

Я.П. Коваленко, аспірант  
П.П. Мельничук, д.т.н., проф.  
Державний університет «Житомирська політехніка»

## Фінішне оброблення загартованої сталі при торцевому фрезеруванні інструментом із ПКНБ без покриттів та з покриттями TiSiN і TiAlN

У статті представлено результати експериментальних досліджень впливу різних режимів різання на шорсткість поверхні загартованої сталі високої твердості, отриманої після торцевого фрезерування інструментом із полікристалічного кубічного нітриду бору (ПКНБ) без покриттів та зі зносостійкими покриттями. Метою дослідження було порівняння показників шорсткості поверхні загартованої сталі, що отримані при торцевому фрезеруванні інструментом без покриттів та з покриттями TiSiN і TiAlN. Під час експериментальних досліджень розглядалися різні параметри різання, такі як подача, глибина різання, схема різання для визначення їх впливу на шорсткість оброблюваної поверхні. Оброблення проводилося на вертикально-фрезерному центрі DMU 80 eVo Deckel Maho із застосуванням торцевої фрези SECO TOOLS зі змінними різальними елементами ( $N = 5$ ). Результати показали, що інструменти з покриттями TiSiN і TiAlN забезпечують меншу шорсткість обробленої поверхні при торцевому фрезеруванні порівняно з використанням інструментів без покриттів. Представлено результати впливу схеми різання (зустрічне, попутне, симетричне різання), впливу різної подачі і глибини різання на шорсткість поверхні загартованої сталі. У статті обґрунтовано та надано рекомендації щодо оптимізації параметрів обробки для досягнення кращих результатів показників шорсткості при торцевому фрезеруванні загартованої сталі з використанням інструментів із ПКНБ зі зносостійкими покриттями та без покриттів у виробничих умовах для підвищення продуктивності та економічної ефективності процесу.

**Ключові слова:** торцеве фрезерування; загартована сталь; полікристалічний кубічний нітрид бору; TiSiN; TiAlN; якість поверхні; шорсткість.

**Актуальність теми.** Дослідження впливу параметрів різання на шорсткість оброблюваної поверхні загартованої сталі інструментами з ПКНБ з покриттями TiSiN, TiAlN та без покриттів обумовлене постійним зростанням вимог до продуктивності, якості та економічної ефективності виробничих процесів у сучасній промисловості. Зокрема, в галузях машинобудування, авіації, автомобілебудування та виробництва прес-форм та штампів, де використовуються матеріали з високою твердістю, необхідно забезпечувати високу точність та якість оброблених поверхонь за мінімальних витрат на обслуговування інструментів.

Розуміння впливу різних режимів різання на якість поверхні є критично важливим для оптимізації виробничих процесів. Використання інструментів із ПКНБ з покриттями TiSiN та TiAlN відкриває нові можливості для підвищення довговічності інструментів та покращення шорсткості оброблюваної поверхні. Проведення таких досліджень дозволить розробити рекомендації щодо оптимальних параметрів різання, що сприяють зниженню витрат на виробництво та підвищенню конкурентоспроможності продукції.

Таким чином, тема є надзвичайно актуальною для сучасного машинобудування, оскільки результати досліджень можуть забезпечити значні покращення в технологічних процесах та підвищити ефективність і якість при виробництві деталей із загартованих сталей.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори.** Аналіз літературних джерел свідчить, що основна увага досліджень спрямована на токарну обробку загартованих сталей [1–4], де вивчали стійкість різальних пластин та вплив параметрів різання, таких як глибина різання, подача та швидкість різання, на шорсткість поверхні. Процесам торцевого фрезерування загартованої сталі було приділено мало уваги, тому вивчення оброблюваності сталі, показників шорсткості отриманих після торцевого фрезерування різальними пластинами з ПКНБ є важливим завданням для покращення технологічних процесів виготовлення плоских поверхонь виробів.

У [8] визначено вплив умов різання (швидкості різання, подачі, глибини різання) на шорсткість поверхні загартованої сталі AISI 4140 (58 HRC) при торцевому фрезеруванні інструментом, що оснащений КНБ (пластина CBN R245 12T3 E CB50). Низькі швидкості різання пошкоджували поверхню, а поєднання найбільшої подачі та найбільшої глибини різання призводило до погіршення якості поверхні. Найкращі показники шорсткості поверхні отримано в діапазоні 0,16–0,4 Ra та визначено, що найбільше на якість поверхні впливає подача на зуб, але в роботі не визначено вплив умов різання на сили різання.

