DOI: https://doi.org/10.26642/ten-2026-1(97)-123-129
УДК 621.9.025.7

С.І. Радкевич, доктор філософії
Державний університет «Житомирська політехніка»
В.М. Рубан, к.т.н., доц.
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Вплив режимів різання, типу покриття пластин і охолодження на сили різання при торцевому фінішному фрезеруванні високоміцного кулястого чавуну

У статті наведено результати експериментального дослідження сил різання під час торцевого фінішного фрезерування високоміцного чавуну з кулястим графітом EN-GJS-600-3 торцевою фрезою Sandvik Coromant R200-051Q22-12H з круглими твердосплавними різальними пластинами з PVD- та CVD-захисними покриттями за умов застосування охолоджувальних рідин та без охолодження. Обробку здійснювали за таких режимів: швидкість різання V = 100 і 150 м/хв, глибина різання t = 0,08 і 0,15 мм, а також подача на зуб Sz = 0,15 і 0,25 мм/зуб. Визначено складові сили різання Px, Py, Pz та результуючі сил різання Ррез. Досліджено вплив швидкості різання, глибини різання та подачі на зуб на силові характеристики процесу торцевого фрезерування високоміцного кулястого чавуну. Встановлено, що найбільше на результуючі сили різання впливає глибина різання та подача на зуб, збільшення яких сприяє підвищенню сил різання, тоді як підвищення швидкості різання в більшості випадків супроводжується зменшенням сил різання. Виявлено, що за однакових режимів різання пластини з PVD-покриттям забезпечують нижчі значення сил різання порівняно з пластинами з CVD-покриттям. Крім того, для пластин із PVD-покриттям охолодження сприяє зниженню Ррез на 30–40 %, тоді як для пластин із CVD-покриттям у дослідженому діапазоні режимів значення сил різання зменшується в середньому на 10–15 %. Побудовано регресійні моделі для всіх варіантів обробки, адекватність яких підтверджено значеннями коефіцієнта детермінації R^2 = 0,98–0,99. Встановлено, що найменші значення Ррез досягаються за режимів V = 150 м/хв, t = 0,08 мм, Sz = 0,15 мм/зуб і не перевищують 207Н.

***Ключові слова:** високоміцний чавун з кулястим графітом; EN-GJS-600-3; торцеве фінішне фрезерування; сили різання; твердосплавні пластини; PVD-покриття; CVD-покриття; охолодження; регресійна модель.*

Постановка проблеми. В сучасному машинобудуванні широкого використання набули високоміцні кулясті чавуни. Досить часто вони використовуються для виготовлення відповідальних корпусних деталей, що працюють в умовах високих механічних навантажень, завдяки поєднанню високої міцності, зносостійкості, добрих ливарних властивостей і здатності демпфувати вібрації. Однак обробка їх різанням є складним технологічним завданням. Причиною є виникнення високих сил різання та температур у зоні різання, які впливають на стійкість інструмента, якість обробленої поверхні, точність розмірів і стабільність процесу обробки.

Під час обробки корпусних деталей торцеве фінішне фрезерування відіграє важливу роль у формуванні кінцевих показників якості поверхневого шару обробленої поверхні. Переривчастий характер цього процесу обробки сприяє утворенню циклічних механічних і термічних навантажень на різальну кромку. Це своєю чергою підвищує ймовірність локального викришування, нерівномірного зношування різального інструмента.

Підвищити ефективність такої обробки можна завдяки застосуванню твердосплавних різальних пластин зі зносостійкими PVD- та CVD-покриттями. До того ж використання круглих різальних пластин сприяє підвищенню міцності різальної частини та стійкості до локального викришування, завдяки більш рівномірному розподілу навантажень уздовж різальної кромки. Проте ефективність їх використання залежить від умов обробки та режимів різання.

Сили різання є одним із найінформативніших показників ефективності процесу механічної обробки різанням. Аналіз складових і результуючих сил різання дозволяє оцінити навантаження на інструмент та встановити вплив параметрів різання, виду покриттів. Сили різання мають зв’язок зі стійкістю інструмента, інтенсивністю зношування, вібраціями, енергетичними витратами та якістю сформованої в процесі обробки поверхні. Своєю чергою застосування охолодження впливає на формування складових сил різання, оскільки змінює температурний режим у зоні різання, характер контактної взаємодії між інструментом і заготовкою.

