

DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2022-1\(89\)-27-31](https://doi.org/10.26642/ten-2022-1(89)-27-31)
УДК 621.9.025.7

Я.П. Коваленко, аспірант
П.П. Мельничук, д.т.н., проф.
В.А. Кирилович, д.т.н., доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Оцінка технологічних та термобаричних особливостей механічної обробки загартованих сталей: опис явищ у контактній зоні різанням лезовими інструментами із ПКНБ групи VL

На сьогоднішній день розвиток сучасної трибології в механоскладальній галузі потребує пошуку нових інструментальних матеріалів, розгляду технологічних можливостей різальних інструментів та визначення оптимальних характеристик і умов процесів з визначенням режимів різання для механічної обробки. Але головну роль у процесах технологічної обробки виконує інструмент, який використовується для досягання максимального результату при мінімальних затратах. Їх експлуатація характеризується зі значними навантаженнями, тому для обробки деталей машин і механізмів доцільно використовувати інструментальні матеріали з високими механічними властивостями. Поширеного використання в промислових галузях набули загартовані сталі, жароміцні, корозійностійкі й тверді сплави та інші матеріали високої твердості. Обробка таких матеріалів успішно здійснюється інструментами, які оснащені полікристалічним кубічним нітридом бору (ПКНБ). Такі сплави мають високу температурну стійкість, високу твердість, що дозволяє використовувати їх при високошвидкісних різальних операціях.

Ключові слова: полікристалічний кубічний нітрид бору; температурні режими; загартовані сталі; механічна обробка; режими різання.

Актуальність теми. У сучасній галузі машинобудування, зокрема у процесах механічної обробки, є потреба у підвищенні експлуатаційних властивостей деталей машин та механізмів для подальшого розвитку механообробної складової на сучасному промисловому ринку, враховуючи зарубіжні розробки оптимізації високошвидкісних процесів. Матеріали з високими експлуатаційними властивостями характеризуються низькою оброблюваністю різанням, а процес механічної обробки супроводжується високою інтенсивністю зносу різальних інструментів. Тому для підвищення продуктивності роботи, покращення характеристик міцності інструментів, пошуку оптимальних параметрів різання із врахуванням особливостей оброблюваності різанням, визначення методів з усунення швидкого зношування інструментів є актуальним завданням на сьогоднішній день.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. В роботах [1, 2] С.А. Клименка розглянуто технологічні можливості різальних інструментів, які оснащені полікристалічними надтвердими композитами на основі кубічного нітриду бору (КНБ) груп ВН, VL, ВС та показано приклади ефективного застосування. Численними дослідженнями автора [3, с. 264] під час визначення температурних режимів встановлено, що оптимальні температури не залежать від геометричних параметрів різця, видів хіміко-термічної обробки сталі та характеру застосування змащувально-охолоджувальної рідини. Ці параметри при сталих значеннях подачі й глибини різання будуть визначати лише швидкість, за якої настає оптимальна температура. Випробування автора [4, с. 33] показали, що обробка деталей з використанням оптимального різання дозволяє збільшити розмірну стійкість інструмента, отримати мінімальні для обраних умов сили різання, шорсткість поверхні, глибину й ступінь наклепу, а також найбільш стабільний та рівномірний розподіл залишкових напружень у різних точках обробленої поверхні. Проблеми розглянуті не в повному обсязі, і залишається багато питань з огляду на процеси оптимізації трибологічних та термобаричних процесів при обробці загартованих сталей.

Метою статті є оцінка термобаричних і технологічних можливостей механообробки загартованих сталей інструментами, оснащених ПКНБ групи VL.

Викладення основного матеріалу. Сьогодні в технічних літературних джерелах є низка публікацій, що відображають експериментальні дослідження, результати робіт з вивчення стану інструментів, які оснащені кубічним нітридом бору груп ВН та VL.

Особливістю полікристалічних надтвердих матеріалів для інструмента є сполучення високих твердості і теплостійкості. За твердістю полікристали на основі алмазу і нітриду бору значно перевершують відомі інструментальні матеріали: швидкорізальну сталь, твердий сплав і мінералокераміку. Наприклад, композит 01 за мікротвердістю перебільшує мінералокераміку на $5 \cdot 10^{10}$ Па. За такого збільшення твердості інструментального матеріалу можливе подальше зростання швидкостей різання при металообробці й

остаточній обробці лезовими інструментами із надтвердих матеріалів високої твердості (загартованих сталей і твердих сплавів), що раніше можна було обробляти лише абразивними інструментами. Для ефективного впровадження інструментів з надтвердих синтетичних матеріалів необхідно насамперед правильно визначити область їхнього застосування. Вітчизняною промисловістю освоєне серійне виробництво різців із двох основних видів полікристалічних надтвердих матеріалів: ельбор (на основі КНБ) і карбонадо (алмазу). Кожний з них має свою область застосування, обумовлену фізико-механічними властивостями [5].

