

КОВАЛЕНКО ЯНА

Державний університет «Житомирська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-0086-2036>e-mail: kmi_kyap@ztu.edu.ua**МЕЛЬНИЧУК ПЕТРО**

Державний університет «Житомирська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-7071-651X>e-mail: melnychukpp1952@ztu.edu.ua

ЕФЕКТИВНІСТЬ ФІНІШНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ ЗАГАРТОВАНИХ СТАЛЕЙ ІНСТРУМЕНТОМ З ПОЛІКРИСТАЛІЧНОГО КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ

У статті представлено результати дослідження ефективності процесу фінішного торцевого фрезерування загартованої сталі 4X5MΦC інструментом, оснащеним полікристалічним кубічним нітридом бору (ПКНБ) групи VL і ВН без покриттів та із зносостійкими покриттями. Фінішне торцеве фрезерування загартованих сталей є одним із ключових технологічних процесів у сучасному машинобудуванні, зокрема у виготовленні штампів, прес-форм, ріжучого та формуючого інструменту тощо. Застосування ПКНБ, як інструментального матеріалу дозволяє суттєво підвищити ефективність обробки, забезпечуючи стабільність процесу та отримання високої якості обробленої поверхні виробів. Авторами досліджено вплив геометричних параметрів ріжучої пластини, зокрема від'ємних кутів фаски -20° і -25° на формування мікрорельєфу поверхні після торцевого фрезерування загартованої сталі 4X5MΦC. Експериментальні дослідження показали, що при обробці інструментом з фаскою -25° (ріжуча пластинка DBS900) шорсткість поверхні була нижчою ($Ra < 0.3$ мкм), ніж при обробці інструментом з фаскою -20° (ріжуча пластинка CBN200), що пов'язано з більш рівномірним розподілом навантаження, зменшенням мікровідколів та більш стабільним процесом. Досліджено вплив подачі на якість обробленої поверхні загартованої сталі 4X5MΦC після торцевого фрезерування інструментом із ПКНБ та виявлено, що при збільшенні подачі з 0.1 мм/зуб до 0.125 мм/зуб шорсткість поверхні зменшилася ($Ra = 0.3$ мкм, $Ra = 0.34$ мкм). Це пояснюється тим, що при меншій подачі товщина зрізу може бути близькою до мінімальної товщини стружки, що спричиняє ефект ковзання інструмента по матеріалу замість простого зрізання, викликаючи мікрореформації та погіршення шорсткості. Окремо розглянуто формування залишкових напружень поверхневого шару, зокрема отримано результати впливу покриття TiSiN на формування залишкових напружень у поверхневому шарі. Дослідження показали, що інструмент без покриття створює розтягуючі залишкові напруження, тоді як інструмент із покриттям TiSiN формує стискаючі напруження. Це пояснюється тим, що покриття зменшує коефіцієнт тертя, що знижує локальне нагрівання поверхні та мінімізує пластичні деформації, що сприяє утворенню стискальних напружень, які підвищують довговічність деталі. Отримані результати підтверджують ефективність застосування ріжучих пластин із ПКНБ для фінішного торцевого фрезерування загартованої сталі 4X5MΦC. Використання ріжучих пластин з фаскою -25° та покриттям TiSiN дозволяє досягти нижчої шорсткості обробленої поверхні та формувати сприятливі стискаючі залишкові напруження, що підвищує експлуатаційну надійність деталей та довговічність. За допомогою поліноміальної регресії визначено коефіцієнт кореляції (0.95) в математичній моделі процесу торцевого фрезерування, зокрема встановлено вплив параметрів різання на передбачувані показники шорсткості поверхні, які в результаті були порівняні з даними, що отримані при експериментальних дослідженнях.

Ключові слова: торцеве фрезерування, загартована сталь, полікристалічний кубічний нітрид бору, шорсткість, якість поверхні, режими різання.

KOVALENKO YANA**MELNYCHUK PETRO**

Zhytomyr Polytechnic State University

EFFICIENCY OF FINISH FACE MILLING OF HARDENED STEELS WITH POLYCRYSTALLINE CUBIC BORON NITRIDE (PCBN) TOOLS

The article presents the results of a study on the efficiency of the finish face milling process of hardened steel 4X5MFS using cutting inserts made of polycrystalline cubic boron nitride (PCBN) of the BL and BH groups, both uncoated and with wear-resistant coatings. Finish face milling of hardened steels is one of the key technological processes in modern mechanical engineering, particularly in the manufacturing of dies, molds, cutting, and forming tools. The application of PCBN as a tool material significantly enhances machining efficiency by ensuring process stability and achieving a high-quality machined surface. The study investigates the effect of the geometric parameters of the cutting insert, specifically negative chamfer angles of -20° and -25° , on the formation of the microrelief of the surface after face milling of hardened steel 4X5MFS. Experimental studies showed that machining with an insert having a -25° chamfer (DBS900 cutting insert) resulted in a lower surface roughness ($Ra < 0.3$ μm) compared to machining with a -20° chamfer (CBN200 cutting insert). This effect is attributed to a more uniform load distribution, reduced microchipping, and a more stable cutting process. The effect of the feed rate on the quality of the machined hardened steel 4X5MFS surface after face milling with PCBN tools was also examined. It was found that increasing the feed rate from 0.1 mm/tooth to 0.125 mm/tooth resulted in a decrease in surface roughness ($Ra = 0.3$ μm , $Ra = 0.34$ μm). This phenomenon is explained by the fact that at lower feed rates, the chip thickness may approach the minimum chip thickness, leading to a sliding effect of the tool on the material instead of a clean cut, which causes micro-deformations and worsens surface roughness. Additionally, the study analyzed the formation of residual stresses in the surface layer, particularly the influence of the TiSiN coating on residual stress formation. The results showed that uncoated tools generate tensile residual stresses, whereas TiSiN-coated tools create compressive residual stresses. This effect is attributed to the lower friction coefficient of the coating, which reduces local heating of the surface and minimizes plastic deformations, thereby promoting the formation of compressive stresses that enhance the durability of the component. The obtained results confirm the effectiveness of using PCBN cutting inserts for finish face milling of hardened steel 4X5MFS. The application of cutting inserts with a -25°

chamfer and TiSiN coating allows for achieving lower surface roughness and forming favorable compressive residual stresses, which improves the operational reliability and longevity of the machined components. Using polynomial regression, a correlation coefficient of 0.95 was determined in the mathematical model of the face milling process. In particular, the influence of cutting parameters on the predicted surface roughness values was established, and the obtained mathematical predictions were compared with the experimental data.

