

## Механізми зношування інструменту із КНБ при торцевому фрезеруванні сталей високої твердості

*Стаття присвячена проблемам зношування інструментів із КНБ при торцевому фрезеруванні сталей високої твердості. Зокрема, аналітичне дослідження спрямоване на виявлення і класифікацію різних типів зношування, які впливають на ефективність і довговічність інструментів. Результати експериментів різних дослідників містять в собі аналіз теплового зношування, яке виникає внаслідок високих температур, що утворюються в зоні різання; абразивного зношування, викликаного твердими частинками металу, і адгезійного зношування, що виникає через взаємодію матеріалів інструменту і заготовки.*

*Експериментальні дані показують, що обробка високотвердих сталей із застосуванням інструментів з КНБ може забезпечити високу якість оброблюваної поверхні за умови правильного підбору режимів різання. Визначено, що зниження швидкості різання і підвищення подачі можуть суттєво вплинути на зменшення зношування інструменту. В статті надано рекомендації щодо оптимізації параметрів обробки для досягнення максимальної ефективності. Зокрема, пропонується використовувати багатоступеневі стратегії різання для зниження теплового і механічного навантаження на інструмент. Крім того, обговорюються перспективи подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення технології торцевого фрезерування із використанням інструментів з КНБ, що може значно підвищити продуктивність та економічну ефективність виробничих процесів. Застосування інструментів з КНБ є ефективним рішенням для торцевого фрезерування сталей високої твердості, але для досягнення оптимальних результатів необхідно враховувати механізми їх зношування і правильно підбирати параметри різання.*

**Ключові слова:** торцеве фрезерування; сталь високої твердості; кубічний нітрид бору; зносостійкість; механізми зношування.

**Актуальність теми.** Механізми зношування різальних інструментів відіграють ключову роль у процесі торцевого фрезерування сталей високої твердості. Розуміння цих механізмів дозволяє визначити причини руйнування інструменту, знайти шляхи підвищення його ефективності та довговічності. Теплове зношування виникає через високі температури, які утворюються в зоні різання під час обробки. Інструмент може перегріватися, що призводить до утворення термічних тріщин і втрати механічних властивостей матеріалу. Важливо досліджувати теплове зношування, щоб розробити методи охолодження та вибрати оптимальні режими різання, які мінімізують теплові навантаження на інструмент. Абразивне зношування відбувається через тертя між різальною кромкою інструменту і твердими частинками металу. Це призводить до механічного зносу цієї кромки, що може значно зменшити термін служби інструменту. Дослідження цього механізму дозволяють розробити інструменти з покриттям, що підвищують їхню зносостійкість, а також оптимізувати режими обробки для зменшення абразивного зношування. Адгезійне зношування виникає через взаємодію матеріалів інструменту і заготовки, що призводить до утворення зварних з'єднань на різальній кромці. Це викликає руйнування інструменту та погіршення якості оброблюваної поверхні. Дослідження механізмів зношування є критично важливим для підвищення ефективності виробничих процесів виготовлення деталей машин. Визначення причин та умов, які призводять до зношування інструментів, дозволяє розробити більш надійні та довговічні рішення. Це своєю чергою сприяє зниженню витрат на обслуговування та підвищенню якості оброблених деталей, що є важливим для забезпечення конкурентоспроможності на промисловому ринку.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор.** У роботах вітчизняних та зарубіжних науковців: Г.М. Виговського, О.А. Громова, С.А. Клименка, А.С. Манохіна, П.П. Мельничука, І.А. Петруши, А.О. Чумака, V.Bushlya, Y.Xing, J.Deng, J.Zhao, G.Zhang, K.Zhang, H.Tanaka, T.Sugihara, R.M. Hooper, J.I. Shakib, C.A. Brookes, J.Barry, G.Byrne, G.Poulachon, B.P. Bandyopadhyay, I.S. Jawahir, S.Pheulpin, E.Seguін висвітлено результати досліджень процесу торцевого фрезерування плоских поверхонь деталей інструментами з надтвердих матеріалів, а саме кубічного нітриду бору (КНБ). Наукових робіт, присвячених проблематиці зношування робочих поверхонь різальних пластин із КНБ та їх впливу на стійкість інструментів не так багато [4–9]. У [1, 2] представлено результати досліджень, присвячених підвищенню стійкості різальних інструментів з КНБ групи VL при обробці сталі в діапазоні швидкостей різання 20–300 м/хв. Провівши аналіз контактних поверхонь, автори роблять висновок, що при швидкості більше за 100 м/хв утворення лунки зносу по передній поверхні відбувається по шліфувальних мітках, залишених під час виготовлення інструменту. Досліджено [3] характер

