

Аналіз температур у зоні різання та сил різання при лезовій обробці чавуну з вермикулярним графітом

У статті проаналізовано вплив морфології графітових включень та фізико-механічних властивостей чавунів на температурно-силовий стан у зоні різання при лезовій обробці. Розглянуто особливості обробки сірих чавунів (СЧ), чавунів з вермикулярним графітом (ЧВГ) і високоміцних чавунів з кулястим графітом (ВЧК), що широко застосовуються в елементах машин, які працюють в умовах високих термомеханічних навантажень. Проведено порівняльний аналіз температур різання та складових сил для СЧ, ЧВГ і ВЧК на основі експериментальних та модельованих даних, наведених у наукових дослідженнях. Встановлено, що ЧВГ характеризується підвищеною твердістю та зниженою теплопровідністю, що ускладнює тепловідведення, сприяє локальному перегріванню зони різання та інтенсифікує зношування інструмента. Показано, що зі зростанням швидкості різання, подачі та глибини обробки спостерігається підвищення температури та сил різання, особливо в умовах сухої обробки. FEM-модельовання підтвердило ефективність такого підходу для прогнозування напружено-деформованого стану, однак вимагає врахування зношування ріжучої кромки та реальних умов теплообміну для підвищення точності.

Окрему увагу приділено оцінці ефективності сучасних охолоджувальних технологій. Зокрема, застосування системи $ScCO_2$ -MQL дозволяє суттєво знизити температуру в зоні різання, стабілізувати процес та збільшити стійкість інструмента при високошвидкісному фрезеруванні ЧВГ.

Ключові слова: чавун з вермикулярним графітом; температура різання; сили різання; теплопровідність; FEM-модельовання; кубічний нітрид бору; мінералокераміка.

Постановка проблеми. Широке застосування чавунів у машинобудуванні зумовлене їх сприятливими фізико-механічними властивостями, зокрема високою ливарністю, хорошими експлуатаційними характеристиками та відносно низькою вартістю порівняно з легованими сталями аналогічного класу міцності [1–3]. Залежно від форми графітових включень чавуни поділяються на сірі (СЧ), вермикулярні (ЧВГ) та високоміцні з кулястим графітом (ВЧК) (рис. 1), кожен з яких характеризується специфічними механічними та оброблювальними властивостями (табл. 1). ЧВГ та ВЧК завдяки поєднанню високої міцності, термостійкості, та здатності протистояти циклічним механічним і термічним навантаженням зазвичай використовуються у відповідальних елементах двигунів внутрішнього згоряння, випускних колекторах і гальмівних системах, де діють підвищені температури, багатократне навантаження та інтенсивне локальне зношування [4, 5]. Численні дослідження підтверджують, що морфологія графіту прямо впливає на інтенсивність тепловиділення, тип утвореної стружки та рівень сил різання, тим самим визначаючи оброблюваність конкретного типу чавуну [6–15]. Взаємозв'язок між формою графітових включень і типом металевої матриці визначає не лише макромеханічні характеристики чавуну, але й специфіку його поведінки під навантаженням у зоні різання. Така структура впливає на тепловий баланс, генерацію напружень і формування мікротріщин, що безпосередньо пов'язано з якістю обробленої поверхні та ресурсом інструмента.

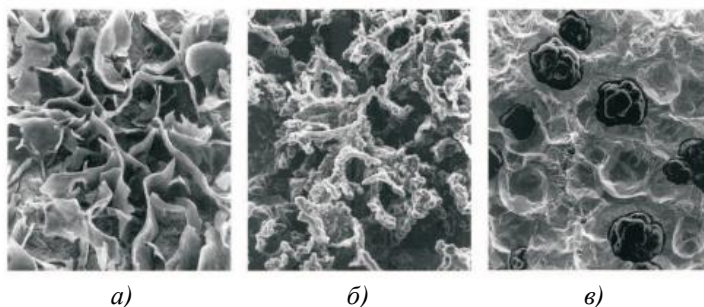


Рис. 1. Морфологія графітових включень у різних типах чавунів:
а) пластинчастий графіт у сірому чавуні, б) вермикулярний графіт у чавуні з вермикулярною графітовою структурою, в) кулястий графіт у високоміцному чавуні з кулястим графітом

Фізико-механічні характеристики чавунів [15]

Властивість	СЧ	ЧВГ	ВЧК
Тимчасовий опір розриву, МПа	250	450	750
Модуль пружності, ГПа	105	150	160
Відносне подовження, %	0	1,5	5
Відносна демпфувальна здатність	1	0,35	0,22
Твердість	179–202	217–241	217–255
Теплопровідність, Вт/(м·К)	48	38	32

Теплові аспекти процесу різання

Високі температури в зоні різання при обробці ЧВГ підтверджено експериментально (Souza, Tooptong). При точінні мінералокерамічним інструментом температура сягала 742–920 °С, що суттєво перевищує показники для сірого чавуну (рис. 2), й супроводжувалося зростанням зносу задньої поверхні інструмента.