Keywords: face milling, hardened steel, polycrystalline cubic boron nitride, roughness, surface quality, cutting conditions.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Фінішне торцеве фрезерування загартованих сталей є важливим технологічним процесом у різних галузях промисловості, зокрема в машинобудуванні: для виготовлення прес-форм, штампів, ріжучого та формуючого інструменту тощо. Основні вимоги до цього процесу включають отримання високої точності виробів, мінімальної шорсткості контактуючих поверхонь та сприятливого типу внутрішніх залишкових напружень, що визначають в повній мірі експлуатаційні параметри виробів. Традиційно для фінішної обробки плоских поверхонь загартованих сталей застосовується торцеве шліфування, яке забезпечує шорсткість поверхні 0.1-0.2 мкм, але є енерговитратним, малопродуктивним і вимагає застосування складного високотехнологічного обладнання, що призводить до зменшення ресурсу інструменту. Водночас, торцеве фрезерування інструментами із ПКНБ групи BL і ВН є перспективною альтернативою оброблення сталей високої твердості.

Для забезпечення ефективності процесу торцевого фрезерування загартованих сталей необхідно обґрунтовано підбирати високотехнологічне обладнання, відповідний ріжучий інструмент з різними формами ріжучих пластин та геометрією, використати раціональні режими різання і застосувати зносостійкі покриття для інструменту, що впливають на шорсткість обробленої поверхні та залишкові внутрішні напруження.

Наразі недостатньо досліджено вплив геометрії інструменту, зокрема від'ємних кутів ріжучої пластини, розподіл навантажень і формування шорсткості поверхні отриманої після торцевого фрезерування інструментами, що оснащені ПКНБ. Окрім того, відкритим залишається питання впливу покриттів (наприклад TiSiN) на механізм зношування інструмента, термічні ефекти у зоні різання та утворення залишкових внутрішніх напружень у поверхневого шару загартованої сталі.

Таким чином, актуальною задачею є забезпечення ефективності процесу фінішного торцевого фрезерування загартованих сталей використанням інструменту, оснащеного ПКНБ шляхом аналітичного огляду і лабораторних досліджень оцінки впливу геометрії інструменту, режимів різання, зносостійкого покриття TiSiN на шорсткість поверхні та на внутрішні залишкові напруження. Це дозволить розробити рекомендації щодо забезпечення ефективності такої обробки та покращення експлуатаційних параметрів виробів.

Аналіз досліджень та публікацій

Вітчизняними та зарубіжними науковцями підтверджується висока ефективність процесів різання при застосуванні лезового інструменту із ПКНБ різних груп, що базується на розумінні застосування фінішного торцевого фрезерування сталей високої твердості [1-6].

Автори [7] встановили, що обробка деталей із загартованих сталей з використанням раціональних параметрів різання при торцевому фрезеруванні дозволяє збільшити розмірну стійкість інструмента, отримати мінімальну шорсткість поверхні, а також більш стабільний та рівномірний розподіл залишкових внутрішніх напружень поверхневого шару.

Проблеми, що виникають при обробці загартованих сталей високої твердості розглянуті не в повному обсязі і залишається багато невирішених задач з огляду на процеси оптимізації трибологічних та термобаричних процесів при фінішному торцевому фрезеруванні.

Формулювання цілей статті

Метою роботи: викласти результати експериментальних даних, отримані при лабораторних дослідженнях щодо забезпечення ефективності (високої якості обробленої поверхні та покращення експлуатаційних параметрів деталей виробів) процесу фінішного торцевого фрезерування загартованих сталей інструментом із ПКНБ шляхом вибору раціональної геометрії пластини, режимів різання та застосування зносостійких покриттів ріжучих пластин.

