

Оцінка впливу сил різання при фінішному торцевому фрезеруванні інструментом з КНБ та нітридної кераміки на параметри якості обробки чавунів з вермикулярним графітом

У статті представлено результати досліджень з визначення впливу сил різання на параметри якості оброблених поверхонь у результаті фінішного торцевого фрезерування виробів з чавунів з вермикулярним графітом (ЧВГ) при застосуванні круглих різальних пластин з кубічного нітриду бору (КНБ) та нітридної кераміки (НК). На основі отриманих результатів побудовано регресійні моделі другого порядку, що описують зміну сил різання та шорсткості від швидкості різання, подачі та глибини різання для КНБ та НК. Регресійні залежності були побудовані методом поверхонь відгуку (RSM) із застосуванням Box–Behnken дизайну в середовищі програмного пакета JMP. Це дозволило побудувати точні залежності сил різання та шорсткості R_a від параметрів обробки та прогнозувати результати обробки за заданими параметрами. Для усіх побудованих моделей значення коефіцієнтів детермінації R^2 становить 96–99 %, що свідчить про високу точність апроксимації експериментальних даних. Отримані результати дають можливість оптимізувати процес фінішної обробки ЧВГ завдяки раціональному вибору режимів фрезерування при незмінній геометрії різального інструменту. Оптимальні режими різання забезпечили мінімальні сили різання та параметри шорсткості. Загалом при використанні різальних пластин з кубічного нітриду бору сили різання виявилися меншими, ніж під час використання різальних пластин з нітридної кераміки. Для КНБ результуючі сили різання 90–185 Н, для НК – 140–220 Н. Обидва матеріали добре зарекомендували себе при фінішній обробці плоских поверхонь виробів з чавунів з вермикулярним графітом. Шорсткість обробленої поверхні R_a не перевищувала 0,44 мкм. При швидкості різання 800 м/хв подачі 0,1 мм/зуб та глибини різання 0,08 мм значення шорсткості R_a для КНБ виявилося 0,16 мкм, для НК – 0,23 мкм.

Ключові слова: сили різання; шорсткість; фінішне торцеве фрезерування; чавун з вермикулярним графітом (ЧВГ); Box–Behnken; регресійні моделі; RSM; JMP; кубічний нітрид бору (КНБ); нітридна кераміка (НК).

Постановка проблеми. Протягом останніх років збільшується інтерес до оброблюваності чавунів з вермикулярним графітом (ЧВГ). Він має низку переваг по відношенню до сірих чавунів, але в процесі його обробки, зокрема при фрезеруванні, виникають більші сили різання та вищі температури в зоні різання [1]. Особливості мікроструктури, хімічного складу та фізико-механічних властивостей ЧВГ покращують його експлуатаційні характеристики, проте сприяють швидкому зношуванню різального інструменту і знижують продуктивність обробки [2]. Тому, для того щоб забезпечити належну якість обробки з позитивним економічним ефектом, дуже важливо заздалегідь визначити допустимий діапазон сил різання. Це зазвичай досягається за допомогою експериментальних досліджень та математичного моделювання [3]. Проблема полягає в необхідності побудови надійної моделі для прогнозування сил різання при фрезеруванні чавунів з вермикулярним графітом з урахуванням впливу режимів обробки та властивостей інструменту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [5–8] зазначено, що при оптимальному виборі режимів різання та інструментального матеріалу можна значно підвищити ефективність обробки чавунів з вермикулярним графітом. Аналіз літературних джерел показав ефективність планування експерименту (DOE) у створенні надійних математичних моделей для оптимізації процесів різання [3–8]. Матриці плану експериментів для побудови моделей прогнозування створюються як вручну, так і за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Широкого застосування набули такі спеціалізовані програмні пакети, як Design-Expert, MODDE, Minitab, JMP, а також середовища програмування MATLAB і Python з відповідними бібліотеками (scikit-learn, statsmodels, TensorFlow). Вони забезпечують реалізацію методів планування експерименту (DOE), аналізу поверхонь відгуку (RSM), регресійного моделювання та машинного навчання, що дозволяє ефективно прогнозувати параметри обробки, такі як шорсткість поверхні, сили різання та зношування інструмента.

Серед найбільш ефективних методів DOE вирізняються метод поверхонь відгуку (RSM), штучні нейронні мережі (ANN) та метод Тагучі [3–4].

Хайле М.Б. займався оптимізацією режимів різання під час торцевого фрезерування ЧВГ. У своїх дослідженнях він застосував метод повного факторного планування експерименту 3^2 , що передбачає дослідження впливу двох основних параметрів різання – швидкості та подачі – на трьох рівнях кожен.