Отже, визначення впливу режимів різання, типу покриття круглих твердосплавних пластин і умов обробки на складові та результуючі сили різання під час торцевого фінішного фрезерування високоміцних кулястих чавунів є важливим завданням, що потребує вирішення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам механічної обробки чавунів, зокрема сил різання, зношування різального інструмента та забезпечення якості обробленої поверхні в процесі торцевого фрезерування чавунів, присвячено велику кількість праць як вітчизняних, так і зарубіжних дослідників [1–15]. У роботі [1] визначено значення складових сил різання під час торцевого фрезерування високоміцного чавуну з кулястим графітом. Встановлено, що при швидкості різання 44 м/хв, глибині різання 1,8 мм та подачі 0,28 мм/зуб сили різання становлять $Px = 1259$ Н, $Py = 466$ Н, а $Pz = 345$ Н. Автори також встановили, що складова Px є найбільшою, складова Py – меншою, а складова Pz – найменшою; тобто основне навантаження під час торцевого фрезерування припадає на головну складову різальної сили.

У роботі [2] досліджували різальні сили для трьох різних марок високоміцного чавуну із кулястим графітом. Було встановлено, що сили різання зростають зі збільшенням подачі та глибини різання і зменшуються зі збільшенням швидкості різання. Крім того, виявлено, що наявність Ti або TiC у складі інструменту зменшує схильність до утворення налипання та, відповідно, зменшує сили різання. Отож, сили різання визначаються не тільки умовами різання, а й поєднанням властивостей матеріалу заготовки та складу матеріалу інструменту.

У роботі [3] було проведено порівняння КНБ та твердосплавного інструменту з покриттям $TiCN + Al_2O_3 + TiN$ під час сухого точіння високоміцного чавуну з кулястим графітом, де зазначено перевагу КНБ. Однак недоліком є те що вартість різальних пластин з КНБ є значно більшою по відношенню до твердосплавних інструментів з покриттями, і використання його потребує економічного обґрунтування.

У роботі [4] порівняно інструмент із твердого сплаву без покриття з двома інструментами, що мають багатошарове покриття $TiN + TiCN + Al_2O_3 + TiN$ товщиною 5 і 10 мкм, під час точіння високоміцного чавуну з кулястим графітом. Було встановлено, що при збільшенні швидкості різання з 125 до 200 м/хв головна сила різання зменшилася для всіх інструментів: для інструменту без покриття – з 387 до 334 Н, для інструмента з покриттям 5 мкм – з 370 до 331 Н, а для інструменту з покриттям 10 мкм – з 351 до 330 Н.

Автори в [5] досліджували сили різання в процесі механічної обробки та зношування різальних інструментів з твердосплавів з покриттями та без і підтвердили, що сили різання зменшується зі збільшенням швидкості різання для всіх досліджуваних інструментів. Ними також було виявлено, що зі збільшенням зношування інструменту зусилля різання зростають, а інструменти з покриттям забезпечують більш стабільні значення сил різання, ніж інструменти без покриття. У досліджені [6] зауважено, що керамічні інструменти створюють більші сили різання під час фрезерної обробки чавунів з кулястим графітом, але забезпечують вищу якість оброблюваної поверхні.

У роботах [7–13] наголошується на важливості врахування конструктивних особливостей торцевих фрез та їх впливу на сили різання та якість обробленої поверхні. Зокрема в роботах [7, 12] зазначено, що застосування круглих різальних пластин при обробці важкооброблюваних матеріалів забезпечує підвищену міцність різальної кромки, рівномірний розподіл навантаження, та, як наслідок, зниження сил різання.

Незважаючи на значний обсяг наукових досліджень, присвячених оброблюваності високоміцних чавунів із кулястим графітом, питання їх обробки методом фінішного торцевого фрезерування за допомогою круглих твердосплавних різальних пластин із покриттям, в умовах застосування охолодження та без нього, не було достатньо вивчене і потребує подальшого дослідження.

Метою дослідження є визначення впливу умов різання, типу покриття пластин та умов обробки на складові сил різання, а також визначення оптимальних умов обробки торцевим фінішним фрезеруванням виробів з високоміцного чавуну з кулястим графітом EN-GJS-600-3.

Методологія досліджень та аналіз результатів. Експериментальні дослідження проводилися на універсальному обробному центрі DMU 80 eVo з використанням торцевої фрези Sandvik Coromant R200- 051Q22-12H. Як різальні пластини використовували два типи круглих твердосплавних пластин: RCHT 12 04 M0-PL 1010 з покриттям TiAlN PVD та RCKT 12 04 M0-KH 3330 з покриттям $TiCN+Al_2O_3+TiN$ CVD.