зношування інструментів із ПКНБ з різним вмістом нітриду бору при точінні з ударом сталі M50, твердістю 62–64 HRC на різних швидкостях різання. Можна зробити висновок, що стійкість інструментів із ПКНБ зменшується зі збільшенням швидкості різання. На швидкості різання до 120 м/хв найкращу стійкість показували інструменти з ПКНБ групи VN, при збільшенні швидкості різання до 240 м/хв найкращу працездатність показували інструменти із ПКНБ групи VL.

**Метою статті** є аналітичне дослідження механізмів зношування інструментів із кубічного нітриду бору при торцевому фрезеруванні сталей високої твердості. Стаття ставить за мету визначити основні фактори, що впливають на зношування різальних інструментів, та оптимізувати параметри оброблення для мінімізації зношування та забезпечення високої якості оброблюваних поверхонь. Дослідження також спрямоване на розробку рекомендацій для підвищення продуктивності та економічної ефективності процесу оброблення.

**Викладення основного матеріалу.** Досліджено [10] зношування інструменту при обробці загартованої сталі твердістю 54 HRC. Відбувалося зношування бічних поверхонь. На рисунку 1 зображено криві максимального зношування.

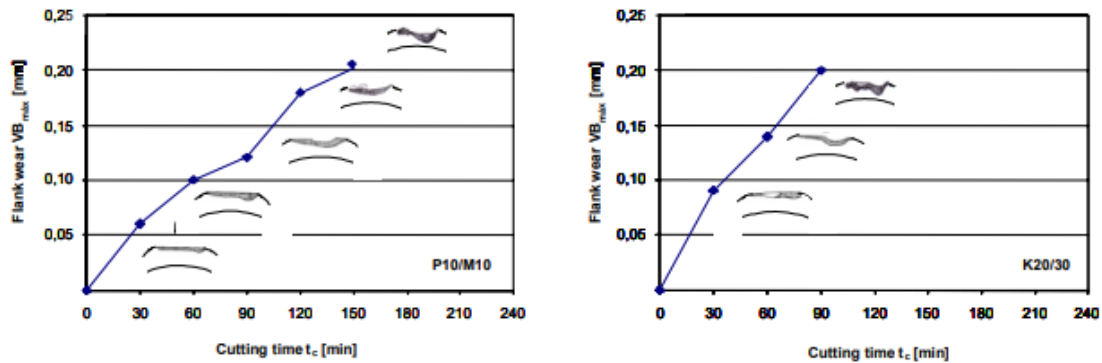


Рис. 1. Криві максимального зношування бокових поверхонь інструментом P10/M10 та K20/30

Криві зношування демонструють подібну тенденцію для двох марок інструменту. Для P10/M10 спочатку спостерігається більш значне зношування. Між 30 і 90 хвилинами різання криві показують менший нахил. Тому після 90 хвилин спостерігається збільшення зношування, що з'являється вже після 60 хвилин різання. Таким чином, термін служби інструменту становив 150 хв. Для K20/30 криві показують більш виражений нахил і термін служби склав 90 хвилин.

На рисунку 2 зображено бічну і торцеву поверхні інструменту P10/M10 після 150 хвилин різання. Можна спостерігати сліди стирання на бічній поверхні та відколи на торці. Інструмент зазнав зношування нижче різальної кромки.

