

**Світлана Іванівна Радкевич<sup>1</sup>, Ігор Володимирович Луців<sup>2</sup>**<sup>1</sup>аспірантка кафедри механічної інженерії

Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: [asp\\_rsi@student.ztu.edu.ua](mailto:asp_rsi@student.ztu.edu.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8791-1653><sup>2</sup>доктор технічних наук, професор кафедри механічної інженерії

Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: [kmi\\_liv@ztu.edu.ua](mailto:kmi_liv@ztu.edu.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3980-428X>**ЗАЛЕЖНІСТЬ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ПОВЕРХНІ ВИРОБУ  
ВІД УМОВ РІЗАННЯ ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ**

Торцеве фрезерування є одним із найефективніших процесів механічної обробки, який забезпечує високу точність та якість плоских поверхонь виробів. Однак цей процес супроводжується виникненням внутрішніх залишкових напружень. Вони можуть бути як стискуючими, так і розтягуючими. Ці напруження можуть негативно впливати на експлуатаційні властивості виробів, тому їх слід уникати. У цій статті представлено аналіз результатів досліджень, які описують механізми утворення та прогнозування залишкових напружень під час фрезерування, а також методи їх виявлення та інші допоміжні способи контролю. Проведено аналіз механізмів формування залишкових напружень та їхня залежність від режимів різання, видів інструментальних різальних матеріалів та зношування інструмента. Описано ключові фактори, що впливають на характер і величину внутрішніх залишкових напружень, які виникають при фрезеруванні плоских поверхонь виробів із важкооброблюваних матеріалів.

**Ключові слова:** торцеве фрезерування; залишкові напруження; плоскі поверхні; сили різання; зношування; поверхневий шар.

Рис.: 7. Бібл.: 17.

**Актуальність теми дослідження** зумовлена необхідністю оптимізації умов торцевого фрезерування для забезпечення керування залишковими напруженнями, що впливають на міцність, довговічність і якість виробів у сучасному машинобудуванні.

**Постановка проблеми.** Надійна робота сучасних машин і механізмів значною мірою залежить від експлуатаційних властивостей їхніх відповідальних деталей, які у свою чергу залежать від точності виготовлення, якості поверхні й поверхневого шару деталі. Якість поверхневого шару визначається мікрогеометрією поверхні, фізико-механічними властивостями матеріалу, станом залишкових напружень, твердістю, структурою та зносостійкістю. Ці параметри формуються під час механічної обробки на фінішних операціях. Вони безпосередньо впливають на експлуатаційні властивості деталей, включаючи стійкість до утворення тріщин, втомну міцність і здатність протистояти зносу. Розуміння розподілу і типів залишкових напружень дозволяє передбачити втомні руйнування [1]. Особливої уваги потребують плоскі поверхні великих розмірів, які піддаються значним статичним і динамічним навантаженням (наприклад, станини верстатів, корпуси машин, блоки циліндрів). Нерівномірність розподілу залишкових напружень у таких поверхнях може призводити до викривлення, зниження точності монтажу, виникнення мікротріщин та втрату структурної цілісності. Одним із найефективніших способів обробки плоских поверхонь є торцеве фрезерування [2-4]. Цей процес дозволяє створювати поверхні з низькою шорсткістю та високою точністю завдяки використанню сучасних інструментів і обладнання. Їх використання зменшує зношуваність та забезпечує стабільність обробки. Проте водночас торцеве фрезерування супроводжується утворенням залишкових напружень у поверхневому шарі [5]. Вони можуть негативно впливати на довговічність деталі. Ці залишкові напруження можуть бути двох типів: стискуючі та розтягуючі. Більш бажаними в процесі фінішної обробки є залишкові напруження стиску, оскільки вони можуть уповільнювати поширення тріщин, тим самим продовжуючи термін служби виробів [6]. Залишкові напруження розтягу є небажаними, адже можуть негативно впливати на міцність та інші механічні властивості заготовок, спричиняючи такі дефекти, як деформація та тріщини під час експлуатації виробів [7]. Зменшити цей негативний вплив під