Обмежена теплопровідність перешкоджає ефективному відведенню тепла, сприяючи його акумулюванню у зоні різання та прискорюючи руйнування інструментального матеріалу. За даними [11, 12], до 80 % теплоти виводиться через стружку завдяки її високій деформації та тертю. Застосування комбінованого охолодження ScCO₂-MQL забезпечує зниження температури на 30–40 % порівняно з сухою обробкою, що значно підвищує термостабільність процесу.

Температура в зоні різання залежить від сил різання. Кількість тепла (Вт) від деформації матеріалу, яке поступає в заготовку та інструмент, можна визначити при використанні залежності [16]:

$$Q_{\text{ди-з}} = 0,427 \left[P_{Z0}v - (P_{N0} \cos \gamma + P_{Z0} \sin \gamma) \frac{v}{k_1} \right] (1 - b^*),$$

де b^* – коефіцієнт, який визначає, яка частина теплоти деформації йде в стружку

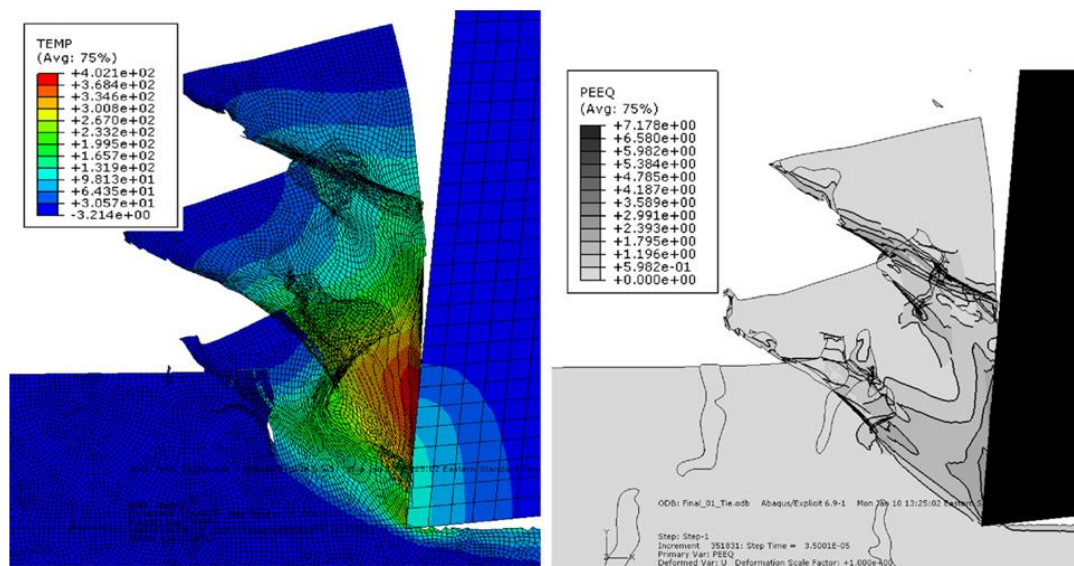


Рис. 2. Розподіл температури в зоні різання при обробці ЧВГ (0,1 мм/об при 400 м/хв)

Температура та сили різання зростають зі збільшенням швидкості різання (V_c), подачі (S_z) та глибини різання (t), незалежно від типу чавуну чи охолоджувального середовища. Це обумовлено посиленням пластичної деформації та збільшенням швидкості тертя між стружкою та інструментом [26]. Серед досліджуваних матеріалів найвищу температуру різання зафіксовано для ВЧК, що пов'язано з його вищою твердістю, щільністю й низькою теплопровідністю (рис. 3–4).