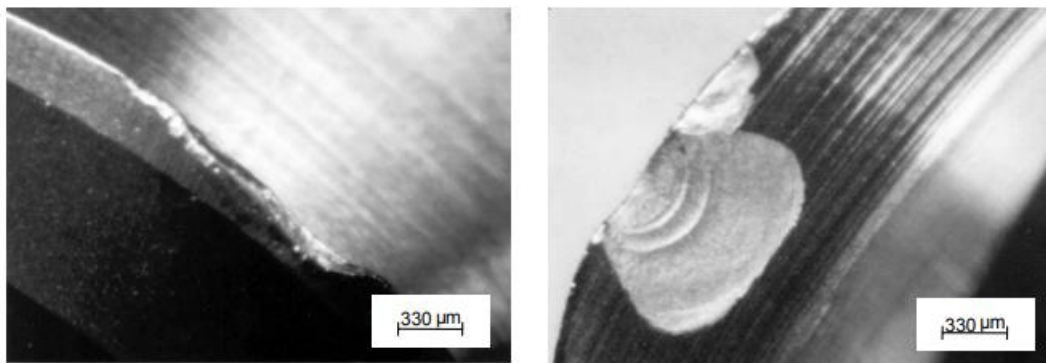


Рис. 2. Бічна і торцева поверхні інструменту P10/M10 після 150 хв різання

На рисунку 3 показано бічну і торцеву поверхні інструменту K20/30 після 90 хв різання. Можна спостерігати слід контакту та адгезії, що розташований безпосередньо під зносом різальної кромки. На зображенні видно утворення відколів і поява розривів.

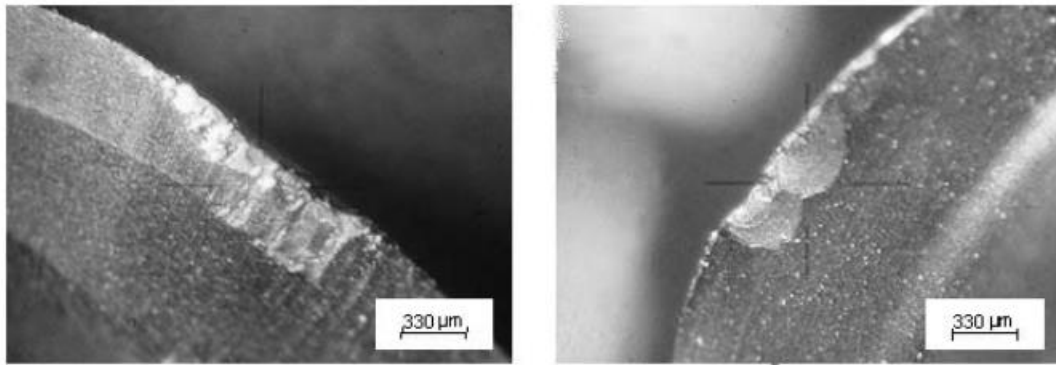


Рис. 3. Бічна і торцева поверхні інструменту K20/30 після 90 хв різання

Якість поверхні для двох класів досліджуваних інструментів зростала з часом різання. При тривалості різання 150 хв (P10/M10) якість поверхні підтримувалася на рівні  $R_a$  нижче 2  $\mu\text{m}$  і  $R_{\text{max}}$  нижче 9  $\mu\text{m}$ . З іншого боку, для інструменту K20/30 якість поверхні підтримувалася на рівні менше 1  $\mu\text{m}$   $R_a$  і нижче 6  $\mu\text{m}$   $R_{\text{max}}$ . Однак за 90 хв різання інструмент P10/M10 показав на 27 % нижчу шорсткість, ніж інструмент K20/30.