Композити на основі КНБ діляться на три групи – ВН, ВL, ВС. Композити групи ВН з вмістом КНБ у діапазоні 70–95 % є значно монофазними, але гетерогенними за своєю структурою. До групи ВL належать композити з 45–65 % КНБ. Різальні інструменти, які оснащені композитами групи ВН, дозволяють ефективно оброблювати вироби з різних чавунів, легованих сталей високої твердості, твердих сплавів, деталі з напиленням покриттям. А різальні інструменти, які оснащені композитами групи ВL, дозволяють проводити високоефективну чистову лезову обробку виробів зі сталей високої твердості (62-64 HRC) [1]. Якщо порівнювати дві групи, то композити групи ВН при своїй швидкості зношування інструментів в 1,5–5,0 разів нижче, що обумовлює отримання оброблюваних виробів високої якості при стійкості інструментів 30–45 хвилин.

Висока твердість, модуль пружності, тріщиностійкість і теплопровідність дозволяють інструментам ефективно оброблювати загартовані сталі на швидкості різання до 120–150 м/хв. Подальше збільшення швидкості різання приводить до зниження стійкості інструмента у зв'язку зі збільшенням температури різання та інтенсифікації процесів хімічної взаємодії на контактних дільницях інструмента [2].

Автори [6] застосували теоретичні методи визначення температури різання. Алгоритм розрахунку температури різання по теорії А.Н. Резнікова виглядає так:

$$\alpha = S \cdot \sin \varphi ; b = t / \sin \varphi , \quad (1)$$

де α, b – параметри перерізу зрізу, мм;

t – глибина різання, мм;

S – подача, мм/об;

φ – кут інструмента в плані, град;

$$F_{T3} \approx N_3 \approx 0,252 \sigma_b b l_3 , \quad (2)$$

де F_{T3} – сила тертя на задній поверхні різця, кг;

N_3 – нормальна сила на задній поверхні різця, кг;

σ_b – межа міцності оброблюваного матеріалу, кг/мм²;

l_3 – довжина контакту по задній поверхні різця, мм;

$$q_0 = 6,25 \frac{P_{NO} \cos \gamma + P_{ZO} \sin \gamma}{b l_n} \cdot \frac{V}{k} , \quad (3)$$

де q_0 – інтенсивність теплового потоку на надрізцевою стороною стружки, кал/см²·с;

$P_{NO} = P_N - N_3$;

$P_{ZO} = P_Z - F_{m3}$ – складові сили різання, кг;

l_n – довжина контакту по передній поверхні різця, мм;

V – швидкість різання, м/хв;

k – усадка стружки;

$$q_1 = 1,95 \sigma_b V , \quad (4)$$

де q_1 – тепловий потік на задній поверхні різця, кал/см²·с;

$$\sin \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{\sqrt{k^2 - 2k \sin \gamma + 1}} , \quad (5)$$

де β_1 – кут здвигу, град.;

γ – передній кут, град.;

$$q_d = 3,9 \frac{V \sin \beta_1}{abk} [P_{ZO} (k - \sin \gamma) - P_{NO} \cos \gamma] , \quad (6)$$

де q_d – теплота деформації, кал/см²·с;

$$Pe_d = \frac{1}{6} \cdot \frac{V a}{\omega} ; Pe = \frac{1}{6} \cdot \frac{V l_n}{k \omega} , \quad (7)$$

де Pe_d і Pe – безрозмірні критерії Пекле для джерела еквівалентного теплоті деформації та тертя надрізцевої сторони стружки відповідно;

ω – коефіцієнт температуропровідності, см²/с;

$$b^* = \left(1 + 1,33 \frac{k \sqrt{\sin \beta_1}}{\sqrt{Pe_d}} \right)^{-1} , \quad (8)$$