Планування експерименту та аналіз отриманих даних він здійснював з допомогою програмного забезпечення Umetrics MODDE 9 та Design-Expert 8, що дозволило ефективно організувати дослідну частину, отримати надійні результати та побудувати регресійні моделі для оцінки впливу параметрів на сили різання та тривалість служби інструменту. Застосований підхід дозволив виявити оптимальні режими ($V_c = 148\text{--}170$ м/хв, $f_z = 0,25$ мм/зуб) для фрезерування ЧВГ твердосплавом з PVD-покриттям [5]. Однак у цій роботі не наведено даних щодо отриманої якості обробленої поверхні. Це істотно обмежує можливість комплексної оцінки ефективності та продуктивності процесу обробки, оскільки якість поверхні є критично важливим показником. Да Сілва та інші, оцінюючи оброблюваність різних типів ЧВГ в процесі фрезерування для проведення експериментів та аналізу отриманих даних, застосували комбінований дробовий факторний план експерименту типу $A3 \times 2^{5-1}$, у якому досліджувалися параметри різання – швидкість та подача. Досліджувалося зношування твердосплавного інструменту при торцевому фрезеруванні ЧВГ. Високі значення коефіцієнтів детермінації R^2 (0,9313–0,9675) свідчать про точність отриманих моделей. Обраний план виявився ефективним для аналізу зношування інструменту при мінімальній кількості експериментів [6]. Білім С.Е., Рафігі М., Денгіз С. при дослідженні оброблюваності сірих чавунів реалізували комплексний підхід до планування та обробки експериментальних даних шляхом використання матриці повного факторного плану Taguchi L27, що охоплює три рівні варіацій для кожного з трьох основних параметрів обробки: швидкість різання (200, 300, 400 м/хв), подача (0,1, 0,2, 0,3 мм/об), глибина різання (0,1, 0,2, 0,3 мм). Для статистичної оцінки впливу кожного фактора ними було застосовано дисперсійний аналіз (ANOVA), згідно з яким найбільше на шорсткість поверхні впливала подача (82,37 %), тоді як на силу різання – глибина (68,82 %). Метод поверхні відгуку (RSM) дозволив побудувати регресійні моделі з точністю понад 91 %, що дало змогу передбачити значення шорсткості ($R_a = 1,29\text{--}4,27$ мкм), сили різання (14–262 Н) та потужності (1116–4115 Вт), а також визначити оптимальні режими фрезерування: $V_c = 300$ м/хв, $f = 0,2$ мм/об, $ap = 0,1$ мм [7].

Науковцями Ш.Карабулут, А.Гюллю, А.Гюлдаш, Р.Гюрбюз у дослідженні для прогнозування шорсткості поверхні при фрезеруванні ЧВГ було застосовано модель штучної нейронної мережі (ШНМ), яку вивчали на основі 32 експериментальних даних і перевіряли на 16 додаткових випробуваннях. Фрезерування виконувалось із використанням керамічних різальних пластин квадратної форми за різних значень кута нахилу різальної кромки та параметрів різання. Результати, проаналізовані методом дисперсійного аналізу (ANOVA), засвідчили сильну залежність між шорсткістю поверхні та кутом нахилу: при зменшенні кута з 88 до 45° спостерігалось покращення якості поверхні, попри зростання подачі та об'єму знятого матеріалу. Натомість збільшення кута призводило до підвищених вібрацій інструмента і появи мікротріщин, що погіршувало результати обробки. Оптимальними умовами фрезерування ЧВГ виявилися: швидкість різання 334–400 м/хв, кут нахилу 45–60°, максимальна товщина стружки 0,07 мм. Модель продемонструвала високу точність: коефіцієнти детермінації R^2 склали 94,27 % для ШНМ і 97,74 % для регресійного аналізу, при цьому кут нахилу впливав найбільше – 73,79 % згідно з ANOVA, що підтверджує надійність і ефективність застосованого підходу [8]. Однак відсутність даних щодо зношування та сил різання унеможливають комплексну оцінку ефективності процесу механічної обробки та потенційного ресурсу інструмента.

Ефективність нейронних мереж у моделюванні взаємозв'язків між параметрами різання (швидкість, подача, глибина) та вихідними характеристиками була підтверджена у працях Зейна, Алауддіна, Бенардоса та Баїча. Зокрема, в роботі Зейна представлено модель на основі штучної нейронної мережі (ANN) для прогнозування шорсткості поверхні під час процесу механічної обробки кінцевими фрезами титанового сплаву. На основі отриманих прогнозів рекомендованою комбінацією режимів різання для досягнення найкращої шорсткості поверхні є висока швидкість різання, низька подача та позитивний радіальний передній кут в межах від 6,2 до 14,8° [9].

Аналіз літературних джерел показав, що метод поверхонь відгуку (RSM) є зручним числовим інструментом для побудови достовірних моделей планування експерименту, здатних точно прогнозувати вихідні характеристики обробки, зокрема сили різання та шорсткість оброблених поверхонь, і не поступається передовим алгоритмам побудови моделей (Саху і Андхаре). Зокрема, у роботі Міа та співавторів порівняльний аналіз методів RSM і ANN засвідчив вищу точність RSM у прогнозуванні сил різання при точінні Ti-6Al-4V [10]. Отже, дослідження залежностей сил різання та шорсткості поверхні від режимів різання, а також застосування методу планування експерименту RSM є актуальними для оптимізації режимів обробки важкооброблюваних матеріалів, зокрема чавуну з вермикулярним графітом, мінімізації сил різання та забезпечення високої якості обробленої поверхні.

