

С. І. Радкевич

Державний університет «Житомирська політехніка»

ЕФЕКТИВНІСТЬ ТОРЦЕВОГО ФІНІШНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ ЧАВУНІВ З ВЕРМИКУЛЯРНИМ ГРАФІТОМ ІНСТРУМЕНТАМИ З КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ ТА З НІТРИДНОЇ КЕРАМІКИ

У статті викладено зведені результати експериментальних досліджень впливу режимів різання та типу інструментального матеріалу на зношування інструменту, параметри якості поверхні та мікроструктуру обробленого шару чавуну з вермикулярним графітом марки CGI450 при фінішному торцевому фрезеруванні. Було застосовано метод Бокса-Бенкена для планування експерименту та підхід з множинними критеріями. Це дозволило дослідити взаємний вплив основних параметрів обробки - швидкості різання, подачі на зуб та глибини різання - на ключові критерії ефективності процесу фінішного торцевого фрезерування. До них відносяться: знос інструменту (VB), шорсткість обробленої поверхні (Ra), продуктивність процесу фрезерування (MRR).

Під час дослідження порівнювали інструменти з кубічного нітриду бору (КНБ) та нітридної кераміки (НТК). Виявилось, що КНБ забезпечує формування зміцненого поверхневого шару з високими залишковими напруженнями стискування (до -166,42 МПа), подрібненою структурою матриці та підвищеними мікрODEФОРМАЦІЯМИ. Це свідчить про інтенсивне поверхнєве зміцнення. Шорсткість поверхні $0,16 < Ra \leq 0,63$ мкм. Інструменти з НК демонструють децю вищу зносостійкість і стійкість при обробці при високих швидкостях різання. Однак вони мають слабше виражене структурне зміцнення і характеризуються не набагато гіршими параметрами Ra. Крім того, була проведена економічна оцінка, у якій врахована вартість інструменту та собівартість обробки одного кілометра шляху різання. В результаті встановлено, що на чистових режимах фрезерування ЧВГ (швидкість різання 400-800 м/хв, подача 0,1-0,15 мм/зуб, глибина різання 0,08-0,15 мм) використання різальних пластин круглої форми з нітридної кераміки є значно рентабельнішим, ніж пластин з КНБ. На основі аналізу отриманих результатів сформульовано рекомендації щодо вибору інструментального матеріалу в залежності від виробничого пріоритету: КНБ - для досягнення максимальної якості поверхні та підвищеної зносостійкості поверхневого шару; Нітридна кераміка - для забезпечення економічної ефективності та стабільності процесу при серійній обробці. Представлені дані можуть бути використані для оптимізації процесу фрезерування чавунів з вермикулярним графітом у відповідальному машинобудівному виробництві.

Ключові слова: чавун з вермикулярним графітом (ЧВГ), зносостійкість, фінішне фрезерування, кубічний нітрид бору (КНБ), нітридна кераміка, метод Бокса-Бенкена

S.I. Radkevych

EFFICIENCY OF FACE FINISHING MILLING OF CAST IRON WITH VERMICULAR GRAPHITE BY TOOLS MADE OF CUBIC BORON NITRIDE AND NITRIDE CERAMICS

The article presents the summary results of experimental studies of the influence of cutting modes and type of tool material on tool wear, surface quality parameters, and microstructure of the machined layer of cast iron with vermicular graphite of CGI450 grade during face finishing milling. The Box-Behnken method was used to plan the experiment and a multiple criteria approach was applied. This made it possible to investigate the mutual influence of the main machining parameters - cutting speed, feed per tooth and depth of cut - on the key performance criteria of the finishing face milling process. These include: tool wear (VB), machined surface roughness (Ra), milling process productivity (MRR).

During the study, tools made of cubic boron nitride (CBN) and nitride ceramics (NC) were compared. It turned out that BNB provides the formation of a hardened surface layer with high residual compressive stresses (up to -166.42 MPa), a crushed matrix structure, and increased microdeformations. This indicates intensive surface hardening. The surface roughness is $0.16 < Ra \leq 0.63$ μm . Tools made of NK demonstrate slightly higher wear resistance and machining stability at high cutting speeds. However, they have less pronounced structural strengthening and are characterized by slightly worse Ra parameters.