Досліджено [9] шорсткість поверхні сталі обробленої торцевим фрезеруванням при симетричній схемі різання. Отримано залежність показників шорсткості поверхні від швидкості різання (від 100 до 500 м/хв). Значення шорсткості значно зменшуються при збільшенні швидкості різання з 100 до 200 м/хв, після чого стає майже мінімальною. З точки зору однорідності, поверхня, яка оброблена при швидкості різання 300 м/хв, дала найкращий результат. Але автори не враховували вплив таких факторів, як подача і глибина різання на показники шорсткості обробленої поверхні, що є додатковим напрямом для подальших досліджень.

**Метою статті** є встановлення впливу режимів різання на шорсткість поверхні загартованої сталі при торцевому фрезеруванні інструментом без покриттів та з покриттям TiSiN і TiAlN.

**Матеріал і методика.** Для проведення експериментальних досліджень було вибрано сталь 4X5MΦC твердістю 63 HRC. Застосовано інструменти із ПКНБ без покриттів і з покриттями TiSiN і TiAlN (DBS- 900; CBN200; CH3515; DSC500; CBN200 з покриттям TiSiN; CH3505 з покриттям TiAlN).

На рисунку 1 зображено заготовку зі сталі 4X5MΦC розміром 110×60×60.



Рис. 1. Заготовка загартованої сталі 4X5MΦC

Хімічний склад загартованої сталі 4X5MΦC зображено в таблиці 1.

Хімічний склад загартованої сталі 4X5MΦC, %

Таблиця 1

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V	Cu
0.32–0.4	0.9–1.2	0.2–0.5	0.4	0.03	0.03	4.5–5.5	1.2–1.5	0.3–0.5	0.3

Заготовки оброблювалися на вертикально-обробному центрі 80 eVo Deckel Maho (рис. 2).

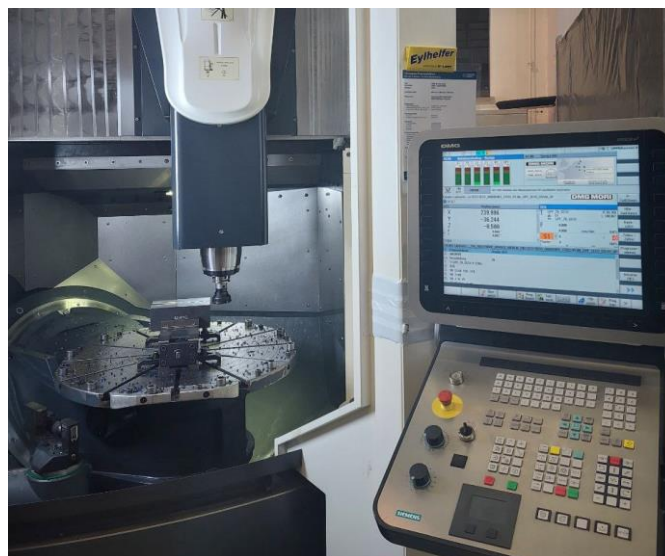


Рис. 2. Вертикально-обробний центр 80 eVo Deckel Maho

Використовували торцеву фрезу SECO TOOLS діаметром 63 мм, оснащену однією круглою пластиною (рис. 3).

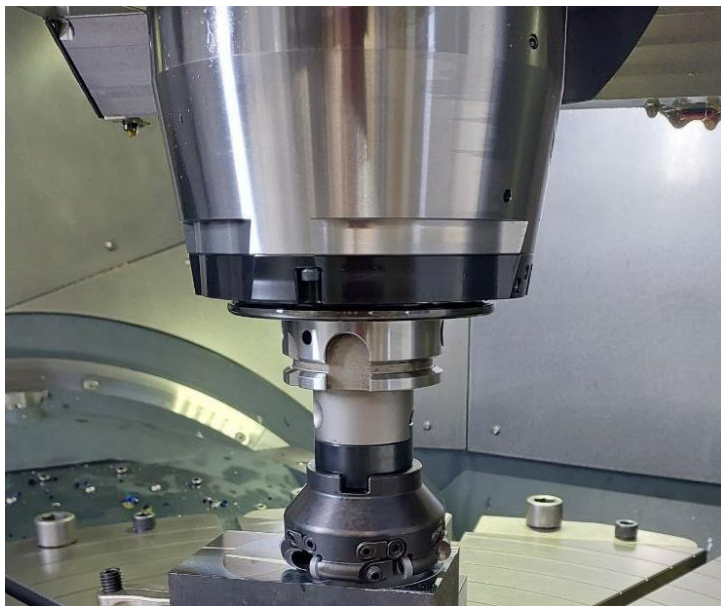


Рис. 3. Торцева фреза SECO TOOLS діаметром 63 мм

Після торцевого фрезерування загартованої сталі 4X5МФС, для подальшої оцінки показників шорсткості обробленої поверхні, використовували цифровий портативний профілометр-профілограф «Surftest 301» (рис. 4).