Метою є побудова математичних моделей для прогнозування сили різання та шорсткості поверхні R_a під час фінішного торцевого фрезерування виробів з чавуну з вермикулярним графітом (ЧВГ), що дозволить здійснити оптимізацію режимів обробки та обґрунтування вибору інструментального матеріалу залежно від заданих технологічних параметрів.

Методика проведення досліджень та аналіз отриманих результатів. Для проведення експериментів було використано сучасне обладнання, враховуючи універсальний обробний центр «DMU 80 eVo», торцеву фрезу «Sandvik Coromant R200-051Q22-12H» з круглими пластинами з кубічного нітриду бору та нітридної кераміки, динамометр KISTLER Type 9257B, профілометр Keyence VR series і щуповий профілометр. Затотівки для дослідження були виготовленні з чавуну з вермикулярним графітом марки CGI EN-GJV-450 компанії «SinterCast» [11]. Основною метою дослідження було оцінити вплив режимів обробки на сили різання і якість поверхні, а також оптимізувати технологічний процес обробки для досягнення найкращих результатів.

Для визначення оптимальних значень технологічних параметрів різання використовувалася методика поверхонь відгуку (RSM), яка дозволяє встановити статистичний зв'язок між змінними. У цьому дослідженні ключовими параметрами стали: швидкість різання (V), подача на зуб (S) та глибина різання (t).

Таблиця 1

Рівні зміни факторів

Рівень факторів	V , м/хв	X_1 (код.)	t , мм	X_2 (код.)	S , мм/зуб	X_3 (код.)
Верхній (+1)	800	1	0,15	1	0,15	1
Середній (0)	600	0	0,115	0	0,125	0
Нижній (-1)	400	-1	0,08	-1	0,1	-1

Для створення матриці експерименту було використано Box–Behnken Design (BBD) – одну з найпоширеніших методик RSM. Експериментальний план включав центральні точки для визначення похибки експерименту, а також точки в середині кожного краю багатовимірного куба, що дозволило побудувати поліноміальну регресійну модель другого порядку:

$$(Y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1, j>i}^k \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon$$

де Y – вихідний параметр (наприклад, сила різання);

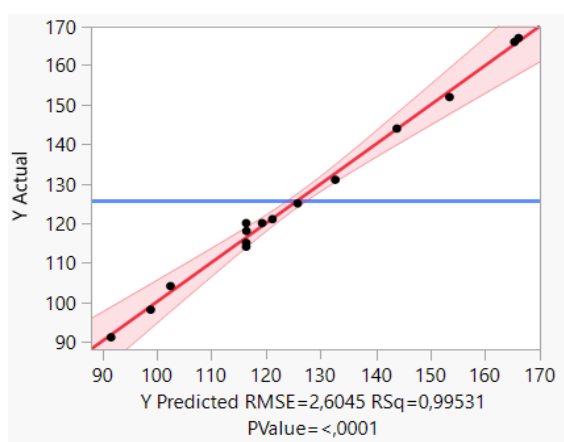
X_i, X_j – незалежні змінні (параметри різання);

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$ – відповідно: сталий коефіцієнт, лінійні, квадратичні та взаємодіючі коефіцієнти;

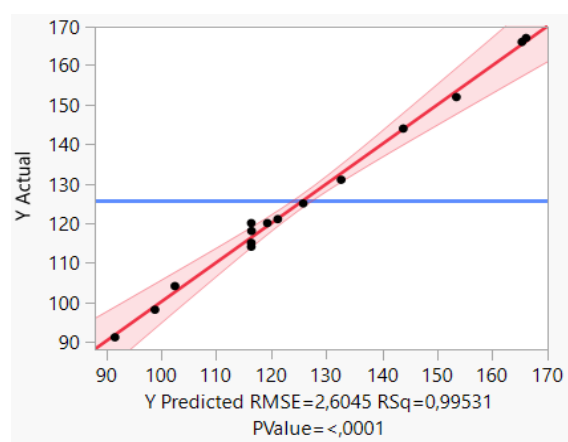
ϵ – випадкова похибка.

Для реалізації експериментального дизайну та статистичного аналізу використовувався програмний пакет JMP, який надає потужні інструменти для побудови регресійних моделей, перевірки адекватності через дисперсійний аналіз (ANOVA), обчислення коефіцієнта детермінації (R^2) та тесту на невідповідність (lack-of-fit test).

На рисунку 1, а показано залежність між фактичними та прогнозованими значеннями результуючої сили різання для інструмента із кубічного нітриду бору, на рисунку 1, б – для нітридної кераміки. Для обох випадків моделі демонструють високу точність передбачення: коефіцієнти детермінації склали $R^2 = 0,9953$ і $R^2 = 0,96$ відповідно, що вказує на сильну кореляцію між розрахунковими та експериментальними значеннями.



а)



б)

Рис. 1. Залежність між експериментальними та прогнозованими значеннями результуючої сили різання (H) для інструментів із КНБ (а) та нітридної кераміки (б)

На рисунку 2 наведено оцінки коефіцієнтів регресійних моделей, стандартні похибки, t-статистики та р-значення для кожного фактора і взаємодії. Значущі фактори ($p < 0,05$) виділено червоним. Зокрема, у моделі для КНБ значно впливають усі основні фактори, серед яких X_2 (глибина різання) має найбільше значення, а менш значущими є квадратичні члени $X_2 \times X_2$ та $X_3 \times X_3$. У моделі для нітридної кераміки статистично значущими виявились основні ефекти, серед яких X_3 (подача має найбільше значення), а також менш значущі квадратні члени $X_1 \times X_1$ та $X_3 \times X_3$, що свідчить про складну природу впливу режимів різання на силу.