Для вимірювання складових різальної сили використовувався динамометр KISTLER типу 9257B.

Обробку торцевим фрезеруванням виконували за таких режимів різання: швидкість різання $V = 100$ і 150 м/хв, глибина різання $t = 0{,}08$ і 0,15 мм, а також подача на зуб $Sz = 0{,}15$ і 0,25 мм/зуб. Дослідження проводилося для чотирьох варіантів обробки: PVD без охолодження, PVD з охолодженням, CVD без охолодження та CVD з охолодженням.

Як матеріал заготовки було обрано високоміцний чавун із кулястим графітом марки EN-GJS-600-3. Цей матеріал було обрано через його широке застосування у виробництві відповідальних деталей машин та механізмів та складність його обробки, що пов’язана з підвищеними механічними та тепловими навантаженнями в зоні різання.

Під час експериментів було визначено складові різальної сили Px, Py та Pz.

На основі отриманих даних було побудовано графіки залежності різальних сил від параметрів та умов різання (рис. 1) та визначено результуючі різальні сили $P_{рез}$. Встановлено, що їх значення складових сил різання та результуючих сил значною мірою залежать від типу покриття інструменту. Для інструментів із PVD-покриттям було виявлено виражену нерівномірність розподілу складових сил різання: у більшості випадків складова Px майже вдвічі перевищує Pz, тоді як Py займає проміжне положення. Це пояснюється тим, що PVD-покриття тонші та забезпечують утворення гострішої різальної кромки, що сприяє локалізації процесу деформації матеріалу. В результаті основна частина опору різанню реалізується в одному домінуючому напрямку (Px), тоді як інші складові залишаються відносно меншими.

Для інструментів з CVD-покриттями розподіл складових сил інший: складові Px і Pz мають подібні значення, що вказує на більш рівномірний розподіл навантаження в зоні контакту «інструмент – заготовка». Це пов'язано з більшою товщиною та жорсткістю CVD-покриття, що призводить до збільшення площі контакту та залучення більшого об'єму матеріалу до процесу деформації. Як наслідок, силове навантаження розподіляється по декількох напрямках, а не концентрується в одному.

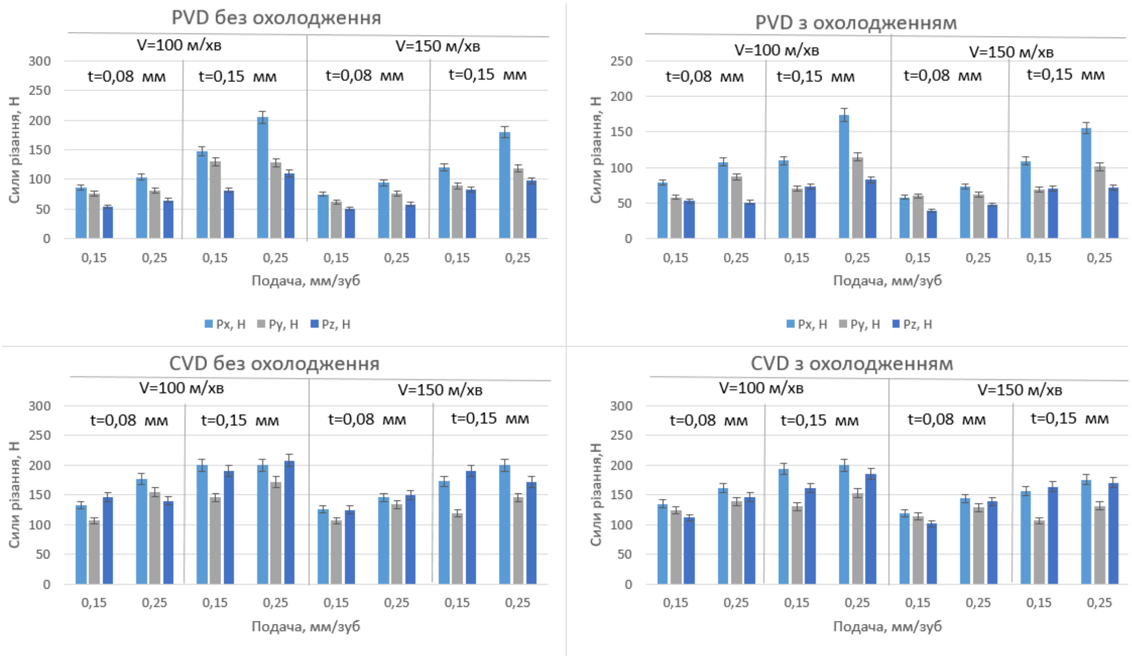


Рис. 1. Залежність складових сили різання від подачі на зуб, глибини різання та швидкості різання при використанні інструментів з PVD та CVD покриттями в умовах сухої обробки та з охолодженням

