

Я.П. Коваленко, аспірант  
П.П. Мельничук, д.т.н., проф.

Державний університет «Житомирська політехніка»

## Практика використання різального інструменту з ПКНБ групи VL при обробці загартованих сталей

*У промисловості все більш використовуються технологічні можливості металообробки з використанням інструментів з надтвердих матеріалів, зокрема полікристалічного кубічного нітриду бору (ПКНБ) групи VL. Це пов'язано з потребою підвищення продуктивності за рахунок збільшення режимів різання при обробці загартованих сталей з використанням та без використання мастильно-охолоджувальних рідин, що робить такий процес «сухим» та екологічно чистим. На основі аналізу властивостей надтвердого матеріалу ПКНБ групи VL в статті розглянуто силові характеристики процесів різання. Встановлено переваги використання інструментів на основі ПКНБ, саме групи VL із низьким вмістом бору. Розглянуто термобаричні та трибологічні особливості поведінки інструментів при обробці загартованих сталей.*

*Проаналізовано температурний вплив на швидкість різання при високошвидкісній обробці загартованих сталей. Зазначено результати аналітичних досліджень по визначенню геометричних параметрів зони контакту сходу стружки з передньої поверхні інструмента при обробці, описано методику досліджень контактних процесів.*

**Ключові слова:** полікристалічний кубічний нітрид бору; режими різання; загартована сталь; високошвидкісна обробка.

**Актуальність теми.** Висока конкурентоспроможність на сучасному ринку промислового виробництва вимагає у фахівців створення більш довершених сучасних інструментальних матеріалів для механічної обробки. Тому на сьогоднішній день для вдосконалення технології обробки доцільно застосовувати нові різальні інструменти, основою яких є високоефективні інструментальні композити. Найпоширеніші у використанні – це надтверді матеріали на основі кубічного нітриду бору (КНБ). А в оброблюваній промисловості матеріали на основі нітриду бору більш відомі як полікристалічний кубічний нітрид бору різних груп, частіше групи VL. Його переваги для лезового інструменту із ПКНБ групи VL характеризуються довговічністю, міцністю, працездатністю. Також важливим показником є вибір інструментального матеріалу, який може витримувати навантаження, що виникають при різних процесах. Нові конструкційні сталі, які підлягають загартовуванню, застосовують для досягнення високого ресурсу роботи. Їх з'єднання потребує нових термобаричних та трибологічних досліджень інструментів із ПКНБ групи VL задля отримання високої якості поверхні.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори.** В низці відомих наукових публікацій, зокрема, в роботах С.А. Клименко [1, 5, 11, 12], надано результати досліджень роботи з надтвердими матеріалами при чистовому точінні загартованої сталі ХВГ та визначення геометричних параметрів зони контакту стружки з передньою поверхню інструмента. В роботі [4, с. 1–6] О.В. Сушко висвітлено проблеми впливу температурних характеристик та сил, що виникають під час різання, які впливають на поверхню інструментів із ПКНБ групи VL. Також акцентується увага на дослідженнях контактних процесів. Автор [4, с. 1–3] описує аналіз сил, що діють на передню і задню поверхні інструмента з кубічного нітриду бору при обробці загартованих сталей. Аналіз показав, що питомі навантаження на задній поверхні більші, ніж на передній, і що питома робота стружкоутворення при малій товщині зрізу менша за роботу тертя на задній поверхні інструмента, що є однією з особливостей процесу різання. Отримані результати цих досліджень показали, що температура в зоні різання досягає 1000–1100 °С, що значно вище, ніж при лезовій обробці.

Автори [12] оцінюють значення контактних навантажень на різальних інструментах з ПКНБ групи VL, де відображаються середні нормальні та дотичні контактні напруги при обробці сталей високої твердості та досягають значень до 2500 і 1100 МПа відповідно. В роботі показано, що зниження величин буде під час навантажень, якщо конструкція покриття буде включати верхній шар, що виконує функції припрацювання. Основною вимогою до такого прошарку є поєднання пластичності і міцності, при тому, що твердість його може бути істотно нижче, ніж твердість основного масиву матеріалу покриття. В роботах дослідників розроблено різні концепції підвищення стійкості різальних інструментів з ПКНБ, які базуються на зменшенні температури в контактній зоні різання при нанесенні на робочі поверхні інструмента покриття, що зменшує коефіцієнт тертя. Поміж таких покриттів розглядається плівка з VN. Основною відмінністю цього покриття є його аморфно-кристалічний структурний стан і близькість за хімічним складом до матеріалу основи.