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Uncoded Estimate	Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Uncoded Estimate
Intercept	116,33333	1,503699	77,36	<,0001*	262,53827	Intercept	173,33333	4,409586	39,31	<,0001*	303,84694
X1(400,800)	-14,375	0,920824	-15,61	<,0001*	-0,014018	X1(400,800)	7,75	2,700309	2,87	0,0350*	-0,34875
X2(0,08,0,15)	22,5	0,920824	24,43	<,0001*	-820,7483	X2(0,08,0,15)	13,75	2,700309	5,09	0,0038*	1528,2313
X3(0,1,0,15)	11,125	0,920824	12,08	<,0001*	-2208,333	X3(0,1,0,15)	20,5	2,700309	7,59	0,0006*	-3187,619
X1*X2	-2	1,302242	-1,54	0,1852	-0,285714	X1*X2	-4,44e-16	3,818813	-0,00	1,0000	-6,34e-17
X1*X3	-2,75	1,302242	-2,11	0,0884	-0,55	X1*X3	-0,5	3,818813	-0,13	0,9009	-0,1
X2*X3	7,772e-16	1,302242	0,00	1,0000	8,882e-13	X2*X3	-0,5	3,818813	-0,13	0,9009	-571,4286
X1*X1	1,4583333	1,355416	1,08	0,3311	3,6458e-5	X1*X1	13,333333	3,974747	3,35	0,0202*	0,0003333
X2*X2	8,7083333	1,355416	6,42	0,0014*	7108,8435	X2*X2	-5,666667	3,974747	-1,43	0,2133	-4625,85
X3*X3	7,4583333	1,355416	5,50	0,0027*	11933,333	X3*X3	10,333333	3,974747	2,60	0,0483*	16533,333

Рис. 2. Коефіцієнти регресійних моделей для оцінки впливу факторів на результуючу сил різання для інструментів із КНБ та нітридної кераміки

Регресійна модель залежності результуючої сил різання від параметрів різання для КНБГ:

$$Y = 263 - 0,014 \cdot X_1 - 821 \cdot X_2 - 2208 \cdot X_3 - 0,286 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,55 \cdot X_1 \cdot X_3 + 8,88 \cdot 10^{-13} \cdot X_2 \cdot X_3 + 3,64 \cdot 10^{-5} \cdot X_1^2 + 7109 \cdot X_2^2 + 11933 \cdot X_3^2$$

Регресійна модель залежності результуючої сил різання від параметрів різання для НК:

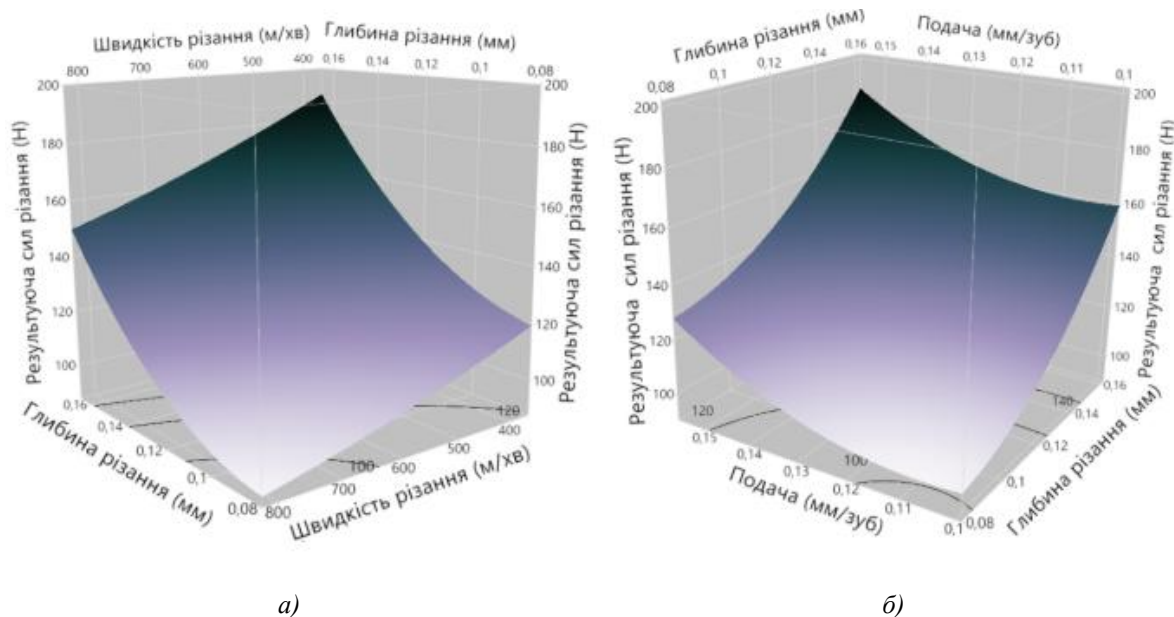
$$Y = 304 - 0,35 \cdot X_1 + 1528 \cdot X_2 - 3187 \cdot X_3 - 6,34 \cdot 10^{-17} \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,1 \cdot X_1 \cdot X_3 - 571 \cdot X_2 \cdot X_3 + 3,33 \cdot 10^{-4} \cdot X_1^2 - 4625 \cdot X_2^2 + 16533 \cdot X_3^2$$

Режими різання для інструмента з КНБ, за яких результуючі сили різання мінімальні (90–107 Н):

- швидкість різання: близько 600–800 м/хв;
- глибина різання: 0,08–0,1 мм;
- подача: 0,10–0,12 мм/зуб.