Однак, незважаючи на більш рівномірний розподіл складових сил різання для CVD-покриттів, їхні результуючі сили різання більші, ніж для PVD-покриттів. Це можна пояснити підвищеним тертям у зоні різання, більшою площею контакту та зниженням ефективної гостроти різальної кромки, що призводить до посилення пластичної деформації матеріалу.

Результуючі сили різання обчислювали як векторну суму їх складових за виразом:

$$Pрез = \sqrt{(Px^2 + Py^2 + Pz^2)}.$$

На основі розрахунків були побудовані регресійні моделі для чотирьох варіантів обробки для результуючих сил різання:

твердосплав із PVD-покриттям без охолодження:

$$Pрез = 66{,}98 - 0{,}03 \cdot V + 1135{,}37 \cdot t - 352{,}45 \cdot Sz - 6{,}71 \cdot V \cdot t + 1{,}3 \cdot 2V \cdot Sz + 4960{,}67 \cdot t \cdot Sz;$$

твердосплав із PVD-покриттям з охолодженням:

$$Pрез = 86{,}62 - 0{,}09 \cdot V - 711{,}13 \cdot t + 366{,}19 \cdot Sz + 4{,}52 \cdot V \cdot t - 4{,}34 \cdot V \cdot Sz + 5410{,}34 \cdot t \cdot Sz;$$

твердосплав із CVD-покриттям без охолодження:

$$Pрез = 6{,}94 - 0{,}06 \cdot V + 2032{,}48 \cdot t + 892{,}48 \cdot Sz - 2{,}78 \cdot V \cdot t - 1{,}34 \cdot V \cdot Sz - 3453{,}08 \cdot t \cdot Sz;$$

твердосплав із CVD-покриттям з охолодженням:

$$Pрез = 50{,}45 - 0{,}09 \cdot V + 1721{,}07 \cdot t + 639{,}70 \cdot Sz - 3{,}81 \cdot V \cdot t - 0{,}14 \cdot V \cdot Sz - 2303{,}14 \cdot t \cdot Sz,$$

де V – швидкість різання, м/хв; t – глибина різання, мм; Sz – подача на зуб, мм/зуб.

Коефіцієнт детермінації (R^2) для кожної залежності коливається в межах від 0,98 до 0,99, що підтверджує високу адекватність побудованих регресійних моделей та їх придатність для аналізу й прогнозування досліджуваних параметрів процесу фінішного торцевого фрезерування високоміцних чавунів з кулястим графітом з використанням твердосплавних інструментів із захисними PVD- та CVD-покриттями, як з охолодженням, так і без нього.

Поверхні відгуку, отримані на основі побудованих регресійних моделей, наведено на рисунках 2 та 3.

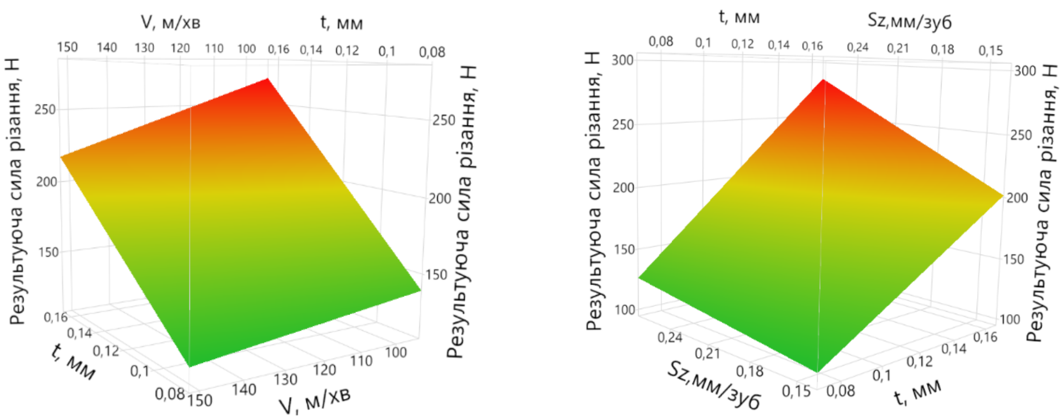
Аналіз поверхонь відгуку показує, що у всіх досліджених випадках із збільшенням глибини різання t та подачі на зуб Sz збільшується результуюча сила різання Ррез. Збільшення швидкості різання V супроводжується зменшенням Ррез. Найнижчі значення результуючої сили спостерігалися для твердосплавного інструменту з PVD-покриттям в умовах охолодження (92 Н), тоді як найвищі значення спостерігалися для твердосплавного інструменту з CVD-покриттям в умовах без охолодження (приблизно 350 Н).