Проблеми розглянуті не повною мірою, і залишається багато питань щодо керування процесом різання заради його ефективності з огляду оптимізації трибологічних і термобаричних процесів при обробці загартованих сталей.

**Метою статті** є поглиблений аналіз трибологічних та термобаричних особливостей при обробці загартованих сталей надтвердими матеріалами – полікристалічним кубічним нітридом бору групи VL, його фізико-механічних властивостей та впливу високошвидкісної обробки на температурні характеристики.

**Викладення основного матеріалу.** Проблеми, що виникають при обробці матеріалів, такі як: зношування інструментів, покращення показників якості та точності обробки, зменшення собівартості виготовлення продукції стають все більш актуальними та потребують детального розгляду й пошуку вирішення проблем. На сьогоднішній день для вдосконалення технології обробки доцільно застосовувати нові різальні інструменти, основою яких є високоефективні інструментальні композити.

В оброблюваній промисловості матеріали на основі нітриду бору більш відомі як полікристалічний кубічний нітрид бору (ПКНБ) групи VL. Одержують такі матеріали в умовах високого тиску за підвищених температур. Прикладання високого тиску зумовлено переходом надтвердого КНБ в його гексагональну модифікацію [1, с. 608].

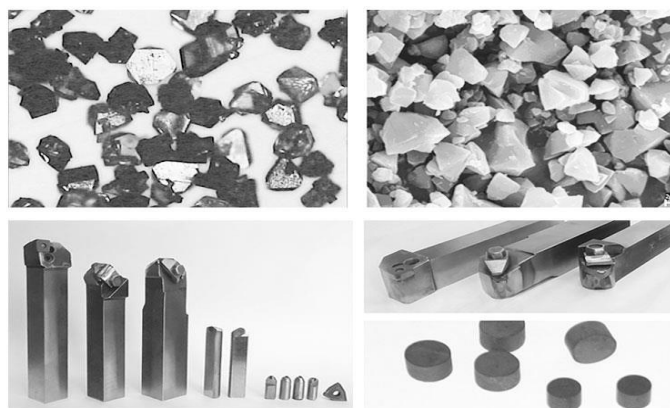


Рис. 1. Технічний вигляд кубічного нітриду бору

Перші відомості про сполуку кубічної модифікації нітриду бору оприлюднили у 1957 році. А вперше КНБ як матеріал з'явився у 1960 році завдяки академіку Л.Ф. Верещагіну в Інституті фізики високих енергій. З'ясувалося, що такий матеріал поступається своєю твердістю лише алмазу через невелику розбіжність в параметрах решітки, хоча кількість атомів бору та азоту збігається. Разом з тим, при визначенні параметрів теплостійкості алмаз згорає за температури 700–900 °С, а КНБ – за температури 1300–1500 °С. Технічний вигляд КНБ зображено на рисунку 1 [2, с. 91–95].

При аналізі умов експлуатації, де мають місце висока температура та напруга, для забезпечення продуктивної та якісної обробки ПКНБ групи VL матеріали повинні відповідати таким вимогам, як:

- високі механічні характеристики (міцність, твердість, ударна в'язкість, тріщиностійкість);
- висока зносостійкість (здатність інструментального матеріалу давати опір стираючій дії оброблюваного матеріалу);
- висока теплостійкість (здатність матеріалу зберігати твердість при нагріві) та достатня теплопровідність;
- бути достатньо технологічним та відносно економічно дешевим;
- бути хімічно інертним до оброблюваного матеріалу;
- мати певний коефіцієнт тертя, що залежить від хімічного складу та оброблюваного матеріалу [3, с. 33–37].

Автор [4, с. 1–6] описує процес різання при фрезеруванні інструментом на основі надтвердих модифікацій КНБ, де істотно відрізняється від процесу різання діамантовим інструментом, що зумовлюється його особливими фізико-механічними властивостями. Надтверді матеріали з ПКНБ групи VL характеризуються високою термостійкістю, яка досягає 1500 °С, високим опором термічним ударам і циклічним навантаженням. Різання загартованих сталей лезовим інструментом з нітриду бору супроводжується нижчим рівнем сил різання порівняно з обробкою традиційним інструментом. На рисунку 2 наведено залежності складових сили різання від швидкості при точінні загартованих сталей різцями з нітриду бору.