де b^* – відносна кількість теплоти деформації, яка відходить зі стружкою;

$$\varphi' = 1,33 \cdot 10^{-2} \frac{V a^2}{\omega d} , \quad (9)$$

де φ' – безрозмірний критерій;

d – діаметр виробу, мм;

$$\theta_d = 0,6 \frac{\omega k}{\lambda V} b^* q_d, \quad (10)$$

де θ_d – температура деформації, С;

γ – питома теплопровідність деталі, кал/см·с·С;

$$\theta_{ср} = 0,195 \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} \sqrt{\frac{kl_n}{V}} (q_0 T_{1ср} - 1,41 q_n T_{2ср}) + (1 + c^*) \theta_d, \quad (11)$$

де $\theta_{ср}$ – середня температура на контактній поверхні стружки, °С;

$T_{1ср}, T_{2ср}$ – функції, які використовуються для розрахунку контактної площини стружки;

q_n – тепловий потік на передній поверхні, кал/см²·с;

c – коефіцієнт, який враховує перенос теплоти у стружку;

$$\theta_{иср} \approx (1 + c^*) \theta_d T_{иср} + 0,1 \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} \sqrt{\frac{l_3}{V}} (q_1 - 1,82 q_3), \quad (12)$$

де $\theta_{иср}$ – середня температура на контактній поверхні виробу, °С;

$T_{иср}$ – функція, яка використовується для розрахунку температури контактної площини;

q_3 – тепловий потік на задній поверхні, кал/см²·с;

$$\eta_1 = b / l_n, \quad \eta_2 = b / l_3, \quad (13)$$

де η_1, η_2 – безрозмірні коефіцієнти;

$$N_1 = B(l_3 / l_n) G(\eta_1); \quad N_2 = B(l_n / l_3) G(\eta_2), \quad (14)$$

де N_1, N_2 – безрозмірні функції;

G – функція, яка залежить від η ;

$B(l_3 / l_n), B(l_n / l_3)$ – безрозмірні функції.

Теоретичні та експериментальні дослідження базуються на аналітичних і трибологічних положеннях теорій різання. Дослідження для отримання показників температури різання та сил оброблювалися на установках з приладами для визначення температур, і характеру контакту інструментів із оброблюваним матеріалом.

У розрахунках автора [7, с. 152] відображається алгоритм визначення температури різання, що близький до експериментальних даних при високих швидкостях.

При $r > 0$

$$a_1 = SL / c', \quad b_1 = c' t / L, \quad (15)$$

$$L = \sin \arctg \frac{c'}{[1 - a'(1 - \cos \varphi)] \operatorname{ctg} \varphi + a'(\sin \varphi + b')}, \quad (16)$$

$$b'' = \frac{t}{\sin \varphi} \left[1 - a' \left(1 - \cos \varphi - \frac{\varphi}{\sin \varphi} - \frac{\arccos \sqrt{1 - b'^2}}{\sin \varphi} \right) \right], \quad (17)$$

$$a' = r / t, \quad b' = S / 2r, \quad c' = 1 - a'(1 - \sqrt{1 - b'^2}), \quad (18)$$

де a_1, b_1 – параметри зрізу, м;

b'' – сумарна довжина робочих ділянок різальних кромки різця, м;

t – глибина різання, м;

S – подача, м/об;

r – радіус при вершині, м.

При $r = 0$

$$a_1 = \frac{S}{d'} \sin \arctg \frac{d'}{1 + \operatorname{ctg} \varphi - d'}, \quad b_1 = \frac{d' t}{\sin \arctg \frac{d'}{1 + \operatorname{ctg} \varphi - d'}}, \quad b'' = \frac{t}{\sin \varphi} \left[1 + \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_1} (1 - d') \right], \quad (19)$$

$$d' = 1 - \frac{S}{t} \frac{1}{\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \varphi_1},$$

де φ_1 – допоміжний кут в плані, град.;

$$Pe = Va_1 / \omega, \quad (20)$$

де V – швидкість різання, м/с;

ω – коефіцієнт температуропровідності, м²/с.

Температуру деформації визначаємо:

$$\theta_d = \frac{\tau_p}{c_p B} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{PeB}{4}}, \quad (21)$$

де θ_d – опір оброблюваного матеріалу пластичному здвигу, Н/м²;

c_p – питома об'ємна теплоємність оброблюваного матеріалу, Дж/(м³·°С);

$\operatorname{erf} \sqrt{PeB/4}$ – інтеграл вірогідності.