Оптимальні умови для торцевого фінішного фрезерування високоміцних чавунів з кулястим графітом з використанням твердосплавних інструментів з покриттям є:

– швидкість різання V = 150 м/хв;
– глибина різання t = 0,08 мм;
– подача на зуб Sz = 0,15 мм/зуб.

За цих умов для твердосплавних інструментів з PVD-покриттям без охолодження отримана сила різання становить близько 110 Н; для твердосплавних інструментів з PVD-покриттям з охолодженням – близько 92 Н; для твердосплавних інструментів з CVD-покриттям без охолодження – близько 207 Н; а для твердосплавних інструментів з CVD-покриттям з охолодженням – близько 194 Н.

Твердосплав з PVD-покриттям без охолодження



Твердосплав з PVD-покриттям з охолодженням

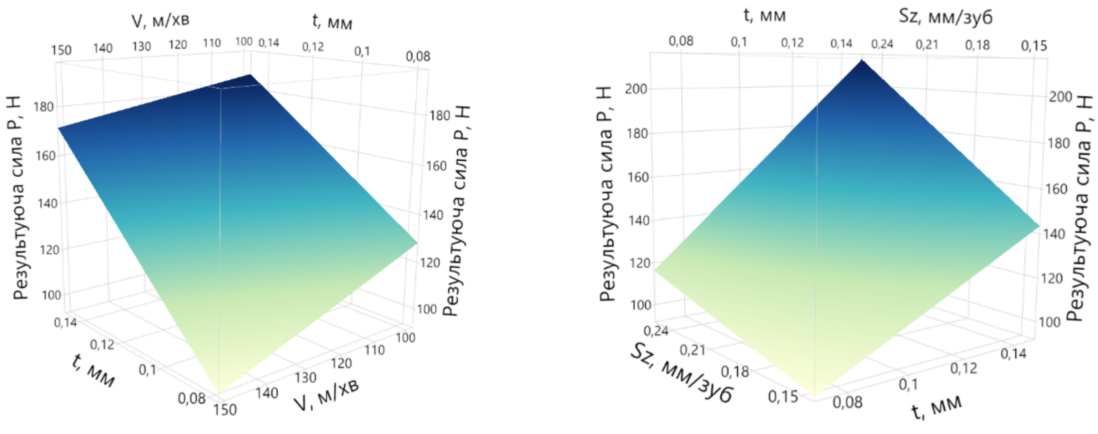
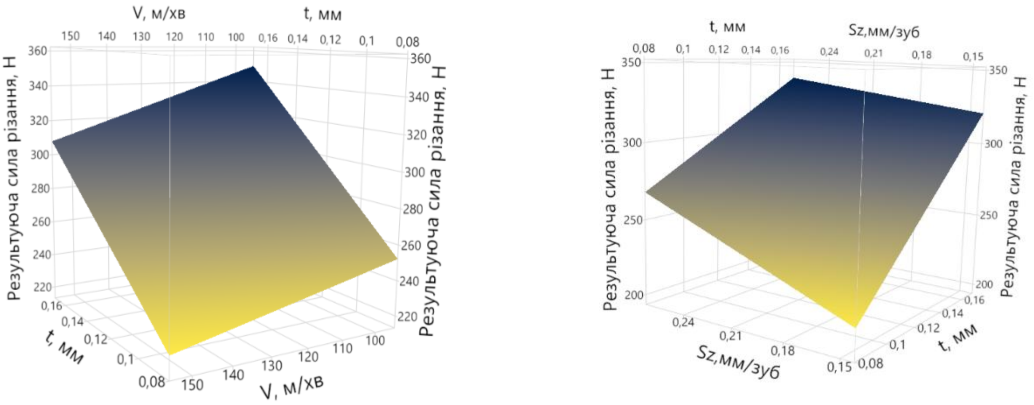