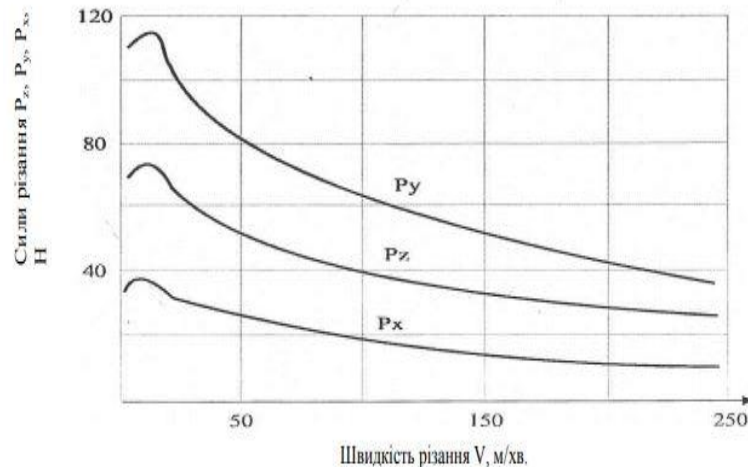


Рис. 2. Вплив швидкості на сили різання при точінні  
(умови: подача  $S = 0,05$  мм/об; глибина  $t = 0,1$  мм; різці – ельбор-Р) [4]

Усі три сили  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  змінюються по одному закону. Зі збільшенням швидкості різання вони швидко ростуть, досягаючи максимуму, і далі знижуються. Зі зростанням швидкості різання інтенсивність зменшення сил різання знижується. Це пояснюється контактними процесами в зоні різання. У межі низьких значень зростання швидкості збільшують температуру різання і, отже, адгезійну взаємодію оброблюваного матеріалу з інструментом. При цьому коефіцієнт тертя в контакті росте, ростуть і сили різання.

Подальше зростання швидкості різання продовжує збільшувати температуру в контакті інструмент – оброблюваний матеріал до значень, за яких падає міцність адгезійних зв'язків через розм'якшення металу. Коефіцієнт тертя при цьому знижується, знижуються й сили різання. Таким чином, зниження сил викликається розігріванням зони різання до  $1000\text{--}1100$  °С. При цьому радіальна складова  $P_y$  практично завжди більша за головну складову – тангенціальну  $P_z$ , тобто традиційне співвідношення між складовими силами різання порушується. Це пояснюється великими силами, що діють з боку задньої поверхні. Дослідження сил, що діють на передню і задню поверхні різців з нітриду бору під час точіння загартованих сталей, показали, що питомі навантаження на задній поверхні більші, ніж на передній, і що питома робота стружкоутворення за малої товщини зрізу менша за роботу тертя на задній поверхні інструменту, що є однією з особливостей процесу різання.

Як показують дослідження, силові характеристики є важливим показником під час розрахунку напружень на поверхні інструмента та сил різання. При розрахунках величини та напрямлень сил стружкоутворення виявлено [5, с. 51–53], що можна розрахувати параметри за будь-яких умов різання, якщо відомі усадка стружки та опір здвигу оброблюваного матеріалу або деякі інші спеціальні характеристики. Найбільш поширена формула для розрахунку сили стружкоутворення по схемі з єдиною площиною здвигу має вигляд:

$$R = \frac{ab\tau_\phi}{[\sin\Phi \cos(\Phi+\omega)]} \quad (1)$$

Головна складова сили різання на основі виразу (1) визначається за формулою:

$$P_z = \frac{ab\tau_\phi \cos\omega}{[\sin\Phi \cos(\Phi+\omega)]} \quad (2)$$

Величини  $a$  і  $b$  зазвичай задаються, а характеристики стружкоутворення  $\Phi$ ,  $\tau_\phi$  і  $\omega$  є невідомими. Теоретичні формули, які запропонували різні автори, різняться методами визначення характеристик  $\tau_\phi$  і  $\omega$ .