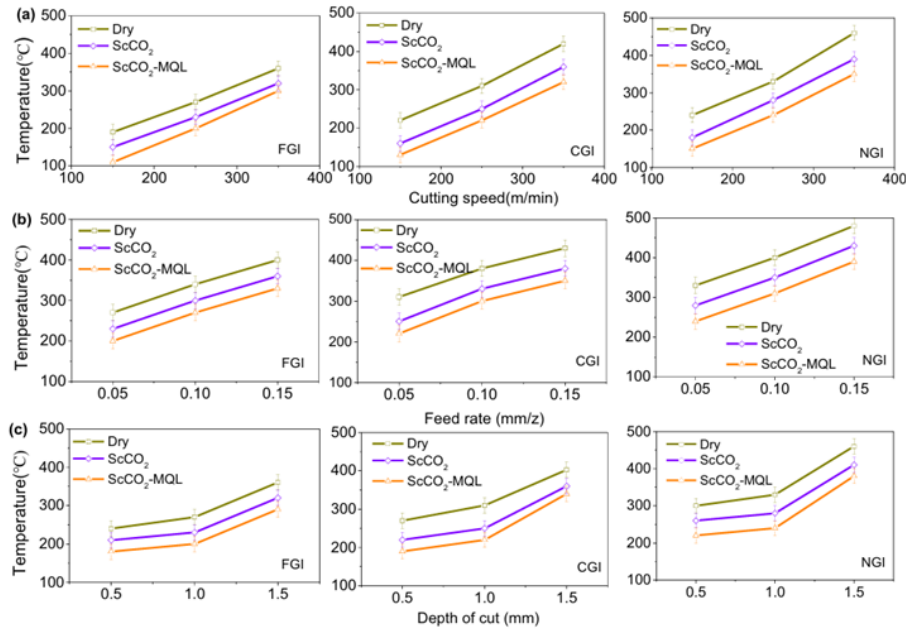


Рис. 3. Зміна температури для СЧ, ЧВГ та ВЧК залежно від: (а) швидкості різання, (б) подачі, (с) глибини різання ар в умовах сухої обробки, охолодження ScCO_2 та комбінованого охолодження $\text{ScCO}_2\text{-MQL}$

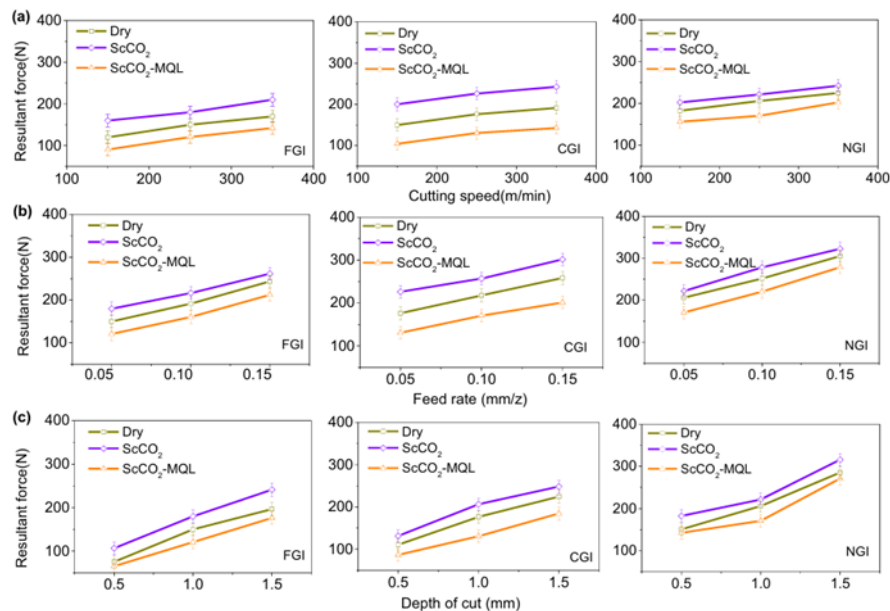


Рис. 4. Зміна сил різання для СЧ, ЧВГ та ВЧК залежно від: (а) швидкості різання, (б) подачі, (с) глибини різання ар в умовах сухої обробки, охолодження ScCO_2 та комбінованого охолодження $\text{ScCO}_2\text{-MQL}$

Ускладнене формування стружки та інтенсивне зношування інструмента під час обробки ЧВГ і ВЧК призводять до зростання сил різання порівняно з СЧ. Наприклад, при точінні без МОР при режимах $vc = 300$ м/хв, $f = 0,3$ мм/об, $ap = 1,5$ мм, результуюча сила різання для ЧВГ і ВЧК перевищувала 930 Н. Для СЧ вона становила менше 800 Н [13]. Під час свердління ЧВГ сили різання були на 21 % більші, ніж для СЧ [14].

У роботі [7] було здійснено моделювання сил різання методом скінченних елементів (FEM), яке підтвердило чітку залежність сил різання від основних режимів – швидкості, подачі, глибини. Як видно з

рисунку 5, змодельовані та експериментальні значення демонструють подібні тренди. Однак FEM-моделі, як правило, недооцінюють сили через ідеалізовану геометрію інструмента без врахування початкового затуплення різальної кромки. Знос виникає майже миттєво, що зумовлює поступове збільшення навантаження.