На рисунках 4–5 показано відповідно бічне зношування пластини P10 TiN/TiAlN і P10 TiN для 17368  $\text{mm}^2$  видаленого матеріалу, що знімається при подачі 0,20  $\text{mm}/\text{зуб}$  і 0,50  $\text{mm}/\text{зуб}$  відповідно.

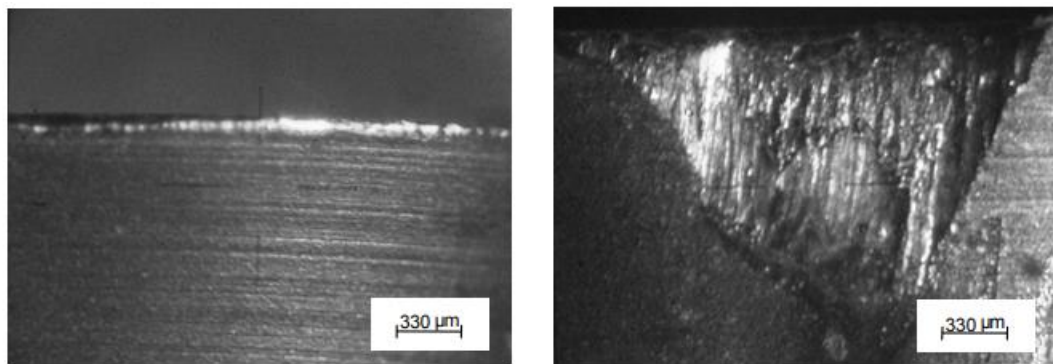


Рис. 4. Бічне зношування інструменту при швидкості різання 256  $\text{m}/\text{хв}$ , подачі 0,20 і 0,50  $\text{mm}/\text{зуб}$  першої пластини

На рисунку 4 пластина зазнала максимального зношування бокової поверхні при подачі 0,20  $\text{mm}/\text{зуб}$ , де можна спостерігати невеликий слід абразивного зношування на боковій поверхні. При подачі 0,50  $\text{mm}/\text{зуб}$  спостерігається велике зношування бічної поверхні зі слідами стирання і великою кількістю адгезії.

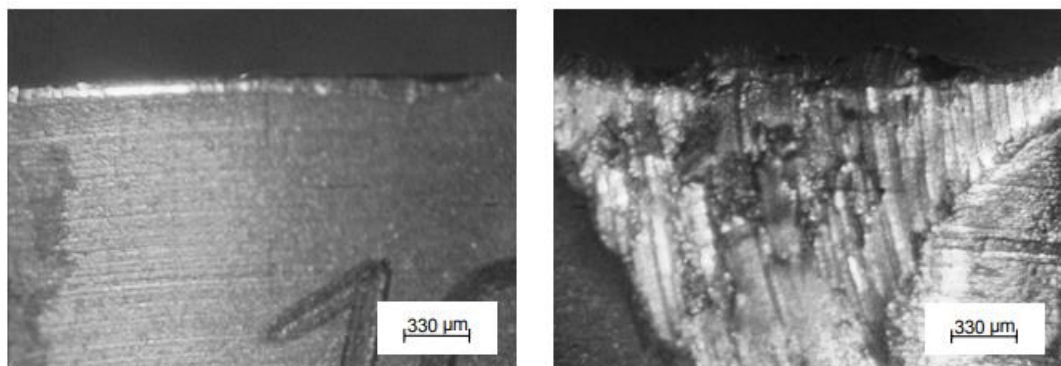


Рис. 5. Бічне зношування інструменту при швидкості різання 256  $\text{m}/\text{хв}$ , подачі 0,20 і 0,50  $\text{mm}/\text{зуб}$  другої пластини

На рисунку 5 зображено невеликий слід стирання на бічній поверхні при подачі 0,20  $\text{mm}/\text{зуб}$ . При подачі 0,50  $\text{mm}/\text{зуб}$  можна спостерігати більше зношування кромки, ніж у першій пластині.