In addition, an economic assessment was made, which took into account the cost of the tool and the cost of machining one kilometer of cutting path. As a result, it was found that in the finishing modes of HSS milling (cutting speed 400-800 m/min, feed rate 0.1-0.15 mm/tooth, cutting depth 0.08-0.15 mm), the use of round-shaped cutting inserts made of nitride ceramics is much more cost-effective than CBN inserts. Based on the analysis of the obtained results, recommendations for the choice of tool material depending on the production priority were formulated: CBN - to achieve maximum surface quality and increased wear resistance of the surface layer; Nitride ceramics - to ensure cost-effectiveness and process stability during serial processing. The data presented here can be used to optimize the milling process of cast irons with vermicular graphite in critical machine-building production.

Keywords: vermicular graphite cast iron (CGI), wear resistance, finishing milling, cubic boron nitride (CBN), nitride ceramics, Box-Behnken method.

Постановка проблеми. Фінішне торцеве фрезерування - є одним з найтипівіших та найефективніших методів обробки для формування плоских поверхонь з забезпеченням їх високої точності та якості. За рахунок своєї багатофункціональності цей метод широко використовується в галузях машинобудування, авіації та автомобілебудування. Чавуни є одними з найпоширеніших конструкційних матеріалів, які використовуються для виготовлення великогабаритних деталей з плоскими поверхнями, що потребують високої точності та якості. Зокрема чавуни з вермикулярним графітом протягом останніх років викликають все більший інтерес в різних галузях

машинобудування. Однак їх обробка фрезеруванням супроводжується інтенсивним зношуванням ріжучого інструменту, що призводить до зниження продуктивності та якості обробки і збільшення загальної собівартості продукції. Особливістю торцевого фрезерування є періодичність контакту зубів фрези з заготовкою. Це призводить до циклічних навантажень і втомного зносу ріжучих кромek. Перепади температурних режимів викликають термічні тріщини, а коливання сил різання - вібрації і нерівномірне зношування ріжучих пластин. Все це створює труднощі в забезпеченні стабільності обробки та досягненні необхідної якості фінішної обробки. Важливим є забезпечення шорсткості поверхні не більше $Ra = 0,63$ мкм з балансом між продуктивністю та зносостійкістю різальних інструментів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням проблеми зношування різального інструменту при торцевому фрезеруванні присвячені роботи як вітчизняних, так і зарубіжних науковців. Серед науковців, які зробили великий внесок у вивчення цього питання, слід відзначити В.М. Бушлю, Г.М. Виговського, Ю.М. Внукова, О.А. Громова, В.О. Залого, П.П. Мельничука, D. Wang, Y. Li, L. Müller, P. Schmidt, J. Smith, A. Johnson та ін. У своїх роботах вони досліджували природу зношування різальних інструментів під час торцевого фрезерування важкооброблюваних матеріалів (зокрема чавуну). Розглядали вплив основних технологічних параметрів обробки на інтенсивність зношування та пропонували шляхи підвищення стійкості різального інструменту.

Всупереч великій кількості напрацювань, обробка чавунів з вермикулярним графітом (ЧВГ) фінішним торцевим фрезеруванням залишається недостатньо вивченою. Висока абразивність матеріалу, особливості мікроструктури та форма графітових включень викликають підвищене навантаження на інструмент та створюють умови для швидкого зношування. Це все ускладнює забезпечення стабільної обробки з досягненням високих показників якості.

Актуальність дослідження полягає в необхідності підвищення продуктивності обробки та зниження вартості фінішної обробки чавунів із вермикулярним графітом шляхом обґрунтованого вибору інструментального матеріалу з урахуванням його зносостійкості, вартості та здатності забезпечувати високу якість обробки.

Метою дослідження є вибір ефективного інструментального матеріалу для фінішного торцевого фрезерування поверхонь виробів з чавунів з вермикулярним графітом шляхом порівняльного аналізу зносостійкості, здатності забезпечувати високу якість обробленої поверхні та вартості.