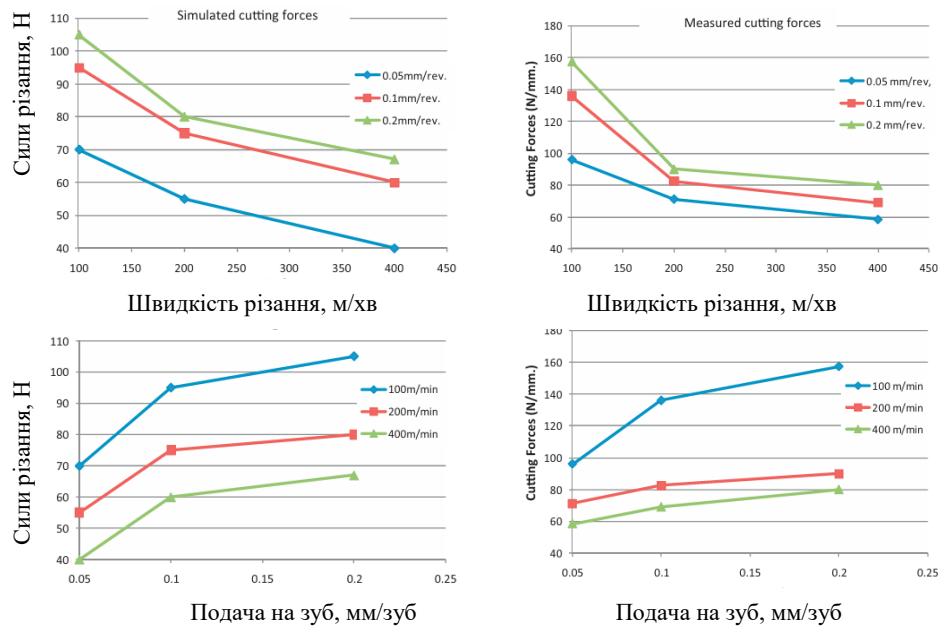


Рис. 5. Експериментально виміряні та змодельовані сили різання за різних швидкостей і подач [7]

Висновки. У результаті аналітичного огляду встановлено, що температура в зоні різання та рівень силового навантаження є критичними факторами, що визначають ефективність обробки чавунів, зокрема з вермикулярною графітовою структурою. Більшість досліджень підтверджують, що ЧВГ характеризується меншою теплопровідністю та більшою твердістю порівняно з сірим чавуном, що спричиняє локальне накопичення тепла, погіршення умов теплообміну та прискорене зношування інструмента. Встановлено, що підвищення швидкості різання, подачі та глибини обробки призводить до зростання температури та сил різання, особливо в умовах сухого фрезерування. При цьому величини сил при обробці ЧВГ значно перевищують відповідні значення для СЧ, що зумовлено структурною жорсткістю та складністю стружкоутворення. Аналіз джерел також свідчить про ефективність застосування чисельного моделювання для прогнозування температурного та силового стану, хоча моделі потребують удосконалення з урахуванням зносу інструменту й реальних умов тертя. Перспективним напрямом виявлено використання інноваційних охолоджувальних технологій, зокрема $\text{ScCO}_2\text{-MQL}$, які дозволяють істотно знизити температуру в зоні різання та стабілізувати процес обробки.

References:

- 1 Sahin, Y., Kilicli, V., Ozer, M. and Erdogan, M. (2010), «Comparison of abrasive wear behavior of ductile iron with different dual matrix structures», *Wear*, No. 268, pp. 153–165.
- 2 Abedi, H.R., Fareghi, A., Saghafian, H. and Kheirandish, S.H. (2010), «Sliding wear behavior of a ferritic–pearlitic ductile cast iron with different nodule count», *Wear*, No. 268, pp. 622–628.
- 3 Cheng, X., Hu, S., Song, W. and Xiong, X.A. (2014), «Comparative study on gray and nodular cast irons surface melted by plasma beam», *Vacuum*, No. 101, pp. 177–183.
- 4 Cueva, G., Sinatoro, A., Guesser, W.L. and Tschiptschin, A.P. (2023), «Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors», *Wear*, No. 255, pp. 1256–1260.
- 5 Tvarozek, J. and Lickova, M. (2023), «Structural and stress conditions of graphite cast irons after intense heating and controlled cooling», *American International Journal of Contemporary Research*, No. 3, pp. 49–69.
- 6 Ghaderi, A.R., Nili Ahmadabadi, M. and Ghasemi, H.M. (2023), «Effect of graphite morphologies on the tribological behavior of austempered cast iron», *Wear*, No. 255, pp. 410–416.
- 7 Mohammed, W.M., Ng, E. and Elbestawi, M.A. (2012), «Modeling the effect of compacted graphite iron microstructure on cutting forces and tool wear», *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, No. 5 (2), pp. 753–765, doi: 10.1016/j.cirpj.2012.03.002.