При різанні двома типами пластин вплив подачі на зношування інструменту є значним. Зменшення подачі на 60 % призведе до зменшення зношування бічних поверхонь.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Різні механізми зношування, такі як теплове, абразивне та адгезійне, суттєво впливають на термін служби та продуктивність інструментів. Правильний підбір режимів різання, враховуючи швидкість різання та подачу, є критично важливим для мінімізації зношування інструменту та покращення економічної ефективності процесу.

Результати аналітичного дослідження підтверджують, що інструменти з КНБ є перспективним рішенням для оброблення сталей високої твердості, але для досягнення оптимальних результатів необхідно враховувати специфіку їх зношування та ретельно підбирати параметри оброблення. Подальші дослідження в цій сфері можуть суттєво покращити технологічні процеси та підвищити конкурентоспроможність виробництва.

#### Список використаної літератури:

1. Sugihara T. High Speed Machining of Inconel 718 Focusing on Tool Surface Topography of CBN Tool / T.Sugihara, T.Enomoto // Proc. Manufacturing. – 2015. – Vol. 1. – P. 675–682.
2. Wear resistance of carbide tools with textured flank-face in dry cutting of green alumina ceramics / Y.Liu, J.Deng, F.Wu and other // Wear. – 2017. – № 372–373. – P. 91–103.
3. Diniz A.E. Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools / A.E. Diniz, A.J. Oliveira // J. Mater. Proc. Technol. – 2008. – № 195. – P. 275–281.
4. Investigation of the mechanical properties and cutting performance of cBN-based cutting tools with Cr3C2 binder phase / K.Slipchenko, I.Petrusha, V.Turkevich and other // Procedia CIRP. – 2008. – Vol. 72. – P. 1433–1438.
5. Sumiya H. Mechanical properties of nano-polycrystalline cBN synthesized by direct conversion sintering under HPHT / H.Sumiya, K.Harano, Y.Ishida // Diamond and Related Materials. – 2014. – Vol. 41. – P. 14–19.
6. Термобаричне спікання і працездатність різального композиту cBN-TiC групи BL при точінні загартованої сталі Caldie / I.A. Петруша, В.М. Бушля, О.С. Осипов та ін. // Породоруйнівний та металообробний інструмент – техніка та технологія його виготовлення та застосування : зб. наук. пр. – К. : ICM ім. В.М. Бакуля, 2015. – Вип. 18. – С. 338–345.
7. Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel 718 / J.P. Costes, Y.Guillet, G.Poulachon, M.Dessoly // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – № 47 (7). – P. 1081–1087.
8. Високошвидкісне точіння деталей з загартованих сталей інструментами, що оснащені матеріалами на основі кубічного нітриду бору / Ю.О. Мельнічук, I.A. Петруша, С.А. Клименко та ін. // Інструментальний світ. – 2015. – № 1–4 (61–64). – С. 13–15.
9. Експериментальні дослідження ефективності інструментів оснащених новими типами композитів з КНБ / С.А. Клименко, С.Ан. Клименко, Ю.О. Мельнічук та ін. // Процеси механічної обробки, верстати та інструмент : XI Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю, 5–6 листопада. – Житомир, 2021.
10. Zeilmann R.P. Tool wear in high speed milling of hardened steel / R.P. Zeilmann, R.Santin // Paper presented at the 18th International Congress of Mechanical Engineering, November 6–11. – Caxias do Sul, Brazil, 2005. – P. 1–6.