час фрезерування можна за рахунок вибору оптимальних режимів різання (швидкість, подача, глибина різання) та різального інструментального матеріалу. Тому актуальним є дослідження залежностей характеру і величини залишкових напружень від них.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Є багато робіт закордонних і вітчизняних учених, присвячених дослідженню виникнення залишкових напружень у поверхневих шарах після механічної обробки. Зокрема, це роботи таких науковців, як М. В. Новіков, В. О. Шепелєв, С. А. Клименко, П. П. Мельничук, В. А. Сторошук, С. Huang, R. Su, B. Zou, J. Wang, Z. Liu, C. Li, Smith, J. Yang Y. досліджували. Однак серед них не так багато робіт, у яких досліджувалося питання виникнення внутрішніх напружень у поверхневому шарі після фінішного торцевого фрезерування чавунів. Науковці М. Е. Kara, А. Т. Kuzu, М. Bakka, Іu J., С. Huang, Su R., Zou B., Wang J., Liu Z., Li C., Smith, J. Yang Y. досліджували характер формування залишкових напружень при торцевому фрезеруванні чавунів із вермикулярним графітом. Вони повідомили, що в зоні різання під час торцевого фрезерування чавунів, при взаємодії механічних і теплових процесів, можуть виникати залишкові напруження як стиску, так і розтягу, впливаючи на якість оброблених поверхонь та експлуатаційні характеристики готових виробів [10-17].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що механізм утворення залишкових напружень та їхній рівень під час торцевого фрезерування залежить від багатьох факторів, таких як вид інструментального матеріалу, режими різання та властивості матеріалу оброблюваної деталі. Проте недостатньо вивченим залишається вплив взаємодії цих факторів, характер залишкових напружень у мікроструктурі матеріалу та способи ефективного управління ними для забезпечення бажаних характеристик готових виробів.

**Мета статті** - дослідити механізми утворення внутрішніх напружень та їхній рівень у результаті торцевого фрезерування плоских поверхонь.

**Виклад основного матеріалу.** Для визначення залишкових напружень використовуються руйнівні, напівруйнівні та неруйнівні методи. Руйнівні методи (різання та свердління отворів (ICHN)), дозволяють вимірювати характер та рівень внутрішніх залишкових напружень, але змінюють структуру зразка. Неруйнівні методи, такі як рентгенівська дифракція (XRD) і ультразвукове тестування, дозволяють вимірювати характер та рівень внутрішніх залишкових напружень, не змінюючи структуру зразка. Кожен метод обирається залежно від геометрії, глибини аналізу та вимог до точності [10]. Найчастіше для визначення залишкових напружень, які виникають після фрезерування плоских поверхонь виробів, застосовують метод рентгенівської дифракції. Цей метод був застосований у всіх проаналізованих наукових працях. У більшості робіт були представлені результати щодо сили різання та залишкового напруження, що дозволило встановити зв'язок між рівнем прикладених сил під час обробки та характером і величиною залишкових напружень у поверхневих шарах матеріалу. У роботі [12] автори проаналізували, як змінюються сили різання, шорсткість поверхні та залишкові напруження при зміні режимів різання та різального інструментального матеріалу. Згідно з отриманими залежностями в роботі [12] зазначено, що при збільшенні швидкості різання від 200 до 1000 м/хв сили різання спочатку зростали, досягаючи максимуму, а потім знижувалися як для кераміки, так і для твердосплавів. При низьких швидкостях різання, коли сили різання високі формуються розтягуючі залишкові напруження. При середніх швидкостях різання, максимальні сили різання збільшують пластичну деформацію, сприяючи утворенню стискаючих залишкових напружень у глибших шарах, але можуть посилювати ризик пошкоджень по-

верхні. При високих швидкостях різання, відмічалось зменшення залишкових напружень і перехід їх до нейтрального стану. При збільшенні подачі як для кераміки, так і для твёрдосплава збільшувалися сили різання, формуючи сильні стискаючі залишкові напруження, але це підвищує ризик утворення дефектів через пластичну деформацію. Загалом інструменти з кераміки створюють більш виражені стискаючі напруження, особливо при великих подачах, завдяки своїм високотемпературним властивостям.