Рис. 2. Поверхні відгуку результуючої сили різання Ррез для твердосплавних пластин з PVD без охолодження та з охолодженням

Твердосплав з CVD-покриттям без охолодження



Твердосплав з CVD-покриттям з охолодженням

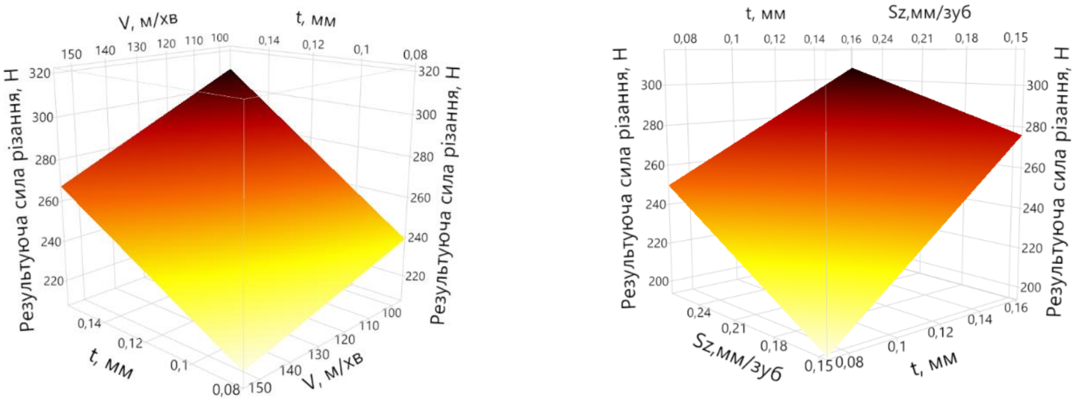


Рис. 3. Поверхні відгуку результуючої сили різання Pрез для твердосплавних пластин з CVD без охолодження та з охолодженням

Висновки. Визначено оптимальні параметри різання, що забезпечують найнижчі значення результуючої сили різання під час торцевого фінішного фрезерування високоміцного чавуну EN-GJS-600-3, а саме: швидкість різання 150 м/хв, глибина різання 0,08 мм та подача на зуб 0,15 мм/зуб. За цих умов для круглих твердосплавних пластин з PVD-покриттям результуюча сила різання становить приблизно 110 Н під час сухої обробки та приблизно 92 Н при використанні охолоджувальної рідини, тоді як для пластин з CVD-покриттям відповідні значення вищі – приблизно 207 Н і 194 Н. Було показано, що використання пластин з PVD-покриттям зменшує як складові, так і результуючі сили різання порівняно з пластинами з CVD-покриттям, а використання охолодження сприяє ще більшому зменшенню силового навантаження на інструмент.

Список використаної літератури:

1. Experimental study of nodular cast iron alloys during milling / *B.Savković, P.Kovač, M.Gostimirović and other*. – 2010.
2. *Ham I.* Machinability of nodular cast irons. Part I: Tool forces and flank adhesion / *I.Ham, K.Hitomi, G.L.Thuering* // Transactions of the ASME. Journal of Engineering for Industry. – 1961. – P. 142–153.
3. Experimental investigation on the machinability of nodular ductile iron with cubic boron nitride and tungsten carbide inserts / *K.M. Kumar, K.Arun, N.Sathishkumar and other* // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 39, Part 4. – P. 1386–1389. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.862.
4. Performance of uncoated and coated carbide tools in turning FCD700 using FEM simulation / *H.Yanda, J.A. Ghani, M.Rizal, C.H. Che Haron* // International Journal of Simulation Modelling. – 2015. – Vol. 14, № 3. – P. 416–425. DOI: 10.2507/IJSIMM14(3)4.286.
5. Tool life performance of multilayer hard coatings produced by HTCVD for machining of nodular cast iron / *R.Yiğit, E.Çelik, F.Findik, S.Koksal* // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2008. – Vol. 26, Issue 6. – P. 514–524. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2007.12.003.