Режими різання для нітридної кераміки, за яких результуючі сили різання мінімальні (142–169 Н):

- швидкість різання: 500–700 м/хв;
- глибина різання: 0,08–0,1 мм;
- подача: 0,10–0,12 мм/зуб.



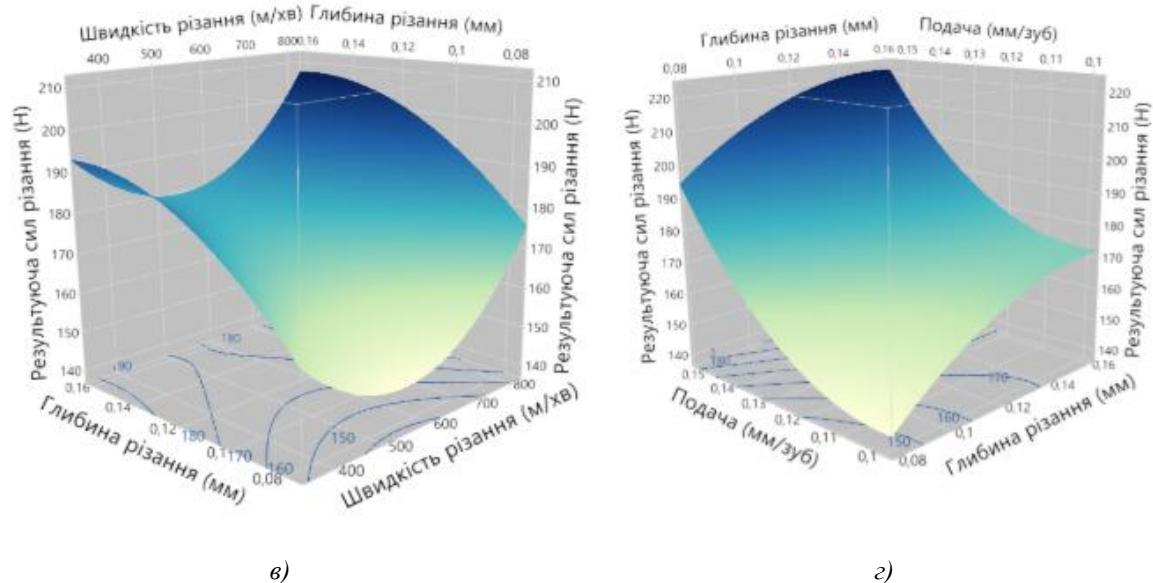


Рис. 3. 3D-графіки залежностей результуючої сил різання від параметрів різання а–б) для КНБ та в–г) для НК

На рисунку 4, а показано залежність між фактичними та прогнозованими значеннями шорсткості R_a для інструмента із кубічного нітриду бору, на рисунку 1, б – для нітридної кераміки. Для обох випадків моделі демонструють високу точність передбачення: коефіцієнти детермінації склали $R^2 = 0,98545$ і $R^2 = 0,99374$ відповідно, що вказує на сильну кореляцію між розрахунковими та експериментальними значеннями. На рисунку 5 наведено коефіцієнти регресійних моделей, стандартні похибки, t-статистики та р-значення для кожного фактора і взаємодії. Статистичний аналіз показав, що на шорсткість найсуттєвіше впливає швидкість різання (X_1), яка є значущою для обох типів інструментів ($P < 0,001$). Подача та глибина також є значущими, але дещо менше впливають на шорсткість. Для КНБ більш значущою є глибина різання, в той час як для НК – подача.

Для інструментів з КНБ додатково значущим фактором є глибина різання квадратичний ефект глибини різання, а для НК – квадратичний ефект швидкості різання X_1^2 , що вказує на нелінійний характер взаємозв'язку. Водночас більшість парних взаємодій між факторами виявилися статистично незначущими, що може свідчити про їх слабкий комбінований ефект або надмірну складність моделі. Загалом застосування методу регресійного аналізу дозволяє кількісно оцінити вплив кожного з параметрів на якість обробленої поверхні та прогнозувати значення R_a з високою точністю.