- 8 Tu, L., Chen, J., An, Q. et al. (2021), «Machinability improvement of compacted graphite irons in milling process with supercritical CO₂-based MQL», *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 67, p. 703–714, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.05.
- 9 Ucun, I. and Aslantas, K. (2011), «Numerical simulation of orthogonal machining process using multilayer and single-layer coated tools», *Int J Adv Manuf Technol.*, No. 54, pp. 899–910.
- 10 Nguyen, D., Tooptong, S., Park, K.H. and Kone, P. (2020), «Formation mechanism of alumina layer in protecting cubic boron nitride inserts in turning cast irons», *Int J Mach Tool Manuf.*, No. 153, 103539.
- 11 Tu, L.Q., Tian, S., Xu, F. et al. (2020), «Cutting performance of cubic boron nitride-coated tools in dry turning of hardened ductile iron», *J Manuf Process*, No. 56, pp. 158–68.
- 12 Tu, L.Q., Xu, F., Wang, X. et al. (2020), «Temperature distribution of cubic boron nitride-coated cutting tools by finite element analysis», *Int J Adv Manuf Technol*, No. 105, pp. 197–207.
- 13 Nayyar, V., Kaminski, J., Kinnander, A. and Nyborg, L. (2012), «An experimental investigation of machinability of graphitic cast iron grades; flake, compacted and spheroidal graphite iron in continuous machining operations», *Procedia CIRP*, No. 1 (1), pp. 488–493, doi: 10.1016/J.PROCIR.2012.04.087.
- 14 Silva, da A.E., Silva, da L.R.R., Reis, dos A. et al. (2020), «Ezugwu, Relationship between mechanical and metallurgical properties with machinability when drilling high-strength cast irons», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, No. 106 (7–8).
- 15 Guo, Y., Wang, C.Y., Yuan, H. et al., «Milling Forces of Compacted Graphite Iron (CGI) and Gray Iron (GI)», *Guangdong University of Technology*.
- 16 Kovalenko, V.L., Boyko, I.A. and Melnychuk, P.P. (2022), «Zastosuvannya metodu skinchenykh elementiv dlya poshuku shlyakhiv optymizatsiyi temperaturnoho polya pry rizanni instrumentamy iz PKNB hrupy», *Tekhnichna inzheneriya*.

Антонюк Віктор Степанович – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0003-0690-2411>.

Наукові інтереси:

- підвищення працездатності різального інструменту й технологічного забезпечення якості та експлуатаційних характеристик деталей машин і приладів;
- конструювання та формування топографії зносостійких покриттів.

Antonyuk V.S.

Analysis of temperatures in the cutting zone and cutting forces during blade processing of cast iron with vermicular graphite

The article analyzes the influence of the morphology of graphite inclusions and the physical and mechanical properties of cast irons on the temperature and force conditions in the cutting zone during blade processing. The features of machining gray cast iron (GI), cast iron with vermicular graphite (CVG), and high-strength cast iron with spheroidal graphite (HSG), which are widely used in machine elements operating under high thermomechanical loads, are considered. A comparative analysis of cutting temperatures and force components for GC, VCG, and HCG is performed based on experimental and modeled data presented in scientific studies.

It has been established that SG is characterized by increased hardness and reduced thermal conductivity, which complicates heat dissipation, contributes to local overheating of the cutting zone, and intensifies tool wear. It has been shown that with an increase in cutting speed, feed rate, and machining depth, there is an increase in temperature and cutting forces, especially under dry machining conditions. FEM modeling confirmed the effectiveness of this approach for predicting the stress-strain state, but requires consideration of cutting edge wear and real heat transfer conditions to improve accuracy.

Particular attention is paid to evaluating the effectiveness of modern cooling technologies. In particular, the use of the ScCO₂-MQL system allows to significantly reduce the temperature in the cutting zone, stabilize the process, and increase tool stability during high-speed milling of cast iron with vermicular graphite.

Keywords: vermicular graphite cast iron; cutting temperature; cutting forces; thermal conductivity; FEM modeling; cubic boron nitride; mineral ceramics.

Стаття надійшла до редакції 14.04.2025.