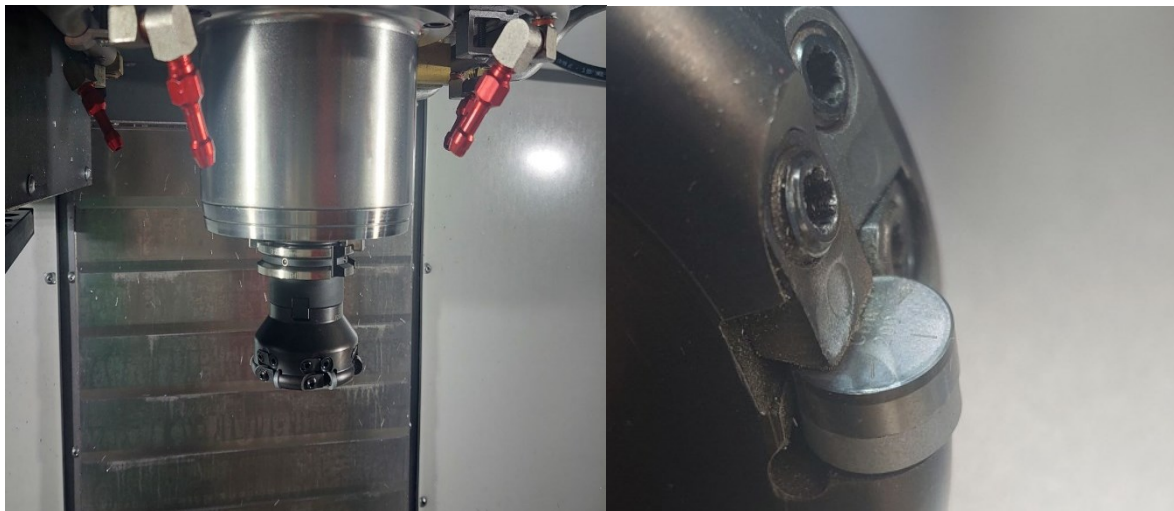
Виклад основного матеріалу

Методика дослідження. В лабораторних дослідженнях застосовувалася загартована сталь 4X5MФC твердістю 62 HRC. Сталь легована такими елементами як Cr, V, Mo, що збільшує теплостійкість і в'язкість. Важливою властивістю сталі 4X5MФC є здатність якісно і рівномірно загартовуватися, не змінюючи твердість на всю глибину заготовки, а також в подальшому не змінювати свій рівень міцності під дією високих температур в умовах механічного навантаження. Оброблення загартованих сталей торцевим фрезеруванням проводилося на 5-координатному вертикально-фрезерному верстаті DMU 80 eVo Deckel Maho (Рис.1.)

На Рис.2.а зображено торцеву фрезу SECOTOOLS діаметром 63 мм (6 ріжучих елементів) з вбудованим кутом нахилу - 6° з механізмом кріплення - клинове притискання.



Рис.1. Вертикально-фрезерний верстат DMU 80 eVo Deckel Maho



а) торцева фреза SECOTOOLS б) пластина CBN200 із ПКНБ групи ВН з фаскою - 20°
Рис.2. Ріжучий інструмент

Ріжучі пластини фірми SECOTOOLS (Рис.2.б) із ПКНБ групи ВН з від'ємними кутами – DBS900 (фаска -25°), CBN 200 (фаска -20°), CBN200 з покриттям TiSiN (фаска -20°).

Показники шорсткості поверхні загартованої сталі 4X5МФС після торцевого фрезерування були виміряні цифровим портативним профілометром-профілографом Surftest 301 (Рис.3).



Рис.3. Цифровий портативний профілометр-профілограф Surftest 301

Визначення показників шорсткості поверхні загартованої сталі 4X5МФС після торцевого фрезерування інструментом, оснащеним ріжучими пластинами із ПКНБ включали такі дослідження:

1) вплив зміни режимів різання (подачі) на шорсткість обробленої поверхні (заготовка 1 і заготовка 2);

2) вплив різної геометрії ріжучої пластини (фаска -20° і -25°) на шорсткість обробленої поверхні (заготовка 3 і заготовка 4)

Дослідження 1. Заготовка 1 і заготовка 2 оброблювались ріжучою пластиною із ПКНБ **DBS-900** при швидкості різання в діапазоні від 100 м/хв до 200 м/хв, при подачі – 0.1 мм/зуб (заготовка 1), 0.125 мм/зуб (заготовка 2).

Дослідження 2. Заготовка 3 і заготовка 4 оброблювались ріжучою пластиною із ПКНБ **CBN200 з покриттям TiSiN**. Діапазон швидкості різання та глибина різання залишалась як і при обробці 1 і 2 заготовки. Подача для 3 заготовки – 0.1 мм/зуб, для заготовки 4 – 0.125 мм/зуб.

Кожна заготовка загартованої сталі 4X5МФС розміром 150*60*15 поділялася на 6 ділянок (відстань ділянок – 18.9 мм), де для кожної ділянки було встановлено відповідне значення швидкості різання (Ділянка 1 – 100 м/хв; 2 – 120 м/хв; 3 – 140 м/хв; 4 – 160 м/хв; 5 – 180 м/хв; 6 – 200 м/хв). Схема розподілення діапазонів швидкості різання зображено на Рис.4.

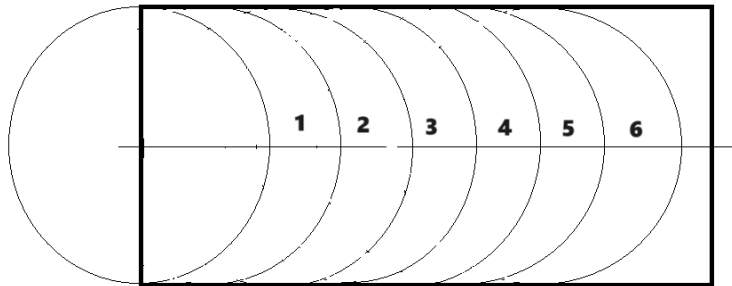


Рис.4. Схема розподілення діапазонів швидкості різання при торцевому фрезеруванні загартованої сталі інструментом із ПКНБ (Діапазон 1 – 100 м/хв; 2 – 120 м/хв; 3 – 140 м/хв; 4 – 160 м/хв; 5 – 180 м/хв; 6 – 200 м/хв)

Дослідження внутрішніх залишкових напружень. Для рентгеноструктурних досліджень використано дифрактометр Rigaku Ultima IV (випромінювання $\lambda_{Cu\alpha}$ -Cu, довжина хвилі ~ 1.54 Å): інтервал кутів $2\Theta = 20^\circ - 120^\circ$, крок реєстрації – 0.04° , час витримки в точці – 2 сек (Рис.5).



