущего инструмента / А.С. Манохин, С.А. Клименко, М.Ю. Копейкина, В.В. Рощупкин, М.М. Ляховицкий, М.А. Покрасин**

Results of research of influence of conditions of processing on temperature of cutting and size of contact tension are given when turning the tempered ShH15 steel by the tool equipped with PSTM on the basis of cBN.