Для визначення проєкції сили різання  $P_z$  за результатами випробування оброблюваного матеріалу на розтяг М.М. Зорев запропонував формулу:

$$P_z = A_{Rab}, \quad (3)$$

$$A_R = A[(\zeta - \sin\gamma)/\cos\gamma + \tan\vartheta], \quad (4)$$

де  $A_R$  – питома робота стружкоутворення;

$A$  – опір оброблюваного матеріалу здвигу при відносному здвигу, який дорівнює 2,5;

$\vartheta$  – кут між направленням додатка рівнодіючої сили та площини здвигу.

Величина  $\vartheta$  для поширених умов різання, за думкою М.М. Зорева, може вважатися константою оброблюваного матеріалу.

Також важливим фактором при процесах обробки є теплові характеристики. Одним із показників є висока теплопровідність – основна властивість надтвердих матеріалів, зокрема ПКНБ групи VL для

оснащення лезового інструменту, що обумовлює кращу якість оброблюваної поверхні деталей порівняно з інструментом з твердих сплавів.

Середню температуру на задній поверхні інструмента оцінювали як:

$$\theta_3 = 0,5 \cdot \theta_A \left( 1 + \frac{\sin \alpha^{0,25}}{\sqrt{P \cdot e \cdot E_p \cdot B^{1,25}}} + 1,72 \psi_N \right), \quad (5)$$

$$\text{де } \psi_N = \frac{0,6 \cdot n_1 \cdot B^{1,25} \sqrt{P \cdot e \cdot E_p} \cos \alpha}{\sin \alpha^{0,23} \cdot \text{erf} \sqrt{\frac{P \cdot e \cdot B}{4}}};$$

$$n_1 = \frac{1}{(1+b_1)};$$

$$b_1 = \frac{0,24 \cdot F \cdot D^{0,3} \sin \alpha^{0,1}}{\sqrt{P \cdot e \cdot E_p^{0,2} \cdot B^{0,1}}};$$

$$\theta_A = \frac{\theta_N}{\psi_N};$$

Максимальну температуру тертя на задній поверхні  $\theta_3$  інструмента знаходили з виразу:

$$\theta = 0,6 \cdot n_1 \sqrt{P \cdot e \cdot E_p} \frac{\tau_\Phi \cdot E^{0,25} \cos \alpha}{C_v \sin \alpha^{0,25}}, \quad (6)$$

де  $Pe = \frac{v \alpha}{\omega}$  – критерій Пекле;

$E_p$  – критерій, який враховує відношення радіуса округлення  $\rho$  різальної кромки до товщини зрізу  $a$ ;

$B = \tan \Phi$ ;

$F$  – критерій, який враховує вплив геометричних параметрів інструмента ( $\beta$  – кут загострення,  $\varepsilon$  – кут при вершині різця) та відношення теплопровідності інструментального та оброблюваного матеріалів;

$D$  – критерій, який характеризує відношення товщини до ширини зрізу.

Під час аналізу технічної літератури автор [6, с. 88] виконує розрахунок режимів різання та пояснює технологічні системи, схеми та конфігурації поверхні.

При фрезеруванні головна складова сили різання – окружна сила, яка вимірюється у ньютонках:

$$P_z = \frac{(10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot B^u \cdot z)}{(D^q \cdot n^w)} \cdot K_{mp}, \quad (7)$$

де  $z$  – число зубів фрези;

$n$  – частота обертів фрези, об/хв.

Значення коефіцієнта  $C_p$  та показників ступенів  $x$ ,  $y$ ,  $u$ ,  $q$ ,  $w$  для розрахунку сили різання беремо у таблицях значень показників окружної сили при фрезеруванні твердих матеріалів залежно від видів фрез.

Круглий момент на шпинделі вимірюється в Н·м та обчислюється за формулою:

$$M_{kp} = \frac{(P_z \cdot D)}{200}, \quad (8)$$

де  $D$  – діаметр фрези, мм.

При торцевому фрезеруванні для досягнення продуктивних режимів різання діаметр фрези  $D$  має бути більшим за ширину фрезерування  $B$ , саме  $D = (1,25 - 1,5)B$ .