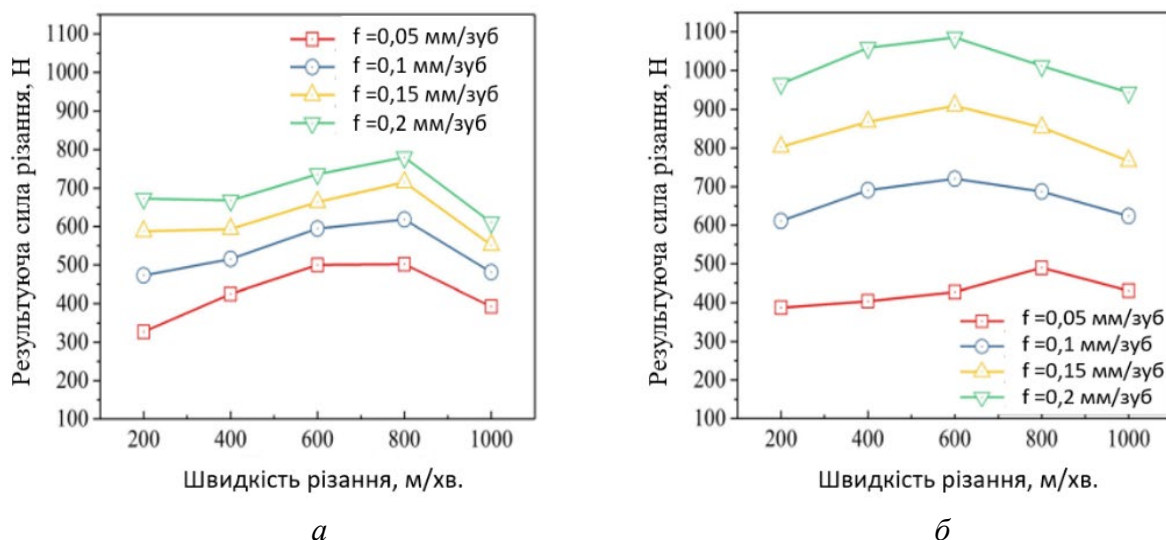


Рис. 1. Результуючі сили різання при фрезеруванні чавуну з вермикулярним графітом при використанні:

а – твёрдосплавного інструменту; б – керамічного інструмента [12]

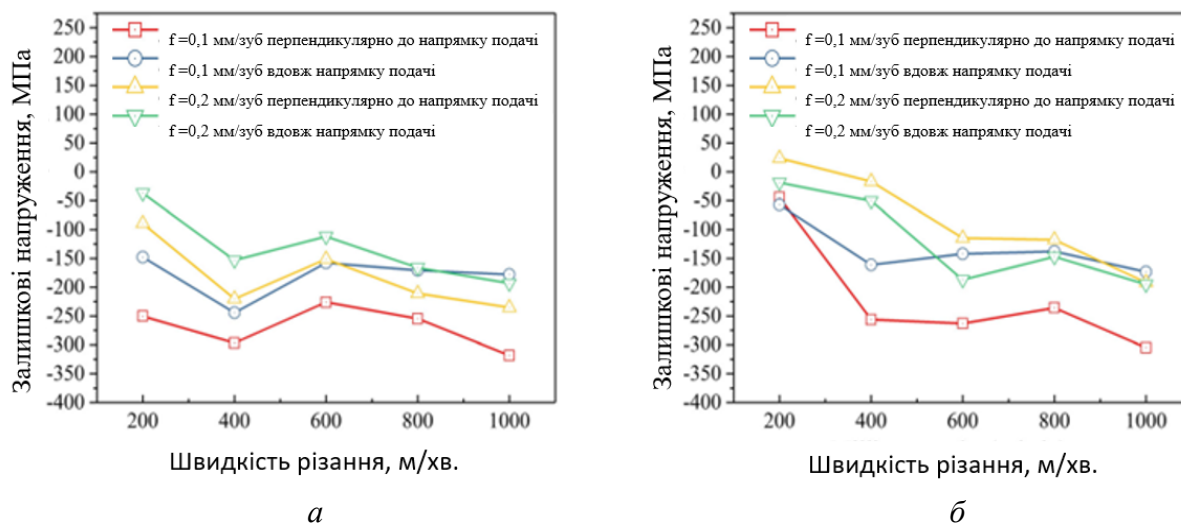


Рис. 2. Залишкові напруження при використанні твёрдосплавного інструменту (а), керамічного інструмента (б) [12]

Залежності, отримані в роботі [13], показують взаємозв'язок між режимами й умовами обробки та силами різання і залишковими напруженнями при торцевому фрезеруванні сірого чавуну, чавуну з вермикулярним графітом та чавуну з кулястим графітом твёрдосплавом з покриттям. При сухому різанні високі швидкості та подачі викликають збільшення сил різання та зміну розподілу залишкових напружень

