

Г.М. Виговський, к.т.н., доц.
О.А. Громовий, к.т.н., доц.
М.М. Плисак, аспірант

Державний університет «Житомирська політехніка»

Аналіз впливу схем розташування формоутворюючих різальних елементів на процеси деформації торцевих ступінчастих фрез

Останнім часом широкого розповсюдження знайшли методи фінішної обробки плоских поверхонь чистовими торцевими фрезами, оснащеними надтвердими матеріалами (НТМ). Однак, нестаціонарність процесу різання, яка властива процесам торцевого фрезерування, призводить до змінних деформацій технологічної системи, що може негативно вплинути на вихідні показники якості відповідальних поверхонь, від обробки яких залежать необхідні характеристики контактної жорсткості, зносостійкості, надійності механізмів та машин. У роботі досліджено осьові переміщення різальних елементів у результаті пружних деформацій корпусу торцевої ступінчастої фрези діаметром 360 мм, яка оснащена надтвердим інструментальним матеріалом (гексаніт-Р). Досліджено вплив геометричних параметрів: зміна радіального розташування формоутворюючого різального елемента, зміна діаметра отвору для клина на осьові переміщення під час фінішного фрезерування сірого чавуну СЧ-21. Встановлено, що зменшення відстані радіального розташування формоутворюючого різального елемента дозволяє значно зменшити осьові переміщення різальних елементів, але обмежить ширину фрезерування. Досліджено вплив відокремлення формоутворюючого різального елемента від чорнових на осьові переміщення. Порівняно осьові переміщення трьох варіантів фрез: торцева ступінчаста фреза; торцева ступінчаста фреза з відокремленням формоутворюючого різального елемента від чорнових; торцева ступінчаста фреза зі зміною радіального розташування формоутворюючого різального елемента. Результати дослідження підтверджують, що залишається резерв підвищення якості обробки шляхом аналізу геометричних параметрів торцевих фрез та розробки нових конструкцій, які будуть забезпечувати потрібну якість обробки.

Ключові слова: торцеве фрезерування; торцева фреза; косокутне різання; ступінчасті фрези.

Постановка проблеми. Метою процесу механічної обробки металу є зняття необхідної величини припуску й формування макро- та мікрогеометрії оброблюваних поверхонь деталей [1–4]. Для забезпечення точних розмірів та геометричної форми плоских поверхонь широкого розповсюдження знайшли методи торцевого фрезерування інструментами, оснащеними надтвердими матеріалами (НТМ), які мають ряд переваг по відношенню до шліфування, недоліком якого є низька продуктивність та дефекти поверхневого шару у зв'язку із високотемпературними процесами різання [5]. Більшість конструкцій торцевих фрез використовують звичайну схему різання з розподілом припуску за подачею, що суттєво зменшує реальну кількість ножів, що беруть участь у різанні і погіршують динаміку процесу фрезерування. Значні переваги мають конструкції спірально-ступінчастих фрез косокутного різання з безвершинними різальними кромками, оснащеними НТМ, які мають високу продуктивність обробки та зносостійкість, дозволяють отримувати поверхні малої шорсткості [6–8]. Водночас нестаціонарність процесу різання, яка властива процесам торцевого фрезерування, призводить до змінних деформацій технологічної системи, що може негативно вплинути на вихідні показники якості оброблюваних поверхонь [8–10]. Зазвичай на фінішних операціях нехтують похибками обробки, спричиненими дією сили різання, бо такі сили є досить малими [11]. Проте ряд досліджень [12–16] показав, що під час фінішної обробки торцевими ступінчастими фрезами та фрезами стандартних конструкцій відбуваються осьові деформації інструментів, що веде до коливальних положень формоутворюючих різальних елементів та погіршення якості обробки. Процеси торцевого фрезерування характеризуються нестабільними умовами різання при врзанні та виході різальних елементів із заготовки, змінними перетинами зрізу та різними умовами різання при врзанні фрези у заготовку та виходу із неї. Тому змінні сили різання викликають періодичні пружні деформації, які впливають на точність обробки, форму деталі тощо [13–16]. Величина цих похибок залежить від просторової жорсткості пружної технологічної системи, зокрема від підсистеми інструмент – деталь [9–10].