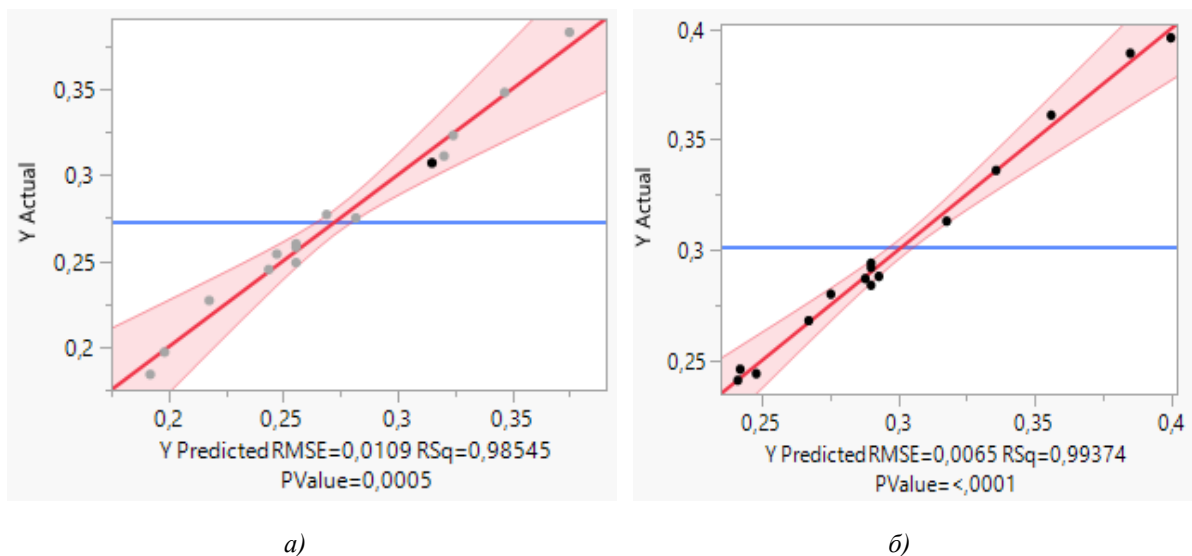


Рис. 4. Залежність між експериментальними та прогнозованими значеннями шорсткості R_a для інструментів із КНБ (а) та НК (б)

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Uncoded Estimate	Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Uncoded Estimate
Intercept	0,2556667	0,006288	40,66	<,0001*	0,7220128	Intercept	0,29	0,003762	77,09	<,0001*	0,2256403
X1(400,800)	-0,05725	0,003851	-14,87	<,0001*	-0,001154	X1(400,800)	-0,050125	0,002304	-21,76	<,0001*	-0,000854
X2(0,08,0,15)	0,03425	0,003851	8,89	0,0003*	-1,639456	X2(0,08,0,15)	0,0185	0,002304	8,03	0,0005*	-1,045918
X3(0,1,0,15)	0,017	0,003851	4,41	0,0069*	-0,622381	X3(0,1,0,15)	0,028875	0,002304	12,54	<,0001*	5,6521429
X1*X2	0,00425	0,005446	0,78	0,4705	0,0006071	X1*X2	0,004	0,003258	1,23	0,2741	0,0005714
X1*X3	0,00575	0,005446	1,06	0,3394	0,00115	X1*X3	-0,01225	0,003258	-3,76	0,0132*	-0,00245
X2*X3	0,00225	0,005446	0,41	0,6966	2,5714286	X2*X3	0,0055	0,003258	1,69	0,1522	6,2857143
X1*X1	0,0217917	0,005668	3,84	0,0121*	5,4479e-7	X1*X1	0,028125	0,003391	8,29	0,0004*	7,0313e-7
X2*X2	0,0102917	0,005668	1,82	0,1291	8,4013605	X2*X2	0,002375	0,003391	0,70	0,5149	1,9387755
X3*X3	0,0007917	0,005668	0,14	0,8944	1,2666667	X3*X3	-0,009375	0,003391	-2,76	0,0396*	-15

Рис. 5. Коефіцієнти регресійних моделей для оцінки впливу факторів на шорсткості R_a для інструментів із КНБ та НК

Регресійна модель залежності шорсткості R_a від параметрів різання для КНБ з некованими значеннями змінних:

$$Y = 0,722 - 0,00115 \cdot X_1 - 1,64 \cdot X_2 - 0,622 \cdot X_3 + 0,00061 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,00115 \cdot X_1 \cdot X_3 + 2,57 \cdot X_2 \cdot X_3 + 5,45 \cdot 10^{-7} \cdot X_1^2 + 8,4 \cdot X_2^2 + 1,27 \cdot X_3^2$$

Регресійна модель залежності шорсткості R_a від параметрів різання для НК з некованими значеннями змінних:

$$Y = 0,226 - 0,000854 \cdot X_1 - 1,05 \cdot X_2 + 5,65 \cdot X_3 + 0,00057 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,00245 \cdot X_1 \cdot X_3 + 6,28 \cdot X_2 \cdot X_3 + 7,03 \cdot 10^{-7} \cdot X_1^2 + 1,93 \cdot X_2^2 - 15 \cdot X_3^2$$

На рисунку 6 представлено 3D-графіки залежності шорсткості R_a від параметрів різання, які демонструють, що як для КНБ, так і для НК шорсткість зменшується при збільшенні швидкості різання та зменшенні глибини і подачі. Зокрема, для кубічного нітриду бору спостерігається більший вплив від глибини різання, в той час як для нітридної кераміки подача впливала більше.