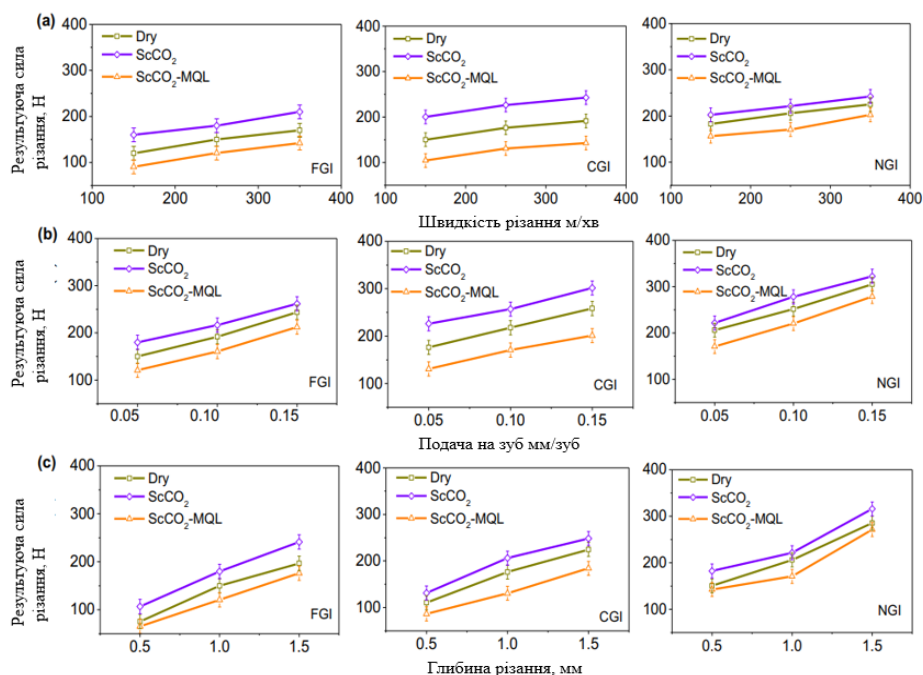


Рис. 3. Залежності результуючої сили різання від швидкості різання, подачі та глибини при торцевому фрезеруванні твердосплавом із покриттям:  
 а – сірого чавуну; б – чавуну з вермикулярним графітом;  
 с – чавуну з кулястим графітом [13]

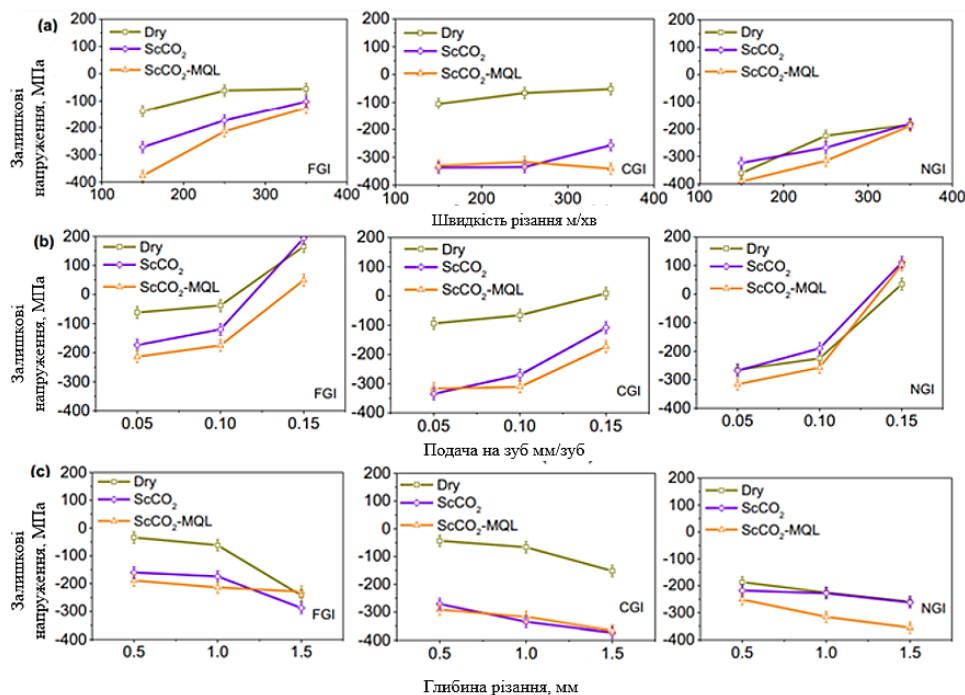


Рис. 4. Залежності залишкових напружень від швидкості різання, подачі та глибини при торцевому фрезеруванні твердосплавом з покриттям:  
 а – сірого чавуну; б – чавуну з вермикулярним графітом;  
 с – чавуну з кулястим графітом [13]

Використання охолоджуючої рідини ScCO<sub>2</sub>-MQL сприяло формуванню стискаючих залишкових напружень. Контроль температури і сили різання за допомогою використання охолоджуючої рідини мінімізує шорсткість поверхні, забезпечуючи високу якість обробки навіть при підвищені подачі. Це свідчить про те, що термічні й механічні фактори мають бути враховані в комплексі для оптимізації процесу фрезерування.

У роботі [11] науковці дослідили залежність залишкових напружень від режимів різання та кореляцію з силами різання. Дослідники [11] повідомили, що вплив подачі на залишкові напруження у поверхневому шарі деталей з чавуну з вермикулярним графітом (CGI) є більш значущим, ніж вплив швидкості різання. При зростанні швидкості різання та подачі виникали залишкові напруження розтягу, які зростали від +111 до +283 МПа. Також вони показали, що залишкові напруження можуть бути передбачені шляхом аналізу значень тангенціальної сили, потужності та активної роботи. Вони визначають механічну енергію в процесах фрезерування. Ці передбачення допомагають уникати сильних розтягуючих напружень, які можуть призвести до передчасного утворення тріщин або зниження довговічності деталі.