У [13] досліджували фінішне торцеве фрезерування головки двигуна фрезою діаметром 240 мм та встановили, що коливання ширини фрезерування та зміна умов різання, викликає пружні деформації корпусу фрези та осьові переміщення формоутворюючих різальних елементів, що негативно впливає на шорсткість обробленої поверхні (рис. 1). Це можна пояснити кореляцією, що спостерігається між висотою нерівності поверхні та довжиною дуги контакту формоутворюючих різальних елементів з поверхнею головки деталі (рис. 1), де сингулярність на перерізі представлена між позиціями 1 і 2, а опуклість

знаходиться між позиціями 3 і 4. На ділянках (позиції 1 і 3) спостерігається зменшення висоти нерівності оброблюваної поверхні головки двигуна на відміну від ділянок (позиції 2 та 4). Така локальна зміна нерівності поверхні виникає через коливання сил різання на ділянках (позиції 1 і 3), де час контакту формують ризальних елементів з оброблюваною поверхнею менший, а отже сумарна сила різання, яка впливає на пружну деформацію фрези, менша, на відміну від (позиції 2 та 4), де час контакту з оброблюваною поверхнею більший, а отже більша кількість ризальних елементів, які одночасно беруть участь у різанні, що призводить до збільшення сумарної сили різання, яка впливає на пружні деформації корпусу фрези та осьові переміщення формують ризальних елементів.

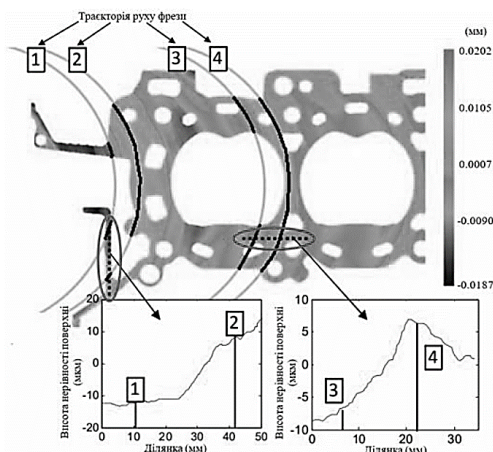


Рис. 1. Результати вимірювання шорсткості головки двигуна [13]

У дослідженнях [14–16] встановлено, що зміна сили різання вздовж траєкторії руху фрези може викликати відносне зміщення між фрезою та заготовкою, через значні удари при вході / виході ризальних елементів у / із зони різання, що викликає нерівномірні силові навантаження на технологічну систему. Внаслідок чого виникають пружні деформації корпусу фрези та осьові переміщення ризальних елементів. Це спричинить відхилення від площинності та збільшення шорсткості поверхні [17–18].

На основі отриманих експериментальних даних по фрезеруванню сірого чавуну СЧ21 (160–250 НВ) [19], автори досліджували вплив сил різання на пружні деформації корпусу фрези та осьові переміщення ризальних елементів. Для цього вони використовували ступінчасту фрезу діаметром 350 мм, оснащену пластинками із полікристалічного надтвердого матеріалу – Гексаніт-Р. Встановили, що складова сили різання P_x створює значні пружні деформації корпусу фрези та осьові переміщення ризальних елементів у напрямі, перпендикулярному до обробленої поверхні. Максимальні значення для такої конструкції фрези та режимів різання для 6-го формують ризального елемента, який розміщений в осьовому напрямі на найбільшій відстані від торця фрези, а в радіальному напрямі – на найменшій відстані від осі фрези (r), склали 0,04 мм (рис. 2, а).