Рис.5. Дифрактометр Rigaku Ultima IV

Для аналізу та подальшого порівняння обрано два зразки заготовки загартованої сталі 4X5МФС (розмір 15×15×15 мм). Перший зразок був оброблений ріжучою пластиною CBN200 без покриття при швидкості різання 100 м/хв, глибина різання 0.5 мм, подача 0.125 мм/зуб. Другий зразок оброблений ріжучою пластиною CBN200 з покриттям TiSiN при таких самих режимах як і перший зразок. Для аналізу отриманих рентгенівських спектрів, розрахунку розміру областей когерентного розсіяння, ступеню деформації кристалічної ґратки (ϵ) та кількісного фазового аналізу використано програмне забезпечення PDXL, міжнародну базу даних дифракції ICDD (PDF-2 (2024)). Кількісний фазовий аналіз проведено

методом RIR (Reference Intensity Ratio), який полягає у порівнянні відношення інтенсивності найбільш сильних рефлексів фази і корунду в їхній суміші з масовими частками.

Методика математичного моделювання

Поліноміальна регресія дозволяє моделювати нелінійні залежності за допомогою поліномів певного степеня. Поліноміальне рівняння застосовується для прогнозування значень залежної змінної, зокрема в роботі залежна змінна це глибина різання.

Знаходимо багатофакторну степеневу регресійну модель:

$$Ra = C_0 + W^{b_1} g^{b_2} S^{b_3} \quad (1)$$

де C_0 , W^{b_1} , g^{b_2} , S^{b_3} – невідомі коефіцієнти, які потрібно знайти за допомогою регресійного аналізу моделі.

Для того, щоб застосувати метод найменших квадратів і знайти невідомі коефіцієнти C_0 , b_1 , b_2 , b_3 перетворюємо степеневу регресійну модель (10) за допомогою логарифмування у лінійну регресійну модель:

$$\ln Ra = \ln C_0 + b_1 \ln W + b_2 \ln g + b_3 \ln S \quad (2)$$

Після цього $\ln Ra = y$, $\ln C_0 = b_0$, $\ln W = x_1$, $\ln g = x_2$, $\ln S = x_3$.

Тоді рівняння (11) у нових змінних буде виглядати так:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (3)$$

Для перевірки статистичної значущості коефіцієнтів множинної регресії застосовують критерій Стьюдента:

$$t_{кр} = t_{кр}(a, n - m - 1) \quad (4)$$

a – рівень значущості (альфа), який показує ймовірність помилки першого роду (зазвичай a береться рівним 0,05, що відповідає 95% довірчому інтервалу).

N – загальна кількість спостережень або вибірка потужність.

M – кількість параметрів, які оцінюються або вільні параметри в моделі.

$N - m - 1$ – ступені свободи для t -розподілу.

При цьому $t_{кр}$ повинно бути меншим за t_i ($|t_i| > |t_{кр}|$). У цьому випадку оцінка a_i відповідного коефіцієнта рівняння регресії є статистично значимою. У противному разі відповідну змінну необхідно виключити з рівняння регресії і розрахунок регресії виконати заново.

Перевірка значущості рівняння множинної лінійної регресії здійснюється за F – критерієм Фішера.

Критичне значення $F_{кр}$ знаходиться за допомогою статистичної функції $F_{кр}(a, k_1, k_2)$, де a рівень значущості, $k_1 = m$, $k_2 = n - m - 1$. Значення F за формулою:

$$F = \frac{R^2(n-m-1)}{(1-R^2) \cdot m} \quad (5)$$

При $F > F_{кр}$ рівняння регресії є статистично значущим.

Для оцінки якості прогнозованих моделей передбачається застосування коефіцієнту невідповідності Тейла для виявлення неточності та покращення точності прогнозування.

$$K_T = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - y_{t \text{ розр}})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y_t^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{i \text{ розр}}^2}} \quad (6)$$

Для вимірювання середнього абсолютного відхилення прогнозованих значень від фактичних абсолютний показник зміщення прогнозу виглядає так:

$$M.E. = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{i \text{ розр}}) \quad (7)$$

де n – кількість проходів;

y_i – фактичне значення;

$y_{i \text{ розр}}$ – прогнозоване значення.

Середня абсолютна похибка прогнозу:

$$M.A.E. = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y_{i \text{ розр}}| \quad (8)$$

Середньоквадратична похибка прогнозу:

$$M.S.E. = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - y_{t \text{ розр}})^2} \quad (9)$$

Отримавши відносну похибку числа, будується графік емпіричної та теоретичної регресії для порівняння отриманих результатів при прогнозуванні та при експериментальних досліджень.

Результати досліджень

Дослідження впливу зміни режимів різання (подачі) на шорсткість обробленої поверхні. На Рис.6. зображено графік порівняння значень шорсткості поверхні після торцевого фрезерування заготовки 1 (при подачі 0.1 мм/зуб) та заготовки 2 (при подачі 0.125 мм/зуб) при швидкості різання в діапазоні з 100 м/хв до 200 м/хв і глибини різання 0.5 мм.