Рис. 4. Цифровий портативний профілометр-профілограф «Surftest»

**Результати досліджень.** Досліджено вплив глибини різання (0.3, 0.5 мм) на показники шорсткості поверхні загартованої сталі 4X5МФС при торцевому фрезеруванні різальними пластинами із ПКНБ 6 видів (DBS-900; CBN200; CH3515; DSC500; CBN200 з покриттям TiSiN; CH3505 з покриттям TiAlN) при швидкості різання 120 м/хв і подачі 0.125 мм/зуб (рис. 5).

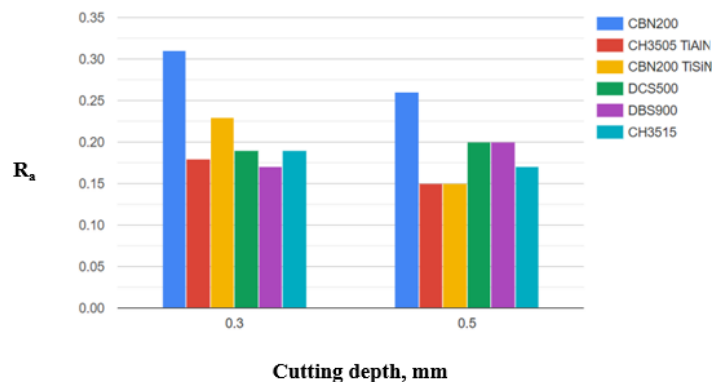


Рис. 5. Вплив глибини різання (0.3, 0.5 мм) на показники шорсткості поверхні, обробленої 6 видами різальних пластин (DBS-900; CBN200; CH3515; DCS500; CBN200 з покриттям TiSiN; CH3505 з покриттям TiAlN) при  $V_c = 120$  м/хв,  $f = 0.125$  мм

Вплив подачі ( $f = 0.075, 0.1, 0.125$ ) на шорсткість отриманої поверхні загартованої сталі Н13 після торцевого фрезерування 6 видами різальних пластин із ПКНБ показано на рисунку 6.

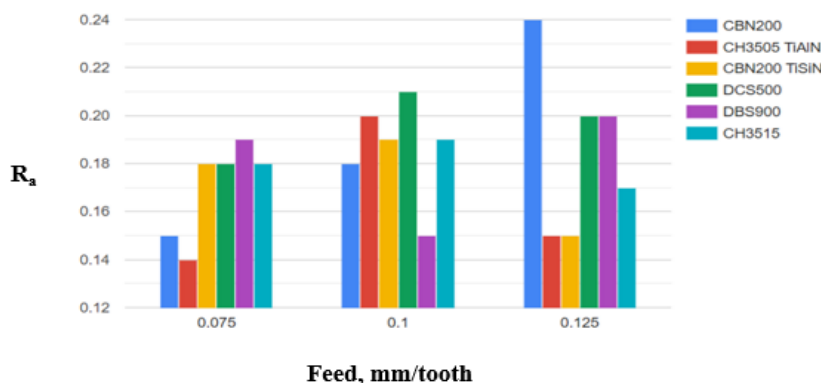


Рис. 6. Вплив подачі (0.075, 0.1, 0.125 мм/зуб) на показники шорсткості поверхні, обробленої 6 видами різальних пластин (DBS-900; CBN200; CH3515; DCS500; CBN200 з покриттям TiSiN; CH3505 з покриттям TiAlN) при  $V_c = 120$  м/хв,  $d = 0.5$  мм

Визначено вплив схеми різання (попутне /зустрічне) на шорсткість поверхні загартованої сталі Н13, обробленої при торцевому фрезеруванні різальними пластинами 6 видів (DBS-900; CBN200; CH3515; DCS500; CBN200 з покриттям TiSiN; CH3505 з покриттям TiAlN) при швидкості різання 120 м/хв і подачі 0.1 мм/зуб (рис. 7).