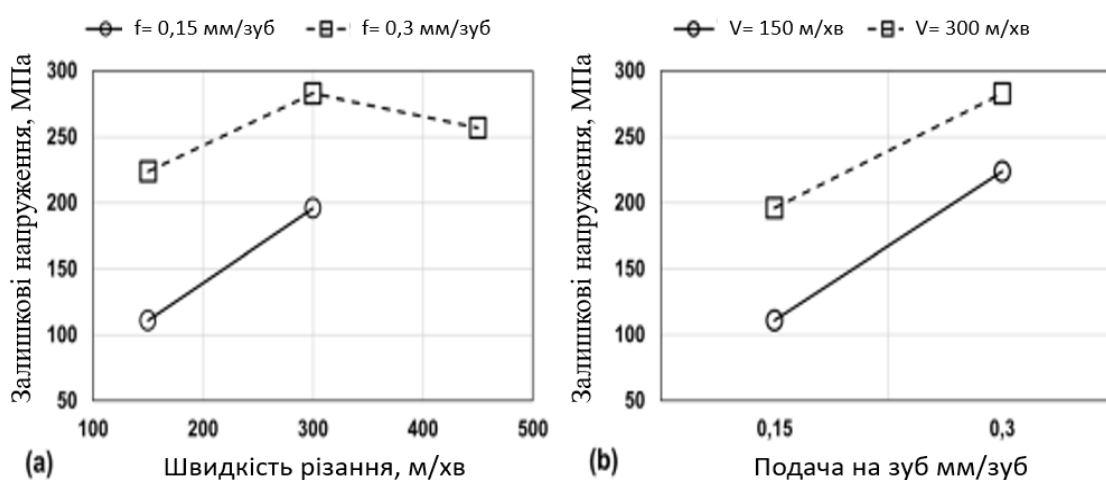


Рис. 5. Вплив швидкості різання і подачі на залишкові напруження при фрезеруванні чавуну з вермикулярним графітом [11]

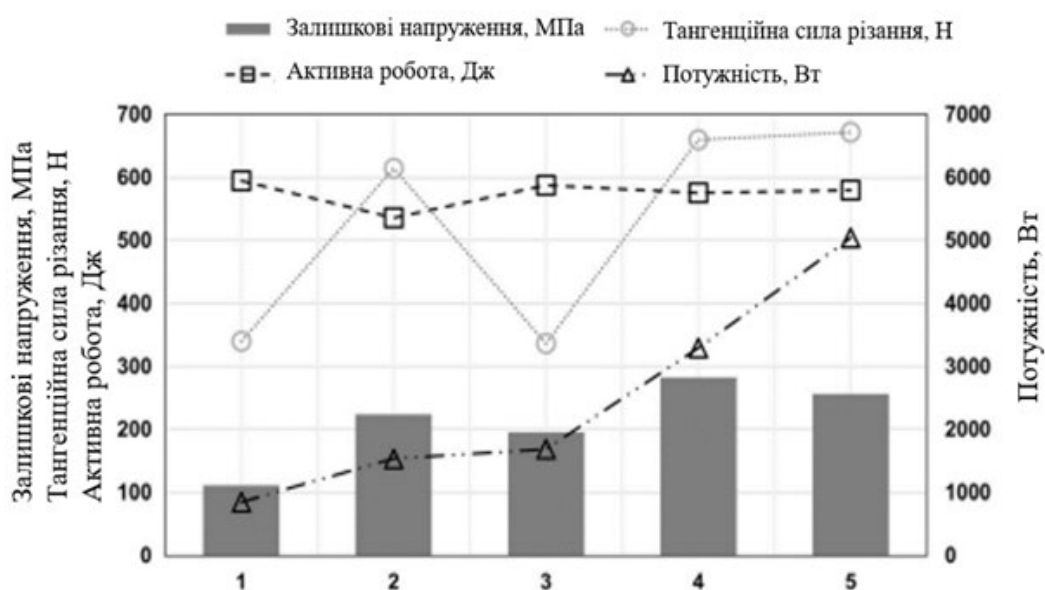


Рис. 6. Вплив тангенціальної сили різання, потужності та активної роботи на залишкові напруження при фрезеруванні чавуну з вермикулярним графітом [11].