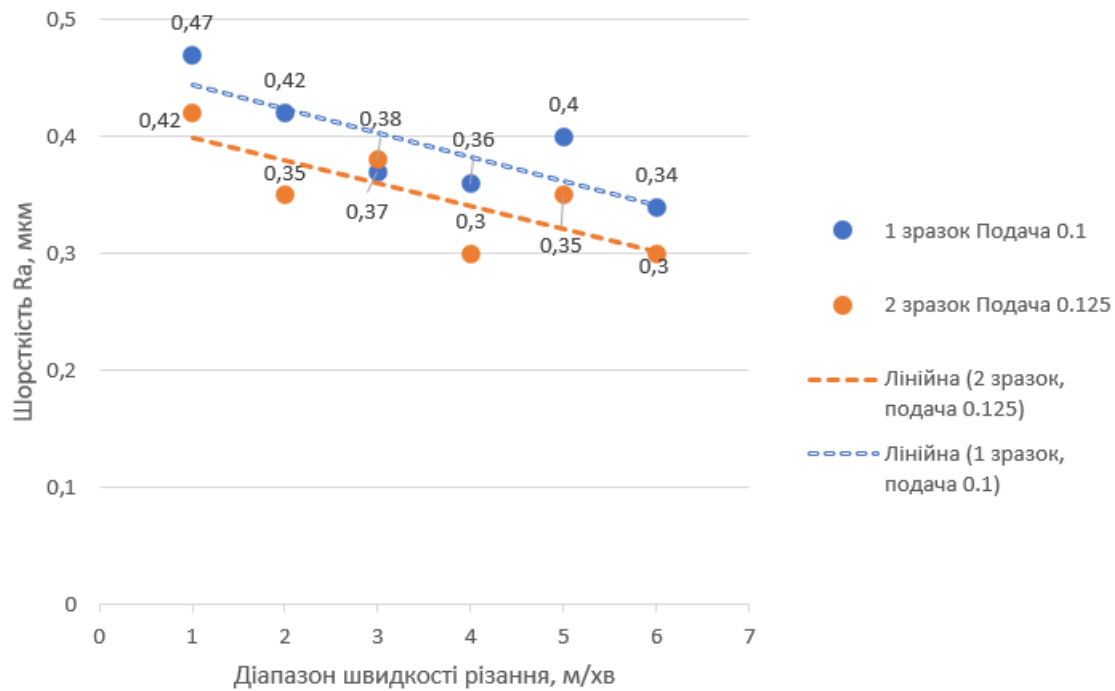


Рис.6. Порівняння значень шорсткості поверхні після торцевого фрезерування заготовки 1 (при подачі 0.1 мм/зуб) та заготовки 2 (при подачі 0.125 мм/зуб) при швидкості різання в діапазоні з 100 м/хв до 200 м/хв і глибини різання 0.5 мм

На графіку видно, що при збільшенні швидкості різання менше шорсткість поверхні після торцевого фрезерування заготовки 1 та заготовки 2. Порівнюючи ці показники шорсткості, що отримані при подачі 0.125 мм/зуб показники шорсткості поверхні заготовки 2 нижче ($R_a = 0.3 \mu\text{m}$), ніж при подачі 0.1 мм/зуб ($R_a = 0.34 \mu\text{m}$).

1) Дослідження впливу різної геометрії пластини на шорсткість отриманої поверхні;

Визначено вплив різної геометрії пластини (фаска -20° і -25°) на шорсткість поверхні загартованої сталі після торцевого фрезерування. Порівняно отримані показники шорсткості поверхні заготовки 1, що оброблена ріжучою пластиною із ПКНБ – DBS900 з фаскою -25° , і шорсткість поверхні заготовки 3, що оброблена пластиною CBN200 з фаскою -20° .

На Рис.7. зображено порівняння показників шорсткості поверхні заготовки 3 і 4, що оброблені при подачі 0.1 мм/зуб, де видно, що менші значення шорсткості поверхні отримано при обробці інструментом, оснащеним пластиною із ПКНБ – DBS900 з фаскою -25° .

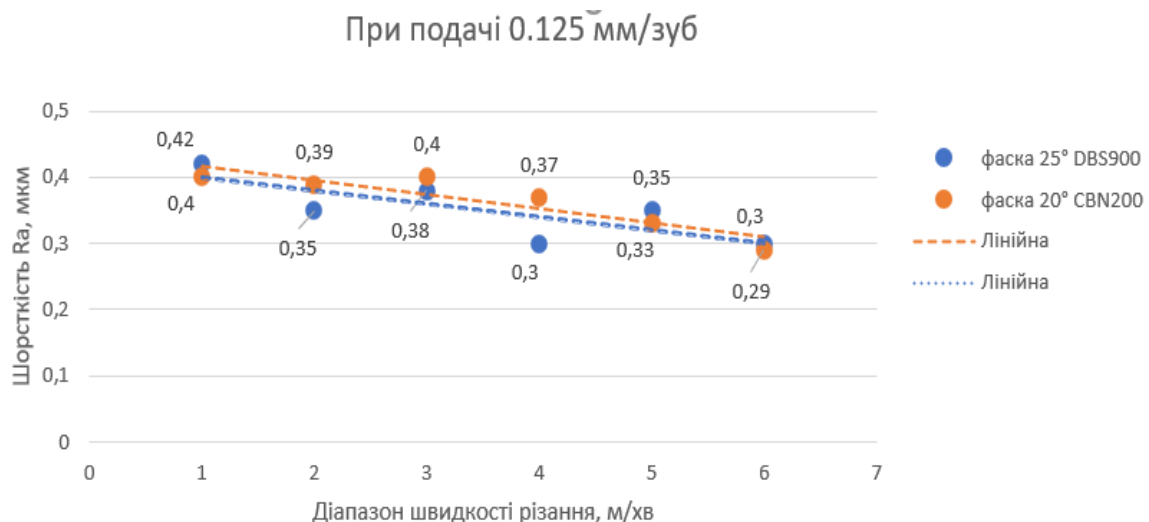


Рис.7. Порівняння показників шорсткості поверхні заготовки 2 і 4 при подачі 0.125 мм/зуб, оброблених інструментом із ПКНБ, оснащеним пластиною DBS900 та CBN200 з покриттям TiSiN

Результати рентгеноструктурних досліджень залишкових внутрішніх напружень в поверхневому шарі загартованої сталі 4X5MФС після торцевого фрезерування інструментом із ПКНБ

За допомогою рентгеноструктурного аналізу досліджено залишкові внутрішні напруження загартованої сталі 4X5MФС, яка була оброблена ріжучою пластиною CBN200 без покриття та пластиною CBN200 з покриттям TiSiN.

Зразок 1 (Ріжуча пластина CBN200 без покриття). Результат, який отримано при дослідженні становить **+578.71 МПа**, що відповідає розтягувальним залишковим напруженням у поверхневому шарі. Позитивний знак + вказує на тяжіння кристалічних шарів назовні, тобто на розтяг у матеріалі.