Температура на передній поверхні різця:

$$\theta_n = \theta_d (1 + 0,73 \varphi_M), \quad (22)$$

$$\varphi_M = \frac{0,9675 n^* \sqrt{PeB}}{\operatorname{erf} \sqrt{PeB/4}} \sqrt{\frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B(\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma + B \sin \gamma}}, \quad (23)$$

де $n^* = 1 / (1 + b_0)$.

$$b_0 = \frac{0,25FD^{0,3}\sqrt{\cos\gamma + B\sin\gamma}}{\sqrt{PeB^{0,3}[\cos + \sin - B(\cos - \sin)^{0,2}]}} \quad (24)$$

для визначення температури на задній поверхні різця використовували формулу:

$$\theta_3 = 0,5\theta_d \left(1 + \frac{1,035n_1 \cos\alpha}{\operatorname{erf}\sqrt{PeB/4}} u + \frac{1}{u} \right), \quad (25)$$

$$u = \sqrt{PeEB^{1,25}} / \sin^{0,25}\alpha, \quad (26)$$

де α – задній кут різця, град.;

$$E = p_1 / \alpha_1;$$

p_1 – радіус закруглення різальної кромки, м;

$$n_1 = 1 / (1 + b'_1);$$

$$b'_1 = \frac{0,24FD^{0,3}\sin^{0,1}\alpha}{\sqrt{PeEB^{0,2}B^{0,1}}}.$$

Середню температуру різання знаходимо:

$$\theta_p = \frac{\theta_n l_n + \theta_3 l_3}{l_n + l_3}. \quad (27)$$

Таким чином, два методи розрахунку температури різання можуть бути використані, але є певні зауваження. Якщо розглядати розрахунки температури за методом А.Н. Резнікова, можна зробити висновок, що цей метод можливо застосовувати для матеріалів, які дають зливну стружку. А якщо враховувати розрахунки С.С. Сіліна, то необхідно зазначати параметр В не менше 0,4.

Аналіз термобаричних умов у зоні лезової обробки дозволив розробити карту механізмів зношування інструменту з ПКНБ, за допомогою якої за температурою і тиском у контактній зоні встановлюються ймовірні механізми зношування інструменту і формулюються вимоги до його матеріалу.

Концентрація КНБ у матеріалі інструменту визначає сфери його застосування:

– КНБ > 70 % (ВН) – для обробки в умовах високих навантажень;

– КНБ 45–65 % (ВЛ) – для остаточної безударної обробки з високою швидкістю різання.

Це пов'язано з теплопровідністю інструментального композиту та рівнем дотичних напружень на контактних поверхнях інструменту. Максимальний результат досягається за рахунок збільшення зони взаємодії інструменту з виробом, підвищення інтенсивності взаємодії інструменту з виробом, максимального використання ресурсів системи. Це реалізується при обробці з високою швидкістю різання, в умовах «твердої» обробки, при застосуванні змінних різальних пластин та захисних покриттів [8, с. 37].

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведений аналіз свідчить, що під час використання надтвердого матеріалу ПКНБ групи ВЛ можна отримати високу точність та якість поверхні за високої продуктивності, економічності та мінімального зношування інструментів. Численні дослідження залежності температури від різних факторів показують, що температура в зоні різання залежить від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, режиму різання, геометрії різального інструменту і багатьох інших умов. Найбільше на температуру в зоні різання впливає швидкість різання, меншою мірою впливає подача, а вплив глибини різання майже не виявляється.

На сьогоднішній день основні закономірності та методи вимірювання температури в зоні контакту процесу різання такими надтвердими матеріалами, як ПКНБ розкриті недостатньо, рекомендації щодо їх застосування мають загальний або теоретичний характер. У зв'язку зі складнощами, які виникають при знятті точних параметрів температури, такі значення не дають точної оцінки. Автори здійснюють пошук більш точних методів, які будуть основані на знятті температурних режимів, в тому числі при нанесеному покритті на пластини ПКНБ групи ВЛ.