На характер і рівень залишкових напружень також впливає геометрія різального інструмента [1]. У процесі різання геометрія різального інструмента змінюється, що призводить до нестабільного розподілу навантаження в зоні обробки. Це, у свою чергу, підвищує ризик утворення небажаних залишкових напружень [4]. У роботі [14] автори дослідили як впливає зношування на внутрішні напруження в поверхневому шарі і проаналізували вплив зносу задньої поверхні ( $V_b = 0,03$  мм та  $V_b = 0,26$  мм) на залишкові напруження, досліджуючи різну глибину поверхневого шару. Для поверхневого шару (0–20 мкм) в обох випадках  $V_b$  залишкові напруження позитивні (розтягуючі), але їх величина значно вища при  $V_b = 0,26$  мм (120 МПа). У міру збільшення зносу інструмента по задній поверхні значно зростають розтягуючі залишкові напружень у поверхневому шарі на фоні посилення тертя між інструментом і деталлю. Для глибини в межах 20–40 мкм розтягуючі напруження змінюються на стискаючі, досягаючи мінімуму (-80 МПа) при  $V_b = 0,26$  мм. При  $V_b = 0,03$  мм стискаючі напруження менш виражені, але все ще присутні (-60 МПа). На глибинах в діапазоні (40–100 мкм) напруження поступово повертаються до нейтрального стану (близько 0 МПа). При  $V_b = 0,26$  мм спостерігається значне коливання значень у напруженнях. Для  $V_b = 0,03$  мм характер зміни напружень більш стабільний. Збільшення зносу по задній поверхні інструмента ( $V_b$ ) інтенсифікує термічний і механічний вплив на поверхневий шар, сприяючи виникненню значних розтягуючих напружень в поверхневих шарах оброблених поверхонь. Для забезпечення стабільності обробки, утворення стискаючих залишкових напружень і зменшення негативного впливу на якість обробленої поверхні необхідно мінімізувати знос інструмента, використовуючи відповідні режими обробки та інструменти з підвищеною зносостійкістю.

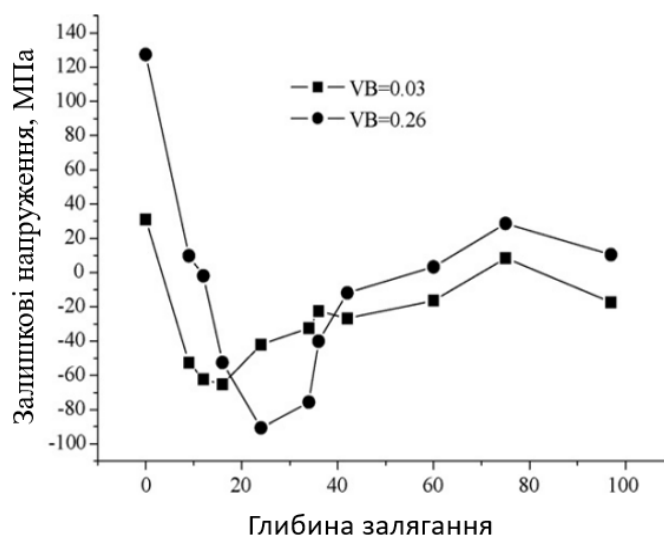


Рис. 7. Вплив зношування на внутрішні залишкові напруження [14]

**Висновок.** Відповідно до проведеного аналітичного аналізу, залишкові напруження, які утворюються під час торцевого фрезерування залежать від швидкості різання, подачі та зносу інструменту. При середніх швидкостях різання (600–800 м/хв) та низькій подачі (0,1 мм/зуб) формуються стискаючі напруження. Розтягуючі напруження виникають при низьких швидкостях, високій подачі або значному зносі інструменту. Для покращення якості поверхні рекомендується оптимізувати режими різання та забезпечувати регулярну заміну інструменту.

#### Список використаних джерел

1. Withers, P. J. Residual stress. Part 1 – Measurement techniques / P. J. Withers, Bhadeshia, H. K. D. H. // Materials Science and Technology. – 2001. – Vol. 17(4). – Pp. 355-365. DOI: <https://doi.org/10.1179/026708301101509980>.