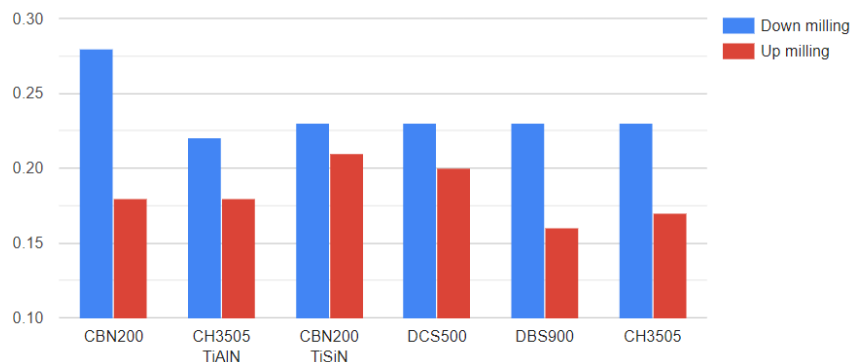


Рис. 7. Вплив схеми різання (попутне /зустрічне) на шорсткість поверхні при торцевому фрезеруванні різальними пластинами 6 видів (DBS-900; CBN200; CH3515; DCS500; CBN200 з покриттям TiSiN; CH3505 з покриттям TiAlN) при швидкості різання 120 м/хв і подачі 0.1 мм/зуб

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Отримані експериментальні результати показують, що інструменти з ПКНБ з покриттями TiSiN та TiAlN забезпечують вищу якість поверхні порівняно з інструментами без покриттів. Дослідження впливу глибини різання (0,3, 0,5 мм) на шорсткість поверхні виявило, що при глибині різання 0,5 мм різальними пластинами CH3505 з покриттям TiAlN та CBN200 з покриттям TiSiN отримано кращу шорсткість (0,15 μm) порівняно з іншими пластинами. При визначенні впливу подачі (0,075, 0,1, 0,125 мм/зуб) на показники шорсткості поверхні, обробленої різальними пластинами 6 типів (DBS-900; CBN200; CH3515; DSC500; CBN200 з покриттям TiSiN; CH3505 з покриттям TiAlN) найкращі показники отримано при обробці пластиною CH3505 з покриттям TiAlN (0,14, 0,15 μm) та CBN200 з покриттям TiSiN (0,18, 0,15 μm) при подачах 0,075 та 0,125 мм/зуб. При зустрічній схемі різання показники шорсткості значно нижчі, ніж при попутній схемі різання. Порівнюючи всі значення, що отримані при попутній схемі різання, видно, що найкращі показники отримані при торцевому фрезеруванні різальною пластиною CH3505 з покриттям TiAlN (0,22 μm). При зустрічній схемі різання найнижча шорсткість отримана при обробці різальною пластиною DBS900 з вмістом КНБ 90 % (0,16 μm). Результати дослідження підтверджують важливість правильного вибору інструментів із ПКНБ з покриттями та параметрів різання для досягнення низької шорсткості оброблюваної поверхні загартованої сталі. Це сприяє підвищенню ефективності та економічної доцільності виробничих процесів у сучасній машинобудівній промисловості. Автори передбачають розширити дослідження для інших марок загартованої сталі для подальших досліджень.

#### Список використаної літератури:

1. *Stakhniv N.E.* The study of the influence of cutting conditions on machined surface roughness in turning hardened steels with cutting tools of cBN based composite / *N.E. Stakhniv* // *Journal of Superhard Materials*. – 2013. – Vol. 35, Issue 3. – P. 166–174.
2. *Derakhshan E.D.* Experimental investigation on the effect of workpiece hardness and cutting speed on surface roughness in hard turning with CBN tools / *E.D. Derakhshan, A.A. Akbari* // *Proceedings of the World Congress on Engineering 2009, July 1–3*. – London, U.K., 2009. – Vol. II.
3. *Yalçın B.* Surface roughness and cutting forces in turning of tool steel with mixed ceramic and cubic boron nitride cutting tools / *B.Yalçın* // *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*. – 2015. – Vol. 39, Issue 2. – P. 323–336.
4. *Sahin Y.* Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool / *Y.Sahin, A.R. Motorcu* // *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. – 2008. – Vol. 26. – P. 84–90.
5. Високошвидкісне точіння деталей з загартованих сталей інструментами, що оснащені матеріалами на основі кубічного нітриду бору / *Ю.О. Мельничук, І.А. Петруша, С.А. Клименко та ін.* // *Інструментальний світ*. – 2015. – № 1–4 (61–64). – С. 13–15.
6. *Клименко С.А.* Аналітична оцінка величини температурних спалахів на контактних поверхнях інструменту з полікристалічних надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору / *С.А. Клименко, С.Ан. Клименко, В.В. Бурякин* // *Процеси механічної обробки в машинобудуванні* : зб. наук. пр. – Житомир : ЖДТУ, 2012. – Вип. 12. – С. 58–66.
7. Cutting performance of binderless nanopolycrystalline cBN and PcBN milling tools for high-speed milling of hardened steel / *D.Wang, L.Yin, A.Hänel and other* // *Ceramics International*. – 2023. – Vol. 49, Issue 22, Part A. – P. 34757–34773.
8. Experimental numerical model of roughness in finishing face milling of AISI 4140 hardened steel / *M.S. Filho, M.A. Stipkovic, É.C. Bordinassi and other* // *Advanced Structured Materials*. – 2017. – P. 83–91.
9. Investigation of surface roughness on face milled parts with round insert in planes parallel to the feed at various cutting speeds / *J.Kundrak, A.Nagy, A.P. Markopoulos, N.E. Karkalos* // *Cutting & tool in technological system*. – 2019. – Issue 91. – P. 1–6.