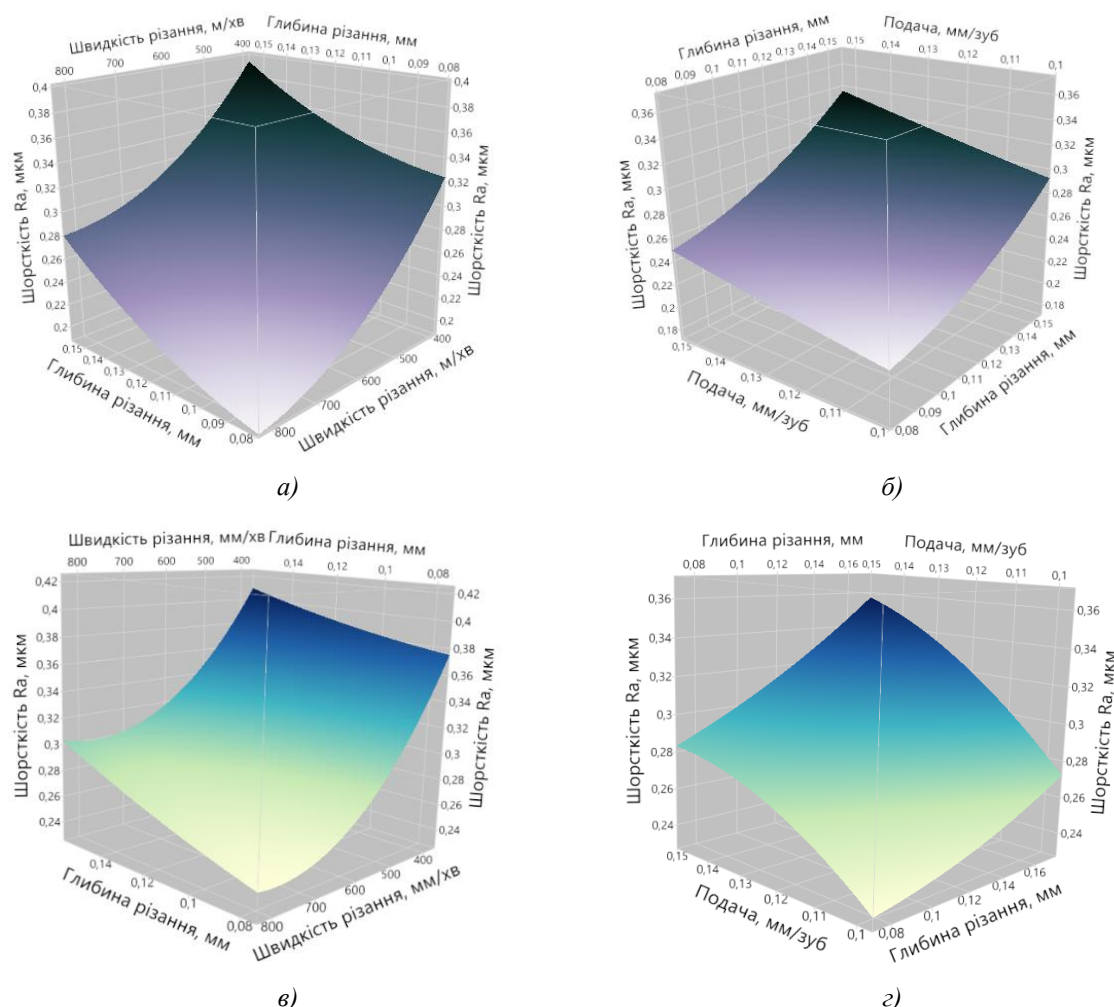


Рис. 6. 3D-графіки залежностей шорсткості R_a від параметрів різання: а–б) для КНБ та в–г) для НК

Обговорення результатів дослідження:

- у процесі фінішного торцевого фрезерування ЧВГ під час використання різальних пластин з КНБ сили різання виявилися меншими завдяки своїй високій твердості, термостійкості та теплопровідності. Ці властивості дозволили зменшити локальне перегрівання зони різання і краще розподілити навантаження по фасці, що особливо важливо при фінішних режимах з малими глибинами різання;

- при використанні нітридної кераміки спостерігається підвищення сил різання (на 20–40 %) та шорсткості Ra (≈ 20 %). Хоча при максимальній глибині різання і подачі та мінімальній швидкості різання значення шорсткості Ra майже на рівні для обох матеріалів. Підвищення сил різання та шорсткості зумовлено меншою теплопровідністю НК та крихкістю, що вимагає застосування більшої фаски та зумовлює збільшену площу контакту. При фінішних режимах різання керамічний інструмент частково працює у режимі зминання, а не зрізання, що значно підвищує навантаження на різальну кромку та погіршує якість обробки. Нітридна кераміка є чутливішою до подачі, що підтверджується регресійною моделлю. Тому для зменшення сил різання та підвищення якості оброблених поверхонь обробку нітридною керамікою доцільно здійснювати при менших подачах.