Викладення основного матеріалу

Ефективність обробки важкооброблюваних матеріалів, зокрема чавунів із вермикулярним графітом (ЧВГ), залежить від комплексу факторів, які пов'язані як із властивостями самого матеріалу, так і з правильно підібраними режимами, інструментальним матеріалом і умовами обробки. Одним із основних факторів, від якого залежить інтенсивність зношування, є мікроструктура ЧВГ. На рис.1. представлена мікроструктура ЧВГ, яка включає як графітні, так і карбідні включення.

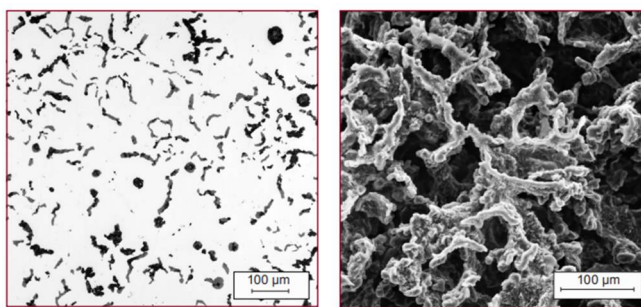


Рис.1. Мікроструктура чавуну з вермикулярним графітом [15].

Графітні включення у вигляді черв'яків об'єднані у формі коралів формують складну мережу. Завдяки цьому порушується однорідність матеріалу і ускладнюється процес різання який супроводжується локальними нерівномірними напруженнями і термічними дефектами. Карбідні включення діють як абразивні частинки, створюючи підвищене навантаження на різальну кромку інструмента, сприяючи швидкому її зношуванню.

Літературний аналіз показав, що під час обробки ЧВГ інструменти зношуються набагато інтенсивніше порівняно з СЧ. Зокрема в роботі [10], встановлено, що інструменти з КНБ вже на 8 хвилині роботи зазнали значного дифузійного зношування при швидкості різання 700м/хв, в той час як при обробці СЧ вони демонструють високу. Це обмежує ефективність їх застосування для фрезерування ЧВГ. У дослідженнях [12], основними механізмами зношування при обробці ЧВГ були абразивний і адгезійний знос, які переважали у зонах локального контакту інструменту із

твердими фазами матеріалу. У роботі [14] підтверджено, що за однакових умов роботи інструменту, оброблюваність ЧВГ гірша, ніж СЧ. Нижча теплопровідність, порівняно з СЧ викликає перегрів ріжучої кромки пришвидшуючи термічне зношування. Вища чутливість до вібрацій вимагає застосування жорстких інструментальних систем для стабілізації процесу. В таких умовах варто використовувати інструменти із високою термічною та абразивною стійкістю для зменшення термічного та абразивного зношування [14]. В свою чергу, Sadik та Dahlman дослідили вплив хімічного складу ЧВГ на інтенсивність зношування. Вони виявили що підвищення вмісту титану від 0,004% до 0,04% зменшує термін служби інструменту більш ніж на 50%. Це пов'язано з утворенням твердих включень Ti(C,N), які збільшують механічне навантаження на ріжучу кромку [11]. Ще однією особливістю обробки ЧВГ є налипання стружки на інструмент, що прискорює його зношування та ускладнює отримання стабільних високих показників якості обробленої поверхні [14].

Табл. 1

Фізико-механічні характеристики ЧВГ [15]

Властивості	Температура, °C	Значення (CGI 450)
Вміст перліту (%)	25	~90
Границя міцності на розрив (MPa)	25	450–525
	100	425–500
	400	425–500
Границя плинності 0.2% (MPa)	25	310–355
	100	290–340
	400	265–310
Модуль пружності (GPa)	25	145–155
	100	130–140
	400	125–135
Відносне подовження (%)	25	1.0–1.5
	100	1.2–2.0
	400	1.5–3.5
Коефіцієнт витривалості (σв)	25	0.25–0.35
Теплопровідність (Вт/м·К)	25	33–36
	300	30–33
	400	28–30
Коефіцієнт теплового розширення (мкм/м·К)	25–400	11.5–12.5
Коефіцієнт Пуассона	25	0.27–0.29
Границя стиску 0.2% (MPa)	25	410–440
	400	280–320
Коеф. зниження витривалості при надрізі	25	1.9–2.1
Густина (г/см³)	25	7.0–7.2
Твердість за Брінеллем (BHN)	25	207–255

Табл. 2

Хімічний склад чавуну з вермикулярним графітом CGI450 [15].