#### References:

1. Stakhniv, N.E. (2013), «The study of the influence of cutting conditions on machined surface roughness in turning hardened steels with cutting tools of cBN based composite», *Journal of Superhard Materials*, Vol. 35, Issue 3, pp. 166–174.
2. Derakhshan, E.D. and Akbari, A.A. (2009), «Experimental investigation on the effect of workpiece hardness and cutting speed on surface roughness in hard turning with CBN tools», *Proceedings of the World Congress on Engineering 2009, July 1–3, Vol II, London, U.K.*
3. Yalçın, B. (2015), «Surface roughness and cutting forces in turning of tool steel with mixed ceramic and cubic boron nitride cutting tools», *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 39, Issue 2, pp. 323–336.
4. Sahin, Y. and Motorcu, A.R. (2008), «Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool», *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, Vol. 26, pp. 84–90.
5. 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 nityrydu boru», *Instrumentalniy svit*, No. 1–4 (61–64), pp. 13–15.
6. Klymenko, S.A., Klymenko, S.An. and Burykin, V.V. (2012), «Analitychna otsinka velychyny temperaturnykh spalakhiv na kontaknykh poverkhniakh instrumentu z polikrystalichnykh nadtverdykh materialiv na osnovi kubichnoho nityrydu», *Protsesy mekhanichnoi obrobky v mashynobuduvanni*, zb. nauk. pr., ZhDTU, Zhytomyr, Issue 12, pp. 58–66.

7. Wang, D., Yin, L., Hänel, A. et al. (2023), «Cutting performance of binderless nanopolycrystalline cBN and PcBN milling tools for high-speed milling of hardened steel», *Ceramics International*, Vol. 49, Issue 22, Part A, pp. 34757–34773.
8. Filho, M.S., Stipkovic, M.A., Bordinassi, É.C. et al. (2017), «Experimental numerical model of roughness in finishing face milling of AISI 4140 hardened steel», *Advanced Structured Materials*, pp. 83–91.
9. Kundrak, J., Nagy, A., Markopoulos, A.P. and Karkalos, N.E. (2019), «Investigation of surface roughness on face milled parts with round insert in planes parallel to the feed at various cutting speeds», *Cutting & tool in technological system*, Issue 91, pp. 1–6.

**Коваленко Яна** Павлівна – аспірант Державного університету «Житомирська політехніка».  
<https://orcid.org/0000-0002-0086-2036>.

Наукові інтереси:

- процеси механічної обробки;
- захисні покриття 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;
- технологія машинобудування.

**Kovalenko Ya.P., Melnychuk P.P.**

#### **Finish machining of hardened steel by face milling using uncoated and TiSiN and TiAlN coated PCBN tools**

The article presents the results of experimental studies on the influence of various cutting regimes on the surface roughness of high-hardness hardened steel obtained after face milling with polycrystalline cubic boron nitride (PCBN) tools, both uncoated and with wear-resistant coatings. The aim of the research was to compare the surface roughness indices of hardened steel obtained by face milling using tools with PCBN without coatings and with TiSiN and TiAlN coatings. Various cutting parameters such as feed rate, cutting depth, and cutting scheme were considered to determine their impact on the machined surface roughness. The machining was performed on a vertical milling center DMU 80 eVo Deckel Maho using a SECO TOOLS face mill with replaceable cutting elements (N = 5). The results showed that tools with TiSiN and TiAlN coatings provided a lower surface roughness in face milling compared to uncoated tools. The influence of cutting schemes (up-milling, down-milling, symmetric milling), feed rates, and cutting depths on the surface roughness of hardened steel were analyzed. The article substantiates and provides recommendations for optimizing cutting parameters to achieve better surface roughness results when face milling hardened steel with PCBN tools with and without wear-resistant coatings in production conditions, enhancing process productivity and economic efficiency.

**Keywords:** face milling; hardened steel; polycrystalline cubic boron nitride; TiSiN; TiAlN; surface quality; roughness.

Стаття надійшла до редакції 24.09.2024.