Потужність різання визначається, кВт:

$$Ne = \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60}. \quad (9)$$

Також одним із параметрів є подача ( $S$ ). При фрезеруванні розрізняють подачу на один зуб  $S_2$ , подачу на один оберт фрези  $s$  та хвилину  $S_4$ , мм/хв, які можна співвідносити в такому розрахунку:

$$S = s \cdot n = S_z \cdot z \cdot n, \quad (10)$$

де  $n$  – частота обертів, об/хв;

$z$  – число зубів фрези;

Швидкість подачі – швидкість переміщення ріжучого інструменту (вісь  $x/y$ ):

$$S = f_z \cdot z \cdot n. \quad (11)$$

Подача на зуб береться із довідникових таблиць залежно від тих чи інших матеріалів. Для такого матеріалу, як ПКНБ залежно від діаметра фрези є проміжок від 0,005 мм до 0,04 мм.

Ширина фрезерування ( $B$ , мм) – величина оброблюваної поверхні, яка вимірюється за напрямленням, що перпендикулярне осі фрези. При підборі ширини важливо враховувати припуск на обробку. Як правило, декілька проходів застосовується при значенні припуску більше 5 мм. При останньому чорновому проході залишають приблизно 1 мм на чистову обробку. Ширина фрезерування визначається найменшою серед двох величин: ширина оброблюваної заготовки та довжина або діаметр фрези.

Миттєве значення колової сили на одному різальному елементі (за відсутності зносу) для стандартної геометрії можна визначити за формулою [7, с. 320]:

$$P_0 = 0,28 \cdot S_k [S_z \cdot \sin \theta \cdot t_p \cdot K_2 + 1_p \cdot \delta_0], \quad (12)$$

де  $S_k$  – напруга при розриві, тобто частка від розподілу сили в момент розриву на площу поперечного перетину зразка в місці розриву;

$S_z$  – подача на зуб, мм/зуб (при рівномірному кутовому розташуванні різальних елементів у радіальному напрямку);

$S_z = \frac{S_0}{z}$ ;  $S_0$  – подача на оберт;  $z$  – число різальних елементів фрези;

$\theta$  – кут, що визначає миттєве положення різального леза;

$t_p$  – глибина різання;

$K_2$  – безрозмірний комплекс, що залежить від усадки стружки;

У дослідженнях [8, с. 1–2] розглянуто проблеми обробки загартованих сталей різних марок. Як інструмент застосовували різці із гексаніту-Р, одного із видів ПКНБ, який має більш високу із всіх марок КНБ ударну стійкість. Твердість заготовок після загартування та у ході процесів роботи вимірювали за допомогою прибору Роквела ТК-2М та твердоміром марки EQUO TИP фірми PROCEG, який працює за методом Шора. Зовнішній вигляд зношених ділянок поверхні інструментів із ПКНБ спостерігали з допомогою електронного мікроскопа моделі Stereo-scan-150 при різних збільшеннях 300 та 3000.

Порівнювали стійкість інструмента, який працює в різних умовах, а саме з різними марками сталей, загартованих на різну твердість. [9, с. 136] Результати досліджень наведені на рисунку 3.

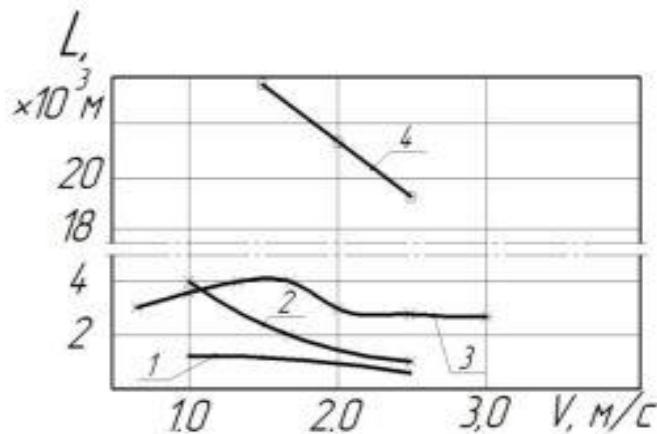


Рис. 3. Вплив швидкості на довжину шляху різання при фрезеруванні загартованих сталей різцями із ПКНБ групи BL ( $S = 0,075$  мм/об,  $t = 0,25$  мм: 1 – X12M (HRC 58-60); 2 – 9XC (HRC 55-58); 3 – 40ГМФР (HRC 47-49); 4 – 50Г (HRC 50-52)

Аналіз здобутої залежності показує, що на операції обробки у всіх випадках ріст швидкості різання призводить до зниження стійкості інструмента, але з різною інтенсивністю, що особливо чітко проявляється при обробці сталі 50Г (HRC 50-52). При обробці сталі 40ГМФР (HRC 47-49) та X12M (HRC 58-60) ріст швидкості різання у дослідному діапазоні слабше впливає на зміну стійкості різців із надтвердих матеріалів, зокрема ПКНБ групи BL [10, с. 23].