Pearlite (%)	C	Si	CE	Mn	S	Mg	CeMM	Cu	Sn
> 90	3.6–3.8	2.1–2.5	4.4–4.7	0.2–0.4	0.005–0.022	0.006–0.014	0.01–0.03	0.7–1.0	0.08–0.10

Технологічними заходами які застосовуються для зниження зношування інструментів є зменшення режимів різання (глибини різання, швидкості різання та подачі). Однак надмірне зниження режимів різання може призвести до зниження продуктивності процесу та якості обробленої поверхні. Тому існує необхідність у пошуку раціонального поєднання режимів різання та інструментального матеріалу, яке б забезпечувало мінімальне зношування при збереженні високої продуктивності та стабільної якості обробки.

Отож, під час фінішного торцевого фрезерування чавуну з вермикулярним графітом (ЧВГ) особливо актуальною є проблема одночасного забезпечення високої стабільної якості обробленої поверхні, зносостійкості ріжучого інструменту та достатнього рівня продуктивності. Низька теплопровідність і неоднорідність фазового складу ЧВГ створюють несприятливі умови для

процесу різання, що спричиняє інтенсивне теплове та абразивне навантаження на ріжучу кромку, прискорене зношування інструменту та зниження якості обробки.

З метою усунення зазначених недоліків нами було розроблено комплексний підхід до оптимізації режимів різання у поєднанні з раціональним вибором інструментального матеріалу та геометрії ріжучої частини. Проведені дослідження дозволили визначити ефективні параметри фрезерування, що забезпечують покращення чистоти поверхні, зниження зношування інструменту, формування стискуючих залишкових напружень у поверхневому шарі, а також підвищення загальної продуктивності процесу.

Методика проведення експериментів. З метою підвищення ефективності фінішного торцевого фрезерування чавунів з вермикулярним графітом у дослідженні був застосований комплексний підхід, що включає оцінювання як технологічних, так і економічних показників. Зокрема, аналіз охоплював зносостійкість інструментів, якість обробленої поверхні, продуктивність процесу (MRR), а також інтегральний економічний критерій — вартість обробки одного кілометра шляху різання.

Експериментальні дослідження проводилися з метою встановлення впливу режимів різання та типу інструментального матеріалу на знос інструменту і якість обробки при фінішному фрезеруванні чавуну з вермикулярним графітом марки CGI450, виробництва компанії SinterCast (Швеція). Обробку здійснювали на вертикальному обробному центрі Haas VF-2SSYT-NG в умовах сухого фрезерування, використовуючи торцеву фрезу Sandvik Coromant R200-051Q22-12H з однією круглою ріжучою пластиною. У дослідженні застосовувалися пластини з двох типів інструментальних матеріалів: кубічного нітриду бору (КНБ) та нітридної кераміки (НК). Найменування та коди ріжучих пластин наведено в таблиці 3.

Режими різання варіювали в межах: швидкість різання $v_c = 400\text{--}800$ м/хв, подача на зуб $f_z = 0,10\text{--}0,15$ мм/зуб, глибина різання $a_p = 0,08\text{--}0,15$ мм. Для планування експерименту було застосовано метод Бокса-Бенкена, що забезпечує ефективне дослідження впливу окремих факторів та їхніх взаємодій на вихідні характеристики процесу обробки.

Зношування задньої поверхні інструменту оцінювали за допомогою електронного мікроскопа, а параметр Ra контролювали за допомогою портативного профілометра UIT TR200, у напрямку, перпендикулярному до подачі після кожної серії проходів (2, 5, 10, 15, 20, 30, 60, 90, 120). Визначення залишкових напружень у поверхневому шарі здійснювали методом $\sin^2\psi$ з використанням рентгенівського дифрактометра.