#### References:

1. Sugihara, T. and Enomoto, T. (2015), «High Speed Machining of Inconel 718 Focusing on Tool Surface Topography of CBN Tool», *Proc. Manufacturing*, Vol. 1, pp. 675–682.
2. Liu, Y., Deng, J., Wu, F. et al. (2017), «Wear resistance of carbide tools with textured flank-face in dry cutting of green alumina ceramics», *Wear*, No. 372–373, pp. 91–103.
3. Diniz, A.E. and Oliveira, A.J. (2008), «Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools», *J. Mater. Proc. Technol.*, No. 195, pp. 275–281.
4. Slipchenko, K., Petrusha, I., Turkevich, V. et al. (2008), «Investigation of the mechanical properties and cutting performance of cBN-based cutting tools with Cr3C2 binder phase», *Procedia CIRP*, Vol. 72, pp. 1433–1438.
5. Sumiya, H., Harano, K. and Ishida, Y. (2014), «Mechanical properties of nano-polycrystalline cBN synthesized by direct conversion sintering under HPHT», *Diamond and Related Materials*, Vol. 41, pp. 14–19.
6. Petrusha, I.A., Bushlia, V.M., Osipov, O.S. et al. (2015), «Termobarychne spikannia i pratsezdattnist rizalnoho kompozytu cBN-TiC hrupy BL pry tochinni zahartovanoi stali Caldie», *Porodoruivnyi ta metaloobrobnyi instrument – tekhnika ta tekhnolohiia yoho vyhotovlennia ta zastosuvannia*, zb. nauk. pr., ISM ім. В.М. Бакуля, К., Issue 18, pp. 338–345.
7. Costes, J.P., Guillet, Y., Poulachon, G. and Dessoly, M. (2007), «Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel 718», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, No. 47 (7), pp. 1081–1087.
8. Melniichuk, Yu.O., Petrusha, I.A., Klymenko, S.A. et al. (2015), «Vysokoshvydkisne tochinna detalei z zahartovanykh stalei instrumentamy, shcho osnashcheni materialamy na osnovi kubichnoho nitrydu boru», *Instrumentalni svit*, No. 1–4 (61–64), pp. 13–15.
9. Klymenko, S.A., Klymenko, S.An., Melniichuk, Yu.O. et al. (2021), «Eksperymentalni doslidzhennia efektyvnosti instrumentiv osnashchenykh novymy typamy kompozytiv z KNB», *Protsesty mekhanichnoi obrobky, verstaty ta instrument*, XI Vseukrainska naukovo-tekhnichna konferentsiia z mizhnarodnoiu uchastiu, 5–6 lystopada, Zhytomyr.
10. Zeilmann, R.P. and Santin, R. (2005), «Tool wear in high speed milling of hardened steel», *Paper presented at the 18th International Congress of Mechanical Engineering*, November 6–11, Caxias do Sul, Brazil, pp. 1–6.

**Залога** Вільям Олександрович – доктор технічних наук, професор Сумського державного університету.

<https://orcid.org/0000-0001-7444-485X>.

Наукові інтереси:

- технологія машинобудування;
- теорія різання;
- моделювання робочих процесів високих технологій.

**Zaloga V.O.**

**Mechanisms of tool wear in cubic boron nitride (CBN) during face milling of high hardness steels**

The article is dedicated to the issues of tool wear with CBN in face milling of high hardness steels. In particular, the analytical study is aimed at identifying and classifying different types of wear that affect the efficiency and durability of the tools. The results of various researchers' experiments include the analysis of thermal wear caused by high temperatures generated in the cutting zone; abrasive wear caused by hard metal particles; and adhesive wear arising from the interaction of tool and workpiece materials. Experimental data shows that machining high hardness steels using CBN tools can ensure high quality of the machined surface, provided the correct cutting parameters selection. It has been determined that reducing the cutting speed and increasing the feed rate can significantly affect the reduction of tool wear. The article provides recommendations for optimizing machining parameters to achieve maximum efficiency. In particular, it proposes the use of multi-stage cutting strategies to reduce thermal and mechanical loads on the tool. Additionally, prospects for further research aimed at improving the face milling technology with the use of CBN tools are discussed, which can significantly increase the productivity and economic efficiency of manufacturing processes. The use of CBN tools is an effective solution for face milling of high hardness steels, but to achieve optimal results, it is necessary to consider the mechanisms of their wear and properly select cutting parameters.

**Keywords:** face milling; high hardness steel; cubic boron nitride; wear resistance; wear mechanisms.

Стаття надійшла до редакції 18.09.2024.