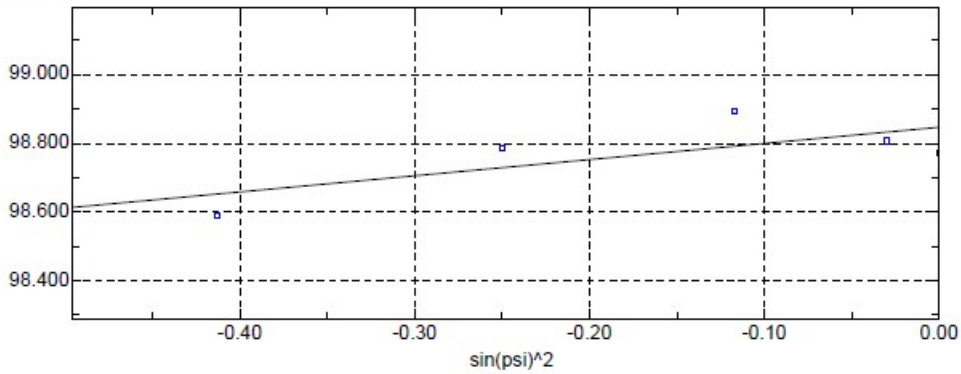


Рис.8. Отримані внутрішні напруження поверхневого шару під час різання ріжучою пластиною CBN200 без покриття

На графіку (Рис.8) видно точки, що відображають зміщення кута дифракції (2Θ) під різними кутами ψ . Лінія тренду має позитивний ухил у просторі « $2\Theta - \sin^2\psi$ », але значення нахилу (Slope) становить -0.47° , що свідчить про особливості перерахунку, який виводить на розтягувальні напруження.

Зразок 2 (Ріжуча пластина CBN200 з покриттям TiSiN). Результат, який отримано при дослідженні становить **-407.70 МПа**, що свідчить про стискуючі (компресійні) напруження у поверхневому шарі після фрезерування. Негативний знак однозначно вказує, що йдеться про компресійні напруження. Кут нахилу (Slope) = 0.33° , що показує чим більше цей нахил, тим більше змінюється період решітки під час нахилів і тим вищі залишкові напруження.

На графіку (Рис.9) видно точки, що відображають зміщення кута дифракції (2Θ) під різними кутами ψ . Положення дифракційного піка 2PT (максимальна інтенсивність) – 98.661° , піковий кут (Peak Angle) – 99.160° .

2theta [deg.]

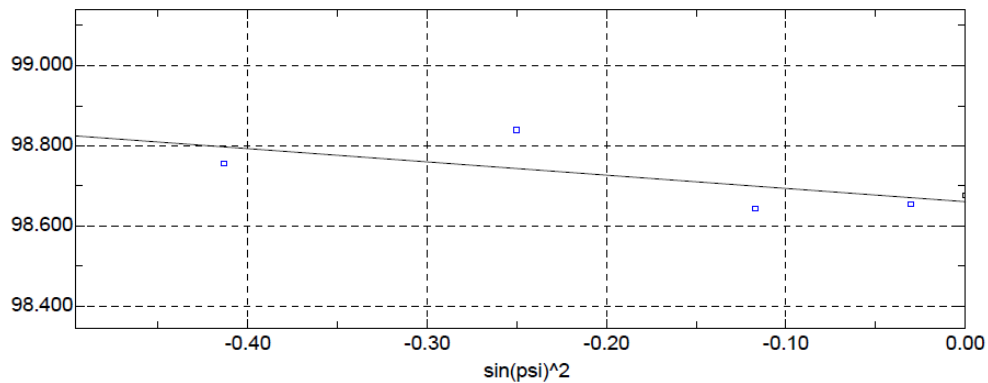


Рис.9. Отримані внутрішні напруження поверхневого шару під час різання ріжучою пластиною CBN200 з покриттям TiSiN

Поліноміальна регресія. Визначено вплив глибини різання (0,5 мм) на шорсткість поверхні, отриманої при різанні ріжучою пластиною CH3505. Параметри різання, зокрема і глибина різання, зображено в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри різання					
№	Ширина врізання інструменту, мм - w	Глибина різання, мм - d	Подача, мм/з - g	Схема різання - S	Шорсткість Ra
1	6,3	0,5	0,125	1	0,24
2	6,3	0,5	0,1	1	0,27
3	6,3	0,5	0,1	3	0,17
4	31,5	0,5	0,125	1	0,23
5	31,5	0,5	0,1	1	0,23
6	31,5	0,5	0,075	3	0,22
7	31,5	0,5	0,1	3	0,17
8	63	0,5	0,1	2	0,19
9	63	0,5	0,125	2	0,17

При застосуванні методу найменших квадратів визначено невідомі коефіцієнти C_0, b_1, b_2, b_3 , і за допомогою логарифмування перетворено степеневу регресійну модель у лінійну регресійну модель (Табл.2).

Таблиця 2

Результати логарифмування перетворено степеневу регресійну модель у лінійну регресійну модель

№	lnW=X1	lnD=X2	lnG=X3	lnS=X4	lnRa=y	lnFx	lnFy	lnFz	lnR
1	1,840549633	0,693147181	-2,07944	0	1,427116356	5,393628	3,218876	5,940171	6,0863226
2	1,840549633	0,693147181	-2,30259	0	-1,30933332	5,075174	2,995732	5,768321	5,8814528
3	1,840549633	0,693147181	-2,30259	1,0986123	1,771956842	3,218876	5,192957	5,828946	5,9545908
4	3,449987546	0,693147181	-2,07944	0	-1,46967597	5,63479	5,768321	6,194405	6,4750753
5	3,449987546	0,693147181	-2,30259	0	-1,46967597	5,63479	5,703782	6,152733	6,4360528
6	3,449987546	0,693147181	-2,59027	1,0986123	1,514127733	5,010635	6,040255	6,109248	6,4513569
7	3,449987546	0,693147181	-2,30259	1,0986123	1,771956842	5,347108	6,224558	6,234411	6,6171536
8	4,143134726	0,693147181	-2,30259	0,6931472	1,660731207	5,521461	5,799093	6,173786	6,4518549

Для оцінки точності прогнозованої моделі застосовано коефіцієнт невідповідності Тейла:

$$K_T = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{i \text{ розр}})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{i \text{ розр}}^2}} = 0,015403477 \quad (10)$$

Коефіцієнт $K_T \approx 0,015$ свідчить про те, що модель передбачає результати і робить це з високою точністю. Це значення вказує на те, що похибки моделі є значно меншими порівняно з варіаціями у фактичних даних.