Табл. 3

Різальні пластинки, які використовувалися в дослідженнях [16]

Інструментальний матеріал	Кубічний нітрид бору	Нітридна кераміка
Код різальної пластинки	RCNT 12 04 M0 CB50	RCKT 12 04 MO 6190
Кількість різальних кромок	3	8
Вартість різальної пластини, євро	19,86	2,69

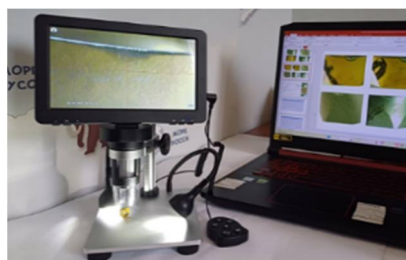


Рис.3. Верстатно-апаратний комплекс для проведення експериментального дослідження

Аналіз отриманих результатів. Для забезпечення об'єктивного порівняння характеристик інструментів з кубічного нітриду бору (КНБ) та нітридної кераміки (НК) було проаналізовано результати фрезерування чавуну з вермикулярним графітом SinterCast CGI450 за однакових режимів: швидкість різання $v_c = 600$ м/хв, глибина різання $a_p = 0,12$ мм, подача на зуб $f_z = 0,10$ мм/зуб. Ці параметри належать до зони, в якій відбувається збалансоване поєднання основних

цільових показників: мінімізація шорсткості обробленої поверхні (R_a), зношування інструменту (VB_{max}) та забезпечення достатнього рівня продуктивності (MRR).

На рис. 4 наведено результати дисперсійного аналізу, які підтверджують, що найбільш значущим фактором для обох типів інструментальних матеріалів є швидкість різання (X_1). Також встановлено статистично значущий вплив глибини різання (X_2) та подачі на зуб (X_3), причому у випадку НК спостерігається більша чутливість до взаємодій між факторами.

На рис. 5 подано графіки залежностей вихідних параметрів (зносу інструменту — Y_1 , шорсткості R_a — Y_2 , продуктивності — Y_3) та інтегральної функції бажаності для інструментів з КНБ та НК. Вертикальні пунктирні лінії відповідають зазначеним вище режимам фрезерування. За цими умовами інструменти з НК забезпечили менший знос ($VB_{max} = 0,137$ мм), однак шорсткість обробленої поверхні була вищою ($R_a = 0,254$ мкм) порівняно з інструментами з КНБ ($VB_{max} = 0,150$ мм; $R_a = 0,242$ мкм). Рівень продуктивності ($MRR \approx 2023$ мм³/с) є ідентичним для обох варіантів, а інтегральна функція бажаності склала 0,87 для НК та 0,85 для КНБ.

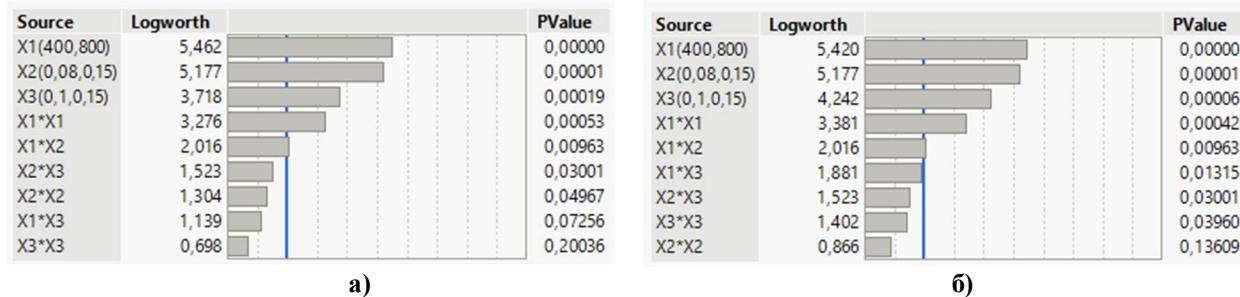


Рис.4. Результати дисперсійного аналізу значущості факторів та їх взаємодій при фрезеруванні чавуну з вермикулярним графітом CGI450: а) для інструментів з КНБ; б) для інструментів з НК.