Варто зауважити, що стійкість КНБ при різанні сталі X12M та 9XC нижча, ніж при різанні сталей 40ГМФР і 50Г. Ці результати пояснюються тим, що у складі оброблюваного матеріалу є значна кількість хрому (до 1,25 % у сталі 9XC і до 12 % у сталі X12M). Вплив швидкості різання зменшується, коли відбувається ріст процентного складу цих елементів.

В інших експериментах порівнювали різання без мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) в зону різання та при поливі різним складом МОР – дистильованою водою, МОР із надлишком бору (розчин бури) та МОР із надлишком азоту. Вплив швидкості різання при обробці із гексаніту-Р сталі 50Г (HRC 50-52) зображено на рисунку 4 при параметрах  $S = 0,075$  мм/об,  $t = 0,3$  мм: 1 – без МОР; 2 – вода дистильована; 3 – розчин бури; 4 – розчин азоту.

Аналіз результатів досліджень показав, що МОР значно впливають на темп і характер зношування інструментів із ПКНБ групи BL. При обробці загартованих сталей позитивний вплив подачі МОР у зону різання полягає у зменшенні теплонапруженості процесу.

Можна допустити, що позитивний вплив надлишку компонентів інструментальних матеріалів (бор та азот) у складі МОР підтверджується збільшенням стійкості різців із КНБ у всьому швидкісному діапазоні, який досліджувався.

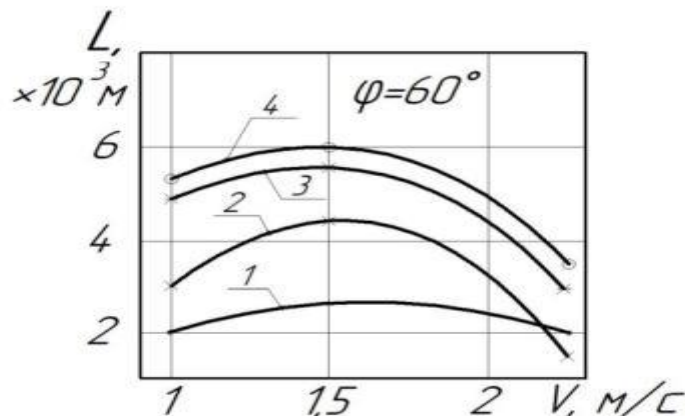


Рис. 4. Вплив швидкості на довжину шляху різання при обробці різцями із гексаніту-Р сталі 50Г (HRC 50-52) при параметрах

$S = 0,075$  мм/об,  $t = 0,3$  мм: 1 – без МОР; 2 – вода дистильована; 3 – розчин бури; 4 – розчин азоту

Таким чином, можна передбачити корегувальний вплив та управляти темпом зношування інструментів із ПКНБ групи ВЛ та продуктивністю операцій лезової обробки:  $V = 1,5$  м/с,  $S = 0,075$  мм/об,  $t = 0,25-0,5$  мм із застосуванням мастильно-охолоджувальних рідин.

У роботі [11, с. 1–2] надано результати експериментальних досліджень з визначення геометричних параметрів зони контакту стружки з передньою поверхнею інструментів, а також усадки стружки при чистовому точінні загартованої сталі інструментами, оснащеними ПКНБ, з різними групами по складу КНБ (з високим складом бору – ВН та низьким складом бору – ВЛ).

Експериментальні дослідження проводилися на токарно-гвинторізному верстаті ФТ-11 при чистовому точінні зразків із загартованої сталі ХВГ (60-62 HRC) інструментами з механічним кріпленням змінних пластин на основі ПКНБ групи ВН –  $cBN-Si_3N_4$  (3–5 % об.) і ВЛ –  $cBN-Si_3N_4$  (3–5 % об.) –  $TiC$  (45 % об.).