Висновки. У результаті оцінки впливу сил різання на якість обробленої поверхні при фінішному торцевому фрезеруванні чавунів з вермикулярним графітом встановлено, що інструменти з кубічного нітриду бору забезпечують кращі показники якості обробки – шорсткість поверхні $Ra = 0,16$ мкм при результуючій силі різання 90 Н. Під час використання нітридної кераміки відповідні значення становлять $Ra = 0,23$ мкм, а результуюча сил різання при цьому 165 Н. Вказані результати були зафіксовані при швидкості різання 800 м/хв, глибині різання 0,08 мм і подачі на зуб 0,1 мм/зуб. Отримані дані не суперечать науковим уявленням про доцільність застосування КНБ для фрезерування ЧВГ і демонструють його переваги при фінішній обробці.

References:

- Tasdelen, B., Özel, C. and Asiltürk, İ. (2007), «Machining of gray cast irons and compacted graphite iron», *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 189, No. 1–3, pp. 1–7.
- Malakizadi, A., Biermann, D. and Ståhl, J.-E. (2018), «Effects of workpiece microstructure and mechanical properties on tool wear and surface roughness in machining of compacted graphite iron», *Wear*, Vol. 406–407, pp. 174–182.
- Altintas, Y. (2012), *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge.
- Montgomery, D.C. (2012), *Design and Analysis of Experiments*, 8th ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 752 p.
- Haile, M.B., *Optimization of Cutting Parameters in Machining of Compacted Graphite Iron (CGI)*.
- Da Silva, L.R.R., Souza, F.C.R., Guesser, W.L. et al., «Critical assessment of compacted graphite cast iron machinability in the milling process».
- Bilim, S.E., Rafighi, M. and Dengiz, S. (2023), «Machinability of GG25 gray cast iron using carbide inserts», *Materials Today: Proceedings*, doi: 10.1016/j.matpr.2023.10.136.
- Karabulut, Ş., Güllü, A., Gültaş, A. and Gürbüz, R., «Analytical Modelling of Surface Roughness during Compacted Graphite Iron Milling Using Ceramic Inserts».
- Zain, A.M., Haron, H. and Sharif, S. (2010), «Application of GA to optimize cutting conditions for minimizing surface roughness in end milling machining process», *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, pp. 4650–4659.
- Kandananond, K., «Research Article Using the Response Surface Method to Optimize the Turning Process of AISI 12L14 Steel».
- SinterCast, *Compacted Graphite Iron – Material Data Sheet*, [Online], available at: <https://www.sintercast.com/media/1239/compacted-graphite-iron-material-data-sheet.pdf>
- Zaloha, V.O., Honcharov, V.D., Honcharov, V.D. and Zaloha, O.O. (2013), «Suchasni instrumentalni materialy u mashynobuduvanni».
- Reis, A., Fernandes, G.H.N., Sousa, J.A.G. et al. (2024), «Tool life assessment of high strength cast iron alloys in dry face milling operations», *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 111, pp. 180–193, doi: 10.1016/j.jmapro.2024.01.007.
- Radkevych, S., Glembotskaya, L., Melnychuk, P. and Lutsiv, I. (2024), «Surface roughness depending from the cutting parameters of CGI parts during finishing face milling», *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, No. 4 (116), pp. 5–13.
- Sandvik Coromant, «Cutting tools for CGI and cast iron machining», [Online], available at: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us>

Радкевич Світлана Іванівна – аспірант Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0002-8791-1653>.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проектування різальних інструментів.

Radkevych S.I.

Impact of cutting forces on surface quality in finish face milling of compacted graphite iron with CBN and nitride ceramic tools

The article presents the results of studies to determine the influence of cutting forces on the quality parameters of machined surfaces as a result of finishing face milling of products made of compacted graphite cast iron (CGI) using round cutting inserts made of cubic boron nitride (CBN) and nitride ceramics (NC). Based on the results obtained, second-order regression models were constructed to describe the change in cutting forces and roughness with cutting speed, feed rate, and depth of cut for CBN and NC. The regression dependencies were built using the response surface method (RSM) with the Box-Behnken design in the JMP software package. This made it possible to build accurate dependencies of cutting forces and roughness R_a on machining parameters and to predict machining results according to the specified parameters. For all the built models, the value of the determination coefficients R^2 is 96–99 %, which indicates a high accuracy of approximation of the experimental data. The results obtained make it possible to optimize the process of finishing the CGI due to the rational choice of milling modes with a constant geometry of the cutting tool. The optimal cutting modes provided minimal cutting forces and roughness parameters. In general, when using cubic boron nitride inserts, the cutting forces were lower than when using nitride ceramic inserts. For CBN, the resulting cutting forces were 90–185 N, and for NC 140–220 N. Both materials have proven to be good at finishing flat surfaces of products made of vermicular graphite cast iron. The machined surface roughness R_a did not exceed 0,44 microns. At a cutting speed of 800 m/min feed rate of 0,1 mm/tooth and a cutting depth of 0,08 mm, the R_a roughness value for CBN was 0,16 μm , for nitride ceramics – 0,23 μm .

Keywords: cutting forces; roughness; finishing face milling; compacted graphite iron (CGI); Box-Behnken; regression models; RSM; JMP; cubic boron nitride (CBN); nitride ceramics (NC).

Стаття надійшла до редакції 23.04.2025.