Список використаної літератури:

1. Клименко С.А. Технологические возможности инструментов, оснащенных композитами на основе кубического нитрида бора // С.А. Клименко, М.Ю. Копейкина, А.Ю. Чумак. – К. – 2017. – С. 54.
2. Контактные напряжения на передней поверхности инструментов, оснащенных композитами на основе кубического нитрида бора, при точении закаленной стали / С.А. Клименко, С.А. Клименко, А.С. Манохин та ін. [Електронний ресурс]. – Режим доступа : https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/66395/1/Klymenko_Klymenko_Manokhyn_JES_2017_1_4_F8-F14.pdf.
3. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов // А.Д. Макаров // Машиностроение. – 2009. – С. 264.
4. Грубый С.В. Оптимизация режимных параметров на операциях механической обработки / С.В. Грубый // Технология металлов. – 2012. – № 11. – С. 33–37.
5. Музичка Д.Г. Застосування лезових інструментів з надтвердих матеріалів / Д.Г. Музичка, В.Ю. Солод, С.В. Калініченко [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/1/1/1-1-mzpr83.pdf>.
6. Пушных В.А. Сравнение двух методов расчета температуры резания / В.А. Пушных, В.Л. Бирик [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://core.ac.uk/download/pdf/53064424.pdf>.
7. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов / С.С. Силин // Машиностроение. – 1979. – С. 152.

8. *Клименко С.А.* Механічна обробка інструментами з надтвердих матеріалів: стан і перспективи / *С.А. Клименко* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2020/12/IP-2020_Matters_TextOnline.pdf.

References:

1. Klimentko, S.A., Kopeikina, M.Yu. and Chumak, A.Yu. (2017), *Tekhnologicheskie vozmozhnosti instrumentov, osnashchennykh kompozitami na osnove kubicheskogo nitrida bora*, K., pp. 54.
2. Klimentko, S.A., Klimentko, S.A. Manokhin, A.S. et al. (2017), *Kontaktnye napryazheniya na perednei poverkhnosti instrumentov, osnashchennykh kompozitami na osnove kubicheskogo nitrida bora, pri tochenii zakalennoi stali*, [Online], available at: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/66395/1/Klymenko_Klymenko_Manokhin_JES_2017_1_4_F8-F14.pdf
3. Makarov, A.D. (2009), «Izнос i stoikost' rezhushchikh instrumentov», *Mashinostroenie*, pp. 264.
4. Grubiy, S.V. (2012), «Optimizatsiya rezhimnykh parametrov na operatsiyakh mekhanicheskoi obrabotki», *Tekhnologiya metallov*, No. 10, pp. 33–37.
5. Muzychka, D.G., Solod, V.Ju. and Kalinichenko, S.V. *Zastosuvannya lezovykh instrumentiv z nadtverdih materialiv*, [Online], available at: <http://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/1/1/1-1-mzp83.pdf>
6. Pushnykh, V.A. and Bibik, V.L. *Sravnienie dvukh metodov rascheta temperatury rezaniya*, [Online], available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/53064424.pdf>.
7. Silin, S.S. (1979), «Metod podobiya pri rezanii materialov», *Mashinostroenie*, pp. 152.
8. Klimentko, S.A. *Mekhanichna obrobka instrumentami z nadtverdikh materialiv: stan i perspektivi*, [Online], available at: http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2020/12/IP-2020_Matters_TextOnline.pdf

Коваленко Яна Павлівна – аспірантка Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- процеси механічної обробки;
- проектування різальних інструментів.

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

<http://orcid.org/0000-0002-7071-651X>.

Наукові інтереси:

- процеси механічної обробки;
- роботизовані технології.

Кирилович Валерій Анатолійович – доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ім. професора Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- процеси механічної обробки;
- автоматизація технологічної підготовки машино- та приладобудування;
- автоматизований синтез роботизованих механоскладальних технологій.

Kovalenko Ya.P., Melnychuk P.P., Kyrylovych V.A.

Estimation of technological and thermobaric features of hardened steels machining: description of phenomena in the contact zone by cutting with blade tools from PCNB group BL

So far, the development of modern tribology in the mechanical assembly industry requires the search for new tool materials, consideration of technological capabilities of cutting tools and determine the optimal characteristics and process conditions with the definition of cutting modes for machining. But the main role in the processes of technological processing is formed by the tool used to achieve maximum results at minimum cost. Their operation is characterized by significant loads, so for the processing of machine parts and mechanisms it is advisable to use structural materials with high mechanical properties. Hardened steels, heat-resistant, corrosion-resistant and hard alloys, and other high-strength materials have become widely used in industrial industries. Processing of such materials is successfully carried out by the tools which are equipped with polycrystalline cubic nitride of boron (PCNB). Such alloys have high temperature resistance, high hardness, which allows them to be used in high-speed cutting operations.

Keywords: polycrystalline cubic boron nitride; temperature regimes; hardened steel; machining, cutting modes.

Стаття надійшла до редакції 16.05.2022.