Для обчислення середньої величини абсолютної похибки між фактичними значеннями і передбаченими є необхідним знаходження середньої абсолютної похибки прогнозу (M.A.E. – Mean Absolute Error):

$$M.A.E. = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y_{i \text{ розр}}| = 0,039586128 \quad (11)$$

Для знаходження середнього значення квадратів різниці між фактичними та передбаченими значеннями обчислюється середньоквадратична похибка прогнозу:

$$M.S.E. = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{i \text{ розр}})^2} = 0,048742882 \quad (12)$$

Коефіцієнт кореляції:

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i \text{ розр} - \bar{y}_{\text{розр}})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = 0,954810143 \quad (13)$$

Для оцінки точності моделі важливо враховувати відносну похибку, що вказує на відсоткове відхилення передбачених значень від фактичних. Результати розрахунків відносної похибки – різниці між фактичним і передбаченим значенням, поділене на фактичне значення зображено в Таблиці 3.

Таблиця 3

Результати розрахунків відносної похибки

№	Y	Predicted Y	Відносна похибка	%
1	-1,427116356	-1,464496164	0,026192544	2,62%
2	-1,30933332	-1,325340096	0,012225135	1,22%
3	-1,771956842	-1,714580512	0,032380207	3,24%
4	-1,46967597	-1,514270226	0,030342917	3,03%
5	-1,46967597	-1,375114159	0,064341946	6,43%
6	-1,514127733	-1,584951201	0,046775095	4,68%
7	-1,771956842	-1,764354574	0,004290323	0,43%
8	-1,660731207	-1,64213404	0,01119818	1,12%
9	-1,771956842	-1,781290108	0,005267208	0,53%
		Середнє	0,025890395	2,59%
		Максимум	0,064341946	6,43%

Для порівняння передбачуваних і фактичних даних побудовано емпіричну та теоретичну лінії регресії за отриманими значеннями Y і Predicted Y відповідно (Рис.10).



Рис.10. Порівняння емпіричної та теоретичної лінії регресії

З рисунка видно, що емпірична і теоретична лінії практично співпадають з невеликим відхиленням, що свідчить про високу точність регресійної моделі. Додатково мають підтвердження відсоткові значення відносної похибки, що зображені в таблиці 3.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

За допомогою поліноміальної регресії розроблено та використано математичну модель прогнозування показників шорсткості поверхні, що дозволило скоротити кількість лабораторно-експериментальних досліджень впливу параметрів різання на шорсткість поверхні.

Встановлено вплив різної подачі (0.1 мм/зуб і 0.125 мм/зуб) на шорсткість поверхні загартованої сталі 4X5МФС при торцевому фрезеруванні, де при 0.125 мм/зуб показники шорсткості нижче ($R_a = 0.3$ μm) ніж при 0.1 мм/зуб ($R_a = 0.34$ μm). Визначено вплив від'ємних кутів (фаска -20° і -25°) на шорсткість поверхні, де менші значення шорсткості поверхні отримані при обробці інструментом, оснащеним пластиною DBS900 з фаскою -25° при подачі 0.125 мм/зуб, глибини різання 0.5 мм, швидкості різання 200 м/хв. Це дозволило скоротити час оброблення, збільшити ресурс роботи інструменту і в результаті отримати шорсткість поверхні, що відповідає фінішній обробці.

Досліджено внутрішні залишкові напруження поверхневого шару загартованої сталі 4X5МФС після торцевого фрезерування інструментом, оснащеним пластиною CBN200 без покриття і з покриттям TiSiN. Пластина без покриття сформувала розтягуювальні залишкові внутрішні напруження, а пластина з покриттям TiSiN - стискаючі, що полягає в різній тепломеханічній взаємодії інструмента з загартованою сталлю. Наявне покриття TiSiN на інструменті зменшує контактне тертя й уповільнює теплопередачу в зону різання завдяки своїй термостійкості, що дозволяє знизити температурні характеристики процесу різання, запобігти локальним пластичним деформаціям для збільшення терміну експлуатації ріжучого інструменту. Сукупність всіх результатів, які були отримані при експериментальних дослідженнях підтвердило досягнення ефективності при торцевому фрезеруванні загартованої сталі 4X5МФС інструментом, що оснащений ПКНБ групи ВН без покриття та із зносостійким покриттям TiSiN.

Література

1. Faga M. G. Microstructural and mechanical characteristics of recycled hard metals for cutting tools // *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. – 2010. – P. 133–136.
2. Slipchenko K., Petruscha I., Turkevich V., Johansson J., Bushlya V., Ståhl J.-E. Investigation of the mechanical properties and cutting performance of cBN-based cutting tools with Cr_3C_2 binder phase // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 72. – P. 1433-1438.
3. Sumiya H., Harano K., Ishida Y. Mechanical properties of nano-polycrystalline cBN synthesized by direct conversion sintering under HPHT // *Diamond and Related Materials*. – 2014. – Vol. 41. – P. 14-19.
4. Клименко С.А., Клименко С.Ан., Копейкіна М.Ю., Манохін А.С. Покриття для різальних інструментів з полікристалічних надтвердих композитів на основі кубічного нітриду бору [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/11/13.pdf>.
5. Музичка Д.Г., Солод В.Ю., Калініченко С.В. Застосування лезових інструментів з надтвердих матеріалів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/1/1/1-1-mzр83.pdf>.
6. Клименко С.А. Механічна обробка інструментами з надтвердих матеріалів: стан і перспективи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2020/12/IP-2020_Matters_TextOnline.pdf.
7. Коваленко Я.П., Мельничук П.П., Кирилович В.А. Оцінка технологічних та термобаричних особливостей механічної обробки загартованих сталей: опис явищ у контактній зоні різання інструментами із ПКНБ групи ВЛ // *Технічна інженерія. Житомирська політехніка*. – 2022. – Вип. 1(89). – С. 27-31.