2. Мельничук П. П. Наукові основи чистового торцевого фрезерування плоских поверхонь : дис... д-ра техн. наук : 05.03.01 / П. П. Мельничук; Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». – Київ, 2002. – 456 с.
3. Технології механообробки інструментами з надтвердих матеріалів і твердих сплавів у ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України / М. В. Новіков, В. О. Шепелев, С. А. Клименко, В. І. Лаврінченко // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2005. – Вип. 2. – С. 91-101.
4. Kalpakjian, S. *Manufacturing Engineering and Technology* / S. Kalpakjian, S. R. Schmid. – 7th SI Edition. – Publisher: Pearson Publications, Singapore, 2014. – 1216 p.
5. Residual stress generation and evaluation in milling: a review / Xiaohui Jiang [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11394-1>.
6. Predictive modelling of microstructure changes, micro-hardness and residual stress in machining of 304 austenitic stainless steel / Wenqian Zhang [et al.] // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2018. – Vol. 130-131. – Pp. 36-48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.03.008>.
7. Schulze V. *Modern Mechanical Surface Treatment: States, Stability, Effects* / Volker Schulze. – [S. l.] : Wiley & Sons, Limited, John, 2006. – 375 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/3527607811>.
8. Mohsen Soori. A Review in Machining-Induced Residual Stress [Electronic resource] / Mohsen Soori, Behrooz Arezoo // *Journal of New Technology and Materials*. – 2022. – Vol. 12 (1). – Pp. 64-83. – Mode of access: <https://hal.science/hal-03679993/document>
9. Утворення залишкових напружень та їх залежність від технологічних параметрів процесу механічної обробки деталей / Я. О. Шахбазов, В. В. Широков, І. М. Грінер, В. А. Сторощук // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2017. – № 867. – С. 56-59.
10. Yang Y. Development of a Method to Measure Residual Stresses in Cast Components with Complex Geometries [Electronic resource] / Y. Yang. – KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2020. – 120 с. – Mode of access: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1392856/FULLTEXT03.pdf>.
11. Kara M. E. Investigation of Residual Stresses Induced by Milling of Compacted Graphite Iron by x-ray Diffraction Technique / Mehmet Emre Kara, Ali Taner Kuzu, Mustafa Bakkal // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08904-3>.
12. Study on surface integrity of compacted graphite iron milled by cemented carbide tools and ceramic tools / Jiahui Niu [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 103, №. 9-12. – Pp. 4123-4134. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03592-7>.
13. Machinability improvement of compacted graphite irons in milling process with supercritical CO<sub>2</sub>-based MQL / Luqiang Tu [et al.] // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 68. – Pp. 154-168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.044>.
14. The influence of tool flank wear on residual stresses induced by milling aluminum alloy / Z. T. Tang [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209, №. 9. – Pp. 4502-4508. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.10.034>.
15. The effect of head hardening process on the residual stress of rails / Muhammet E. Turan [et al.] // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. / Journal of Rail and Rapid Transit*. – 2016. – Vol. 232, №. 2. – Pp. 589-595. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409716679450>.
16. Recent advances in residual stress measurement / P. J. Withers [et al.] // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2008. – Vol. 85, no. 3. – Pp. 118–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2007.10.007>.
17. Dronavalli S. Residual stress measurements and analysis by destructive and non-destructive techniques [Electronic resource] : master's thesis / Dronavalli S. – Las Vegas, 2004. – 46 p. DOI: <https://digitalscholarship.unlv.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2681&context=rtds>.

## References

1. Withers, P.J., & Bhadeshia, H.K.D.H. (2001). Residual stress. Part 1 – Measurement techniques. *Materials Science and Technology*, 17(4), 355–365. <https://doi.org/10.1179/026708301101509980>.
2. Melnychuk, P.P. (2002). Naukovi osnovy chystovoho tortsevoho frezeruvannya ploskykh poverkhon [Scientific bases of finishing face milling of flat surfaces]. *Doctor's thesis*.