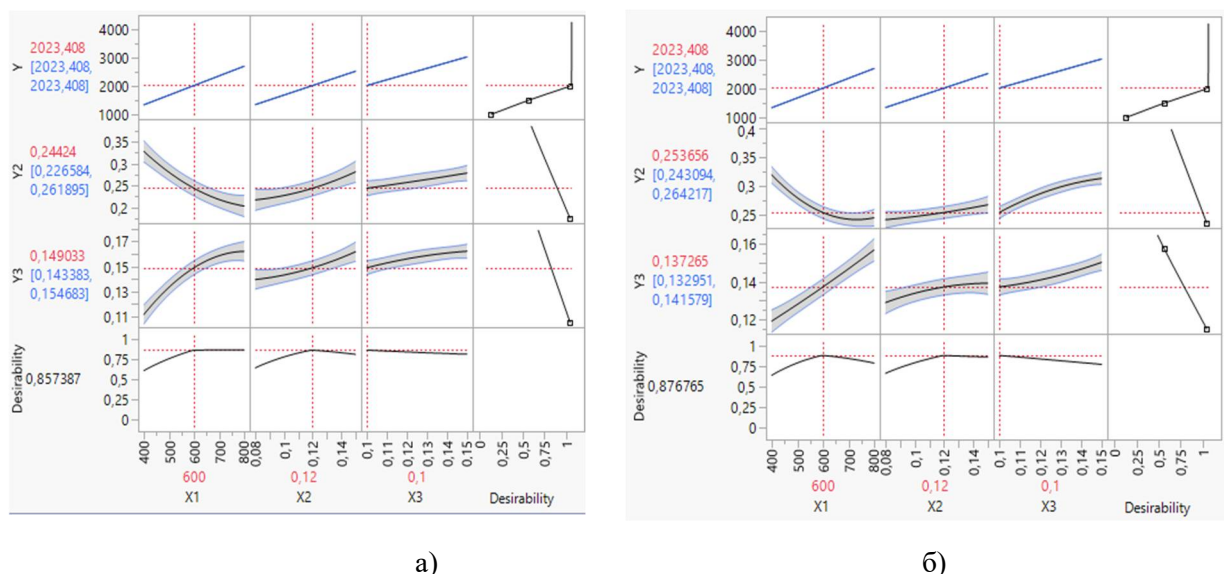


Рис.5. Профільні графіки зміни вихідних параметрів (Y – зношування інструменту; Y_2 – шорсткість R_a ; Y_3 – швидкість знімання матеріалу) та інтегральної функції бажаності залежно від основних факторів (X_1 – швидкість різання, X_2 – глибина різання, X_3 – подача на зуб): а) для КНБ; б) для НК

Таким чином, за умов збалансованих режимів фрезерування обидва типи інструментів забезпечують високу технологічну ефективність. вибір оптимального інструментального матеріалу повинен здійснюватися залежно від виробничого пріоритету: КНБ — для досягнення кращої якості поверхні, НК — для зниження зношування інструменту при стабільних умовах обробки.

Отримані результати дослідження впливу режимів фрезерування на залишкові напруження та мікроструктуру обробленої поверхні показали, що обробка інструментами з КНБ зі швидкістю 800 м/хв сприяє формуванню найбільших залишкових напружень стискання (-166,42 МПа), значному подрібненню зерен α Fe (до 369 нм), а також збільшенню мікрореформацій графіту та матриці.

Ці мікроструктурні перетворення свідчать про інтенсивне зміцнення поверхневого шару, що призводить до підвищення зносостійкості та втомної довговічності обробленої поверхні.

Величина залишкових напружень, розміри кристалів графіту 2H і α Fe, а також мікрдеформації фаз у поверхневому шарі чавуну з вермикулярним графітом CGI450

Умови обробки	Величина залишкових напружень	Розміри кристалів графіту 2H	Розміри кристалів α Fe	Мікрдеформації графіту 2H	Мікрдеформації графіту α Fe
Попередня обробка	108,3 МПа	-	-	-	-
НК 600м/хв	-48,13 МПа	407	1010	0,34%	0,45%
НК 800 м/хв	-101,51 МПа	284	210	0,11%	0,30%
КНБ 600м/хв	-82,38 МПа	272	985	0,23%	0,43%
КНБ 800м/хв	-166,42 МПа	477	369	0,36%	0,45%

У той же час, використання інструментів з нітридної кераміки призводить до зниження інтенсивності деформаційних і термічних процесів, що виражається в менших залишкових напруженнях, більших розмірах зерен α Fe і зменшенні мікрдеформацій. Це сприяє отриманню стабільної структури з меншим зношуванням інструменту, проте з дещо гіршими характеристиками шорсткості та поверхневого зміцнення.