Аналіз результатів проведених досліджень показує, що для інструментів із композитів  $cBN-Si_3N_4$  (3–5 % об.) та  $cBN-Si_3N_4$  (3–5 % об.) –  $TiC$  (45 % об.) збільшення подачі призводить до збільшення довжини контакту стружки з передньою поверхнею інструмента, що обумовлено збільшенням товщини зрізу. При цьому коефіцієнт усадки стружки знижується внаслідок збільшення температури різання. При використанні інструментів групи ВЛ слід зазначити менші значення довжини контакту порівняно з інструментами із ПКНБ групи ВН, що пояснюється комплексною зміною параметрів процесу різання – збільшенням температури обробки та зміною умов тертя на контактних ділянках інструмента.

Автори [12, с. 1–4] розглядають покриття для різальних інструментів з ПКНБ, де обумовлюється здатність покриттів зберігати свою цілісність і властивості під дією високих температур та контактних напружень. Набув поширення спосіб створення нанокомпозитних покриттів типу  $nMeN/\alpha$ -фаза – вони формуються з нанозерен твердих нітридів перехідних металів з аморфної межкристалітної фазо-матрицею з  $TiB_2$ ,  $Si_3N_4$ ,  $BN$  та інших нітридів неметалів, що утворюють ковалентні зв'язки. Такі покриття мають незвичайну комбінацію механічних властивостей: – висока (40–100 ГПа) твердість; – високе (80–94 %) пружне відновлення; – граничні (> 10 %) пружні напруження; – висока (від 10 до більш ніж 40 ГПа) міцність на розтягнення, близька до ідеальної міцності для непластичних матеріалів. Крім того, наноструктура і відповідний їй надтвердий стан може залишатися стабільними за температур, які перевищують 1100°C. Розроблено концепцію підвищення стійкості різальних інструментів з ПКНБ, яка базується на зменшенні температури в контактній зоні різання при нанесенні на робочі поверхні інструменту покриття, що зменшує коефіцієнт тертя. Таким покриттям може бути плівка з  $BN$ . Основною відмінністю цього покриття є його аморфно-кристалічний структурний стан і близькість за хімічним складом до матеріалу основи.

Ефективність досягається за рахунок:

- зниження твердості порівняно з інструментальною основою, що зменшує внутрішні залишкові напруження в покритті і знижує крихкість його матеріалу;
- зменшення модуля Юнга, що підвищує пружні властивості покриття і стійкість до абразивного стирання;
- зниження коефіцієнта тертя, що сприяє зменшенню термобаричного навантаження на робочих ділянках інструмента. Випробування, проведені на машині тертя, показали зниження коефіцієнта тертя від 0,4 до 0,3 в діапазоні швидкостей відносного переміщення 75–90 м/хв.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Проведений аналіз свідчить, що при використанні надтвердого матеріалу ПКНБ групи ВЛ можна розв'язати ряд науково-технічних задач при обробці загартованих сталей при високошвидкісному різанні, що дозволить отримати високу точність та якість поверхні при високій продуктивності, економічності та мінімальному зношуванні інструментів.

Однак вивчення трибологічних та термобаричних характеристик інструментів, оснащених ПКНБ групи ВL, вивчені ще не достатньо повно для їх ефективного використання. Під час розгляду області застосування надтвердих матеріалів та перспектив розвитку їх розширеного використання у промисловості результати показують, що розв'язання задач при використанні ПКНБ групи ВL є важливими з наукової точки зору для подальшого перспективного та актуального розвитку промисловості.