3. Novikov, M.V., Shepelyev, V.O., Klymenko, S.A., Lavrinenko, V.I. (2005). Tekhnolohiyi mekhanobrobky instrumentamy z nadtverdykh materialiv i tverdykh splaviv u INM im. V.M. Bakulya NAN Ukrainy [Technologies of machining with tools from superhard materials and hard alloys in the V. Bakul Institute for Superhard Materials]. *Protsesty mekhanichnoyi obrobky v mashynobuduvanni – Machining processes in mechanical engineering*, 2, 91–101.
4. Kalpakjian, S., & Schmid, S.R. (2014). *Manufacturing Engineering and Technology* (7th SI Edition). Pearson.
5. Jiang, X., Wei, Y., Zhou, J., Zhan, K., Ding, Z., & Liang, S. Y. (2023). Residual stress generation and evaluation in milling: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(9–10), 3783–3812. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11394-1>.
6. Zhang, W., Wang, X., Hu, Y., Wang, S. (2018). Predictive modelling of microstructure changes, micro-hardness and residual stress in machining of 304 austenitic stainless steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 130, 36-48. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.03.008>.
7. Schulze, V. (2005). *Modern Mechanical Surface Treatment: States, Stability, Effects*. Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/3527607811>.
8. Soori, M., Arezoo, B. (2022). A Review in Machining-Induced Residual Stress. *Journal of New Technology and Materials*, 12(1), 64-83. <https://hal.science/hal-03679993/document>.
9. Shakhbazov, Ya.O., Shyrokov, V.V., Hriner, I.M., Storoshchuk, V.A. (2017). Utvorenniya zalyshkovykh napruzhen ta yikh zalezhnist vid tekhnolohichnykh parametriv protsesu mekhanichnoyi obrobky detaley [Formation of residual stresses and their dependence on the technological parameters of the process of machining parts]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Optymizatsiya vyrobnychykh protsesiv i tekhnichnyy kontrolu mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni – Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Optimisation of production processes and technical control in mechanical engineering and instrumentation*, 867, 56-59.
10. Yang, Y. (2020). *Development of a Method to Measure Residual Stresses in Cast Components with Complex Geometries*. KTH Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1392856/FULLTEXT03.pdf>.
11. Kara, M.E., Kuzu, A.T., Bakka, M. (2024). Investigation of Residual Stresses Induced by Milling of Compacted Graphite Iron by X-ray Diffraction Technique. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33, 3801–3810. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08904-3>.
12. Niu, J., Huang, C., Su, R., Zou, B., Wang, J., Liu, Z., Li, C. (2019). Study on surface integrity of compacted graphite iron milled by cemented carbide tools and ceramic tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(9-12), 4123-4134. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03592-7>.
13. Tu, L., Chen, J., An, Q., Ming, W., Xu, J., Chen, M., Lin, L., Yang, Z. (2021). Machinability improvement of compacted graphite irons in milling process with supercritical CO<sub>2</sub>-based MQL. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 154–168. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.044>.
14. Tang, Z. T., Liu, Z. Q., Pan, Y. Z., Wan, Y., Ai, X. (2009). The influence of tool flank wear on residual stresses induced by milling aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(9), 4502-4508. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.10.034>.
15. Turan, M.E., Ozcelik, S., Husem, F., Ahlatci, H., Sun, Y., Tozlu, I. (2018). The Effect of Head Hardening Process on the Residual Stress of Rails. *Proc. I. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, 232(2), 589–595. <https://doi.org/10.1177/0954409716679450>.
16. Withers, P.J., Turski, M., Edwards, L., Bouchard, P.J., Buttle, D.J. (2008). Recent Advances in Residual Stress Measurement. *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, 85(3), 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2007.10.007>.
17. Dronavalli S.B. (2004). *Residual Stress Measurements and Analysis by Destructive and Non-Destructive Techniques*. Master's thesis. University of Nevada, Reno. <https://digitalscholarship.unlv.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2681&context=rtids>.

Отримано 11.11.2024



**Svitlana Radkevych<sup>1</sup>, Ihor Lutsiv<sup>2</sup>**<sup>1</sup>PhD student of the Mechanical Engineering Department

State University "Zhytomyr Polytechnic" (Zhytomyr, Ukraine)

**E-mail:** [asp\\_rsi@student.ztu.edu.ua](mailto:asp_rsi@student.ztu.edu.ua). **ORCID**<https://orcid.org/0000-0002-8791-1653><sup>2</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor of the Mechanical Engineering Department

State University "Zhytomyr Polytechnic" (Zhytomyr, Ukraine)

**E-mail:** [kmi\\_liv@ztu.edu.ua](mailto:kmi_liv@ztu.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3980-428X>**DEPENDENCE OF RESIDUAL STRESSES IN THE WORKPIECE SURFACE ON CUTTING CONDITIONS DURING FACE MILLING**

*Presented in the article information is an overview. It discusses residual stresses occurred in the surface during face milling.*

*Face milling is one of the most effective machining processes that provides high accuracy and quality of flat surfaces of products. However, this process is accompanied by the occurrence of internal residual stresses. They can be either compressive or tensile. Tensile stresses can negatively affect the performance of products and should be avoided. This article presents an analysis of research results that describe the mechanisms of formation and prediction of residual stresses during milling, as well as methods for their detection and other auxiliary control methods.*

*An analysis of recent research and publications has shown that the mechanism of residual stress formation and its level during face milling depends on many factors, such as the type of tool material, cutting modes, and material properties of the workpiece. However, the influence of the interaction of these factors, the nature of residual stresses in the material microstructure, and ways to effectively manage them to ensure the desired characteristics of finished products remain insufficiently studied.*

*The purpose of the article is to study the mechanisms of internal stress formation and their level as a result of face milling of flat surfaces.*

*It has been established that for most tool materials, tensile residual stresses are formed at low cutting speeds at high cutting forces. At medium cutting speeds, maximum cutting forces increase the plastic deformation, contributing to the formation of compressive residual stresses in deeper layers, but can increase the risk of surface damage. At high cutting speeds, a decrease in residual stresses was found and they moved to a neutral state. Increasing the feed rate resulted in higher forces and, as a result, tensile residual stresses. Tool wear increased the force. As a result, the resulting residual stresses changed from compressive to tensile, which increased as the tool wore.*

**Keywords:** face milling; residual stresses; flat surfaces; cutting forces; wear; surface layer.

**Fig.:** 7. **References:** 17.