Висновок. Інструменти з кубічного нітриду бору (КНБ) при високошвидкісному фінішному фрезеруванні ЧВГ забезпечують формування зміцненого поверхневого шару з високими залишковими напруженнями стиску (до $-166,42$ МПа), шорсткістю $Ra \leq 0,63$ мкм та високою зносостійкістю, що робить їх оптимальними для обробки відповідальних навантажених поверхонь. Інструменти з нітридної кераміки (НК) характеризуються більшою зносостійкістю, стабільністю обробки, дещо менш інтенсивним зміцненням поверхні та значно нижчою вартістю, що забезпечує їх ефективність у високоточних фінішних операціях. За однакової продуктивності обидва варіанти є доцільними для різних виробничих умов: КНБ — для ресурсоемної високоякісної обробки, НК — для економічно збалансованого фінішного фрезерування.

Список використаних джерел

1. Виговський Г.М., Бушля В.М. Визначення режимів обробки торцевими фрезами, оснащеними надтвердими матеріалами, при чорновій обробці сірого чавуну // Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. – 2015. – № 2 (73). – С. 14–19.
2. Виговський Г.М., Громовий О.А., Лоев В.Ю., Мельничук П.П. Спосіб плоского фрезерування торцевими фрезами: Деклараційний патент на винахід 40156 А Україна, B23C3/00. – № 2000074236; заявл. 17.07.2000; опубл. 16.07.2001. – Бюл. № 16.
3. Радкевич С., Залога В. Особливості процесу торцевого фрезерування з використанням інструментів з кубічного нітриду бору // Технічні науки та технології. – 2024.
4. Внуков Ю.М., Залога В.О. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів // Технічні науки та технології. – 2024.
5. Bushlya V., Zhou J., Avdovic P., Ståhl J.-E. Effect of ageing on machining performance of grey cast iron and its compensation by cutting speed management // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2024. – Vol. 43. – P. 1–12. DOI: [10.1016/j.cirpj.2024.03.004](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.03.004)
6. Bushlya V., Zhou J., Avdovic P., Ståhl J.-E. Tool wear mechanisms of pcBN tooling during high-speed machining of gray cast iron // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 77. – P. 587–590. DOI: [10.1016/j.procir.2018.09.060](https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.060)
7. Vyhovskiy H., Plysak M., Balytska N., Hlembotska L., et al. Numerical Simulation of Cutting Forces in Face Milling // Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. – 2022.
8. Lindvall R., Diaz K.M., Peng R.L., Gutnichenko O., Sirén S., Magnusson Åberg L., Norgren S., M'Saoubi R., Bushlya V., Ståhl J.-E. Wear mechanisms in Ti(C,N)-Al₂O₃ coated carbide during sustainable machining CGI // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2024.
9. Lai D., Ma J., Liao X., Ji Q., Lin Y. Wear behavior and surface roughness analysis of carbide tools with varying coating for high-speed milling of compacted graphite cast iron // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2024. – Vol. 38. – P. 3667–3681.
10. Tasdelen B., Özel C., Asiltürk İ. Machining of gray cast irons and compacted graphite iron // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – Vol. 189, No. 1–3. – P. 1–7.
11. Sadik I., Dahlman P. The influence of titanium content on tool performance in high-speed milling of compacted graphite iron // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 77. – P. 321–324.

12. Malakizadi A., Biermann D., Ståhl J.-E. Effects of workpiece microstructure and mechanical properties on tool wear and surface roughness in machining of compacted graphite iron // Wear. – 2018. – Vol. 406–407. – P. 174–182.
13. Suhaimi M.A., Kurniawan D. Effect of cryogenic high-speed milling on tool life and surface finish of compacted graphite iron // Int. J. of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 96. – P. 2271–2283.
14. Qiu H., Chen Z. The forty years of vermicular graphite cast iron development in China // China Foundry. – 2007. – Vol. 4, No. 4. – P. 261–267.
15. SinterCast. Compacted Graphite Iron – Material Data Sheet. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sintercast.com/media/1239/compacted-graphite-iron-material-data-sheet.pdf>
16. Sandvik Coromant. Cutting tools for CGI and cast iron machining. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us>