#### Список використаної літератури:

1. Клименко С.А. Инструменты из сверхтвердых материалов / С.А. Клименко. – М. : Машиностроение, 2014. – С. 608.
2. Васильева Н.В. Применение режущих инструментов из синтетических сверхтвердых материалов для повышения экологичности и качества механической обработки / Н.В. Васильева. – Пермь : Зebra, 2015. – С. 91–95.
3. Новиков Н.В. Методика определения прочности и трещиностойкости поликристаллических сверхтвердых материалов / Н.В. Новиков, И.М. Андросов, А.Л. Майстренко // Сверхтвердые материалы. – 2002. – № 2. – С. 33–37.
4. Сушко О.В. Лезвийна обробка інструментами на основі надтвердих модифікацій нітриду бору / О.В. Сушко [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/1407/1/1184.pdf>.
5. Клименко А.С. Обработка материалов лезвием инструментом / А.С. Клименко. – Київ, 2006. – С. 51–53.
6. Баграмов Л.Г. Расчет режимов резания при фрезеровании / Л.Г. Баграмов, А.М. Колокатов. – 2000. – С. 88.
7. Розенберг А.М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг. – Наук. думка, 1990. – С. 320.
8. Гартфельдер В.А. Лезвийная обработка закаленных сталей инструментами из кубического нитрида бора / В.А. Гартфельдер, Л.С. Секлетина, А.Р. Янюшкин // Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. – 2020. – С. 1–2.
9. Башков В.М. Испытание режущего инструмента на стойкость / В.М. Башков, П.Г. Кацев. – М. : Машиностроение, 1985. – С. 136.
10. Гартфельдер В.А. Физико-технологические особенности процесса точения конструкционных материалов инструментами из СТМ : автореф. дис. ... к.т.н. / В.А. Гартфельдер. – Куйбышев, 1990. – С. 23.
11. Контактные напряжения на передней поверхности инструментов, оснащенных композитами на основе кубического нитрида бора, при точении закаленной стали / С.А. Клименко, С.Ан. Клименко, А.С. Манохин и др. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/66395/1/Klymenko\\_Klymenko\\_Manokhin\\_JES\\_2017\\_1\\_4\\_F8-F14.pdf](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/66395/1/Klymenko_Klymenko_Manokhin_JES_2017_1_4_F8-F14.pdf).
12. Покриття для різальних інструментів з полікристалічних надтвердих композитів на основі кубічного нітриду бору / С.А. Клименко, С.Ан. Клименко, М.Ю. Копейкіна, А.С. Манохин [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/11/13.pdf>.

#### References:

1. Klimenko, S.A. (2014), *Tools of superhard materials*, Mashinostroenie, M., 608 p.
2. Vasil'eva, N.V. (2015), *The use of cutting tools of superhard synthetic materials to improve environmental quality and machining*, Zebra, Perm', pp. 91–95.
3. Novikov, N.V., Androsov, I.M. and Maistrenko, A.L. (2002), «Method for determining the strength and crack resistance of polycrystalline superhard materials», *Superhard materials*, No. 2, pp. 33–37.
4. Sushko, O.V. (2017), «Blade treatment with tools based on superhard modifications of borine nitride», [Online], available at: <http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/1407/1/1184.pdf>
5. Klimenko, S.A. (2006), *Processing of materials by the blade tool*, Kyiv, pp. 51–53.
6. Bagramov, L.G. (2000), *Calculation of cutting modes during milling*, 88 p.
7. Rosenberg, A.M. and Rosenberg, O.A. (1990), *Mechanics of plastic deformation in the processes of cutting and deforming drawing*, Naukova dumka, 320 p.
8. Gartfelder, V.A., Sekletina, L.S. and Yanyushkin, A.R. (2020), «Blade cutting of hardened steels with cubic boron nitride tools», Chuvash State University, pp. 1–2.
9. Bashkov, V.M. and Katsev, P.G. (1985), *The test for resistance of the cutting tool*, Mashinostroenie, 136 p.
10. Gartfelder, V.A. (1990), «Physical and technological features of the process of turning structural materials with tools made of superhard material», Abstract of Ph.D. dissertation, Kuibyshev, 23 p.
11. Klimenko, S.A., Klimenko, S.An., Manokhin, Yu.A. et al. (2017), «Contact stresses on the face of tools equipped with cubic boron nitride composites when turning hardened steel», [Online], available at: [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/66395/1/Klymenko\\_Klymenko\\_Manokhin\\_JES\\_2017\\_1\\_4\\_F8-F14.pdf](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/66395/1/Klymenko_Klymenko_Manokhin_JES_2017_1_4_F8-F14.pdf)
12. Klimenko, S.A., Klimenko, S.An., Kopyaykina, M.Yu. and Manokhin, A.S., «Coatings for cutting tools made of polycrystalline superhard composites based on cubic borine nitride», [Online], available at: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/11/13.pdf>

**Коваленко Яна** Павлівна – аспірант Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси: процеси механічної обробки; проектування різальних інструментів.

**Мельничук Петро** Петрович – доктор технічних наук, професор Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

– процеси механічної обробки; роботизовані технології.

Стаття надійшла до редакції 18.05.2021.