6. Tool life assessment of high strength cast iron alloys in dry face milling operations / *A.Reis, G.H.N. Fernandes, J.A.G. Sousa and other* // Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – Vol. 111. – P.180–193.
7. Фінішне торцеве фрезерування важкооброблюваних залізовуглецевих сплавів : монографія / *П.П. Мельничук, Н.О. Балицька, Л.Є. Глембоцька та ін.* – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2025. – 240 с.
8. Дослідження впливу сил різання при чистовому торцевому фрезеруванні на процеси формоутворення оброблюваних поверхонь / *Г.М. Виговський, В.М. Бушля, О.А. Громовий, М.М. Плисак* // Технічна інженерія. – 2023. – № 2 (92). – С. 53–59. DOI: 10.26642/ten-2023-2(92)-53-59.
9. Шляхи удосконалення процесу обробки плоских поверхонь деталей фрезеруванням / *О.А. Громовий, Г.М. Виговський, В.М. Бушля, Н.О. Балицька* // Технічна інженерія. – 2020. – № 2 (86). – С. 48–53. DOI: 10.26642/ten-2020-2(86)-48-53.
10. Machining performance of pearlitic–ferritic nodular cast iron with coated carbide and silicon nitride ceramic tools / *W.Grzesik, J.Rech, K.Żak, C.Claudin* // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2009. – Vol. 49, Issue 2. – P. 125–133. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2008.10.003.
11. High-Speed Machining of Malleable Cast Iron by Various Cutting Tools Coated by Physical Vapor Deposition / *S.Li, H.Lin, T.Zhang and other* // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 34. DOI: 10.1186/s10033-021-00561-8.
12. Конструктивне рішення торцевих фрез зі змінними непереточуваними пластинами для обробки плоских поверхонь деталей з чавунів / *С.І. Радкевич, Л.Є. Глембоцька, П.П. Мельничук, В.А. Кирилович* // Технічна інженерія. – 2022. – № 1 (89). – С. 45–54. DOI: 10.26642/ten-2022-1(89)-45-54.
13. *Антонюк В.С.* Аналіз температур в зоні різання та сил різання при лезовій обробці чавуну з вермикулярним графітом / *В.С. Антонюк* // Технічна інженерія. – 2025. – № 2 (96). – С. 19–23. DOI: 10.26642/ten-2025-1(95)-19-23.
14. Дослідження сил різання під час точіння високотвердих чавунів / *В.А. Дербаба, С.Т. Пацера, О.О. Богданов та ін.* // Збірник наукових праць НГУ. – 2023. – № 74. – С. 143–153.
15. Suchasni instrumentální materialy u mashynobuduvanni / *V.O. Zaloga, V.D. Goncharov, V.D. Goncharov, O.O. Zaloga*. – Kirovohrad : KNTU, 2013.

References:

1. Savković, B., Kovač, P., Gostimirović, M. et al. (2010), «Experimental study of nodular cast iron alloys during milling».
2. Ham, I., Hitomi, K. and Thuering, G.L. (1961), «Machinability of nodular cast irons. Part I: Tool forces and flank adhesion», *Transactions of the ASME. Journal of Engineering for Industry*, pp. 142–153.
3. Kumar, K.M., Arun, K., Sathishkumar, N. et al. (2021), «Experimental investigation on the machinability of nodular ductile iron with cubic boron nitride and tungsten carbide inserts», *Materials Today: Proceedings*, Vol. 39, Part 4, pp. 1386–1389, doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.862.
4. Yanda, H., Ghani, J.A., Rizal, M. and Che Haron, C.H. (2015), «Performance of uncoated and coated carbide tools in turning FCD700 using FEM simulation», *International Journal of Simulation Modelling*, Vol. 14, No. 3, pp. 416–425, doi: 10.2507/IJSIMM14(3)4.286.
5. Yiğit, R., Çelik, E., Findik, F. and Koksal, S. (2008), «Tool life performance of multilayer hard coatings produced by HTCVD for machining of nodular cast iron», *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 26, Issue 6, pp. 514–524, doi: 10.1016/j.ijrmhm.2007.12.003.
6. 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.
7. Melnychuk, P.P., Balytska, N.O., Glembotska, L.Ye. et al. (2025), *Finishne tortseve frezeruvannia vazhkoobrobliuvanykh zalizovuhletsevykh splaviv*, monohrafiia, Derzhavnyi universytet «Zhytomyrska politekhnika», Zhytomyr, 240 p.
8. Vyhovskyi, H.M., Bushlia, V.M., Hromovyi, O.A. and Plysak, M.M. (2023), «Doslidzhennia vplyvu syl rizannia pry chystovomu tortsevomu frezeruvanni na protsesy formoutvorennia obrobliuvanykh poverkhon», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (92), pp. 53–59, doi: 10.26642/ten-2023-2(92)-53-59.
9. Hromovyi, O.A., Vyhovskyi, H.M., Bushlia, V.M. and Balytska, N.O. (2020), «Shliakhy udoskonalennia protsesu obrobky ploskykh poverkhon detalei frezeruvanniam», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (86), pp. 48–53, doi: 10.26642/ten-2020-2(86)-48-53.
10. Grzesik, W., Rech, J., Żak, K. and Claudin, C. (2009), «Machining performance of pearlitic–ferritic nodular cast iron with coated carbide and silicon nitride ceramic tools», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, Issue 2, pp. 125–133, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2008.10.003.
11. Li, S., Lin, H., Zhang, T. et al. (2021), «High-Speed Machining of Malleable Cast Iron by Various Cutting Tools Coated by Physical Vapor Deposition», *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 34, doi: 10.1186/s10033-021-00561-8.
12. Radkevych, S.I., Glembotska, L.Ye., Melnychuk, P.P. and Kyrylovych, V.A. (2022), «Konstruktyvne rishennia tortsevykh frez zi zminnymy neperetochuvanymy plastynamy dlia obrobky ploskykh poverkhon detalei z chavuniv», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (89), pp. 45–54, doi: 10.26642/ten-2022-1(89)-45-54.
13. Antoniuk, V.S. (2025), «Analiz temperatur v zoni rizannia ta syl rizannia pry lezovii obrobtsi chavunu z vermykuliarnym hrafitom», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (96), pp. 19–23, doi: 10.26642/ten-2025-1(95)-19-23.
14. Derbaba, V.A., Patsera, S.T., Bohdanov, O.O. et al. (2023), «Doslidzhennia syl rizannia pid chas tochinnia vysokotverdykh chavuniv», *Zbirnyk naukovykh prats NHU*, No. 74, pp. 143–153, doi: 10.33271/crpnmu/74.143.
15. Zaloga, V.O., Honcharov, V.D., Honcharov, V.D. and Zaloga, O.O. (2013), *Suchasni instrumentalni materialy u mashynobuduvanni*, KNTU, Kirovohrad.

Радкевич Світлана Іванівна – доктор філософії з прикладної механіки Державного університету «Житомирська політехніка».

https://orcid.org/0000-0002-8791-1653.

Наукові інтереси:

– обробка матеріалів різанням;
– проєктування різальних інструментів.

Рубан В'ячеслав Миколайович – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

https://orcid.org/0000-0002-9216-3506.

Наукові інтереси:

– підвищення працездатності різального інструменту й технологічного забезпечення якості та експлуатаційних характеристик деталей машин і приладів;
– конструювання різальних інструментів;
– механічна обробка важкооброблюваних матеріалів.

Radkevych S.I., Ruban V.M.

The effect of cutting conditions, insert coating type, and cooling on cutting forces during face finish milling of high-strength spheroidal grade cast iron

This article presents the results of an experimental study of cutting forces during face finishing of high-strength spheroidal graphite cast iron EN-GJS-600-3 using a Sandvik Coromant R200-051Q22-12H face milling cutter with round carbide inserts featuring PVD and CVD coatings under both uncooled and cooled conditions. The cutting force components Px, Py, Pz, and the resultant cutting force Prez were determined. The influence of cutting speed, depth of cut, and feed per tooth on the force characteristics of the face milling process of high-strength spheroidal graphite cast iron was investigated. It was found that cutting depth and feed per tooth have the greatest influence on the resultant cutting forces; increasing these parameters leads to higher cutting forces, whereas increasing the cutting speed in most cases results in lower cutting forces. It was found that under identical cutting conditions, PVD-coated inserts provide lower cutting forces compared to CVD-coated inserts. Furthermore, for PVD-coated inserts, cooling reduces P_(cut) by 30–40 %, whereas for CVD-coated inserts, within the studied range of conditions, cutting forces decrease by an average of 10–15 %. Regression models were constructed for all machining variants, the adequacy of which was confirmed by R^2 values of 0.98–0.99. It was established that the lowest values of P_(cut) are achieved under the conditions V = 150 m/min, t = 0,08 mm, Sz = 0,15 mm/tooth and do not exceed 207 N.

Keywords: high-strength spheroidal graphite cast iron; EN-GJS-600-3; face finishing milling; cutting forces; carbide inserts; PVD coating; CVD coating; cooling; regression model.

Стаття надійшла до редакції 09.01.2026.