8. Мазур М.П., Внуков Ю.М., Грабченко А.І., Доброскок В.Л., Залога В.О., Новосолов Ю.К., Якубов Ф.Я. Основи теорії різання матеріалів: підручник (для вищ. закладів) / Під заг. ред. М.П. Мазура. – Вид. перероб. і доп. – Львів: Новий світ – 2000, 2018. – 282 с.
9. Якимов А.В., Слободяник П.Т., Усов А.В. Теплофізика механічної обробки: навч. посібник. – К.; Одеса: Либідь, 1991. – 144 с.
10. Глембоцька Л.С. Проектування різальної частини ножа торцевої фрези // *Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Збірник наукових праць*. – Ж.: ЖДТУ, 2005. – Вип. 2. – С. 184–196.
11. Мельничук П.П. Наукові основи чистового торцевого фрезерування плоских поверхонь: дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Київ, 2002. – 456 с.
12. Новіков Н.В., Клименко С.А. (ред.) Твердосплавні інструменти в процесах механічної обробки. – К.: ІНМ ім. Бакуля, 2015. – 368 с.
13. Naturaki N., Yamane Y. Machining of difficult-to-cut material // *Int. J. Jap. Soc. Presic. Eng.* – 1993. – Vol. 27, №4. – P. 307–310.
14. Luo S.Y., Liao Y.S., Tsai Y.Y. Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools // *Mater. Process Technol.* – 1999. – Vol. 88. – P. 21-114.
15. Narutaki N., Yamane Y. Tool wear and cutting temperature of CBN tools in machining of hardened steels // *Ann CIRP.* – 1979. – Vol. 28. – P. 8-23.

References

1. Faga M. G. Microstructural and mechanical characteristics of recycled hard metals for cutting tools // *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. – 2010. – P. 133–136.
2. Slipchenko K., Petrusha I., Turkevich V., Johansson J., Bushlya V., Ståhl J.-E. Investigation of the mechanical properties and cutting performance of cBN-based cutting tools with Cr₃C₂ binder phase // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 72. – P. 1433-1438.
3. Sumiya H., Harano K., Ishida Y. Mechanical properties of nano-polycrystalline cBN synthesized by direct conversion sintering under HPHT // *Diamond and Related Materials*. – 2014. – Vol. 41. – P. 14-19.
4. Klymenko S.A., Klymenko S.An., Kopieikina M.Iu., Manokhin A.S. Pokryttia dla rizalnykh instrumentiv z polikrystalichnykh nadtverdykh kompozytiv na osnovi kubichnogo nityrydu boru [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/11/13.pdf>.
5. Muzychka D.H., Solod V.Iu., Kalinichenko S.V. Zastosuvannya lezovykh instrumentiv z nadtverdykh materialiv [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <http://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/1/1/1-1-mzp83.pdf>.
6. Klymenko S.A. Mekhanichna obrobka instrumentamy z nadtverdykh materialiv: stan i perspektyvy [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2020/12/IP-2020_Matters_TextOnline.pdf.
7. Kovalenko Ya.P., Melnychuk P.P., Kyrylovych V.A. Otsinka tekhnolohichnykh ta termobarychnykh osoblyvosti mekhanichnoi obrobky zahartovanykh stalei: opys yavlyshch u kontaktii zoni rizanniam instrumentamy iz PKNB hrupy BL // *Tekhnichna inzheneriia. Zhytomyrskaya politekhnika*. – 2022. – Vyp. 1(89). – S. 27-31.
8. Мазур М.П., Внуков Ю.М., Грабченко А.І., Доброскок В.Л., Залога В.О., Новосолов Ю.К., Якубов Ф.Я. Основи теорії різання матеріалів: підручник (для вищ. закладів) / Під заг. ред. М.П. Мазура. – Вид. перероб. і доп. – Львів: Новий світ – 2000, 2018. – 282 с.
9. Якимов А.В., Слободяник П.Т., Усов А.В. Теплофізика механічної обробки: навч. посібник. – К.; Одеса: Либідь, 1991. – 144 с.
10. Глембоцька Л.С. Проектування різальної частини ножа торцевої фрези // *Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Збірник наукових праць*. – Ж.: ЖДТУ, 2005. – Вип. 2. – С. 184–196.
11. Мельничук П.П. Наукові основи чистового торцевого фрезерування плоских поверхонь: дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Київ, 2002. – 456 с.
12. Новіков Н.В., Клименко С.А. (ред.) Твердосплавні інструменти в процесах механічної обробки. – К.: ІНМ ім. Бакуля, 2015. – 368 с.
13. Naturaki N., Yamane Y. Machining of difficult-to-cut material // *Int. J. Jap. Soc. Presic. Eng.* – 1993. – Vol. 27, №4. – P. 307–310.
14. Luo S.Y., Liao Y.S., Tsai Y.Y. Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools // *Mater. Process Technol.* – 1999. – Vol. 88. – P. 21-114.
15. Narutaki N., Yamane Y. Tool wear and cutting temperature of CBN tools in machining of hardened steels // *Ann CIRP.* – 1979. – Vol. 28. – P. 8-23.