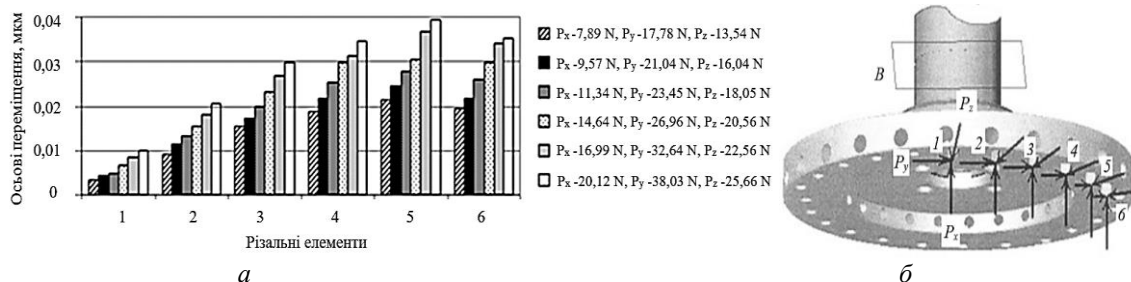


Рис. 2. Вплив складової сили різання P_x на осьові переміщення ризальних елементів: а) отримані числові значення осьових переміщень; б) схема прикладання сил різання [19]

Мета – дослідити осьові переміщення ризальних елементів, що виникають в результаті пружних деформацій корпусу торцевої ступінчастої фрези, а також ряд геометричних параметрів корпусу, які можуть значно впливати на осьові переміщення при торцевому фрезеруванні.

Постановка завдання. На основі розробленої комп'ютерної моделі торцевої ступінчастої фрези в програмі SolidWorks, для умов торцевого косокутного фрезерування інструментом із 24 ризальними елементами, оснащеним надтвердим матеріалом (гексаніт-Р), необхідно дослідити осьові переміщення ризальних елементів, що виникають у результаті пружних деформацій корпусу торцевої ступінчастої

фрези, змін радіального розташування формоутворюючого різального елемента та його відокремлення від чорнових, а також змін діаметра отвору для клина.

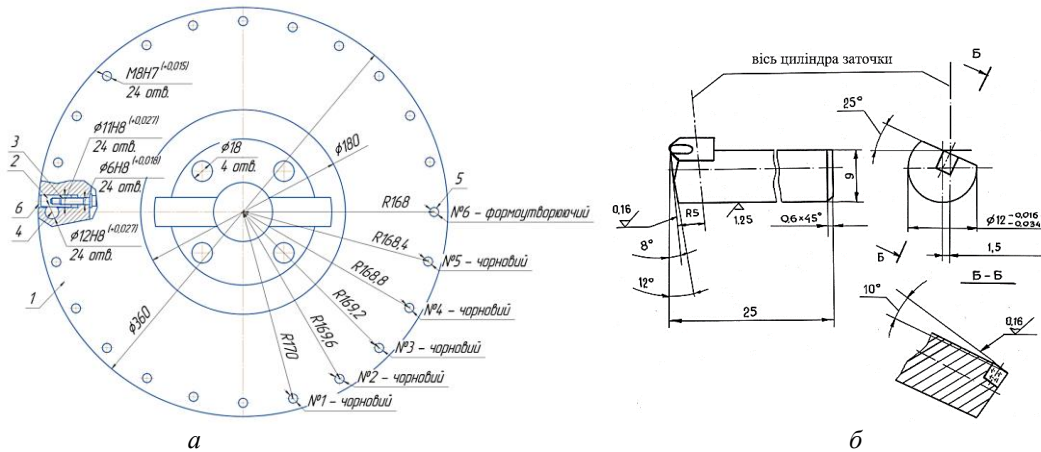


Рис. 3. Торцева ступінчаста фреза з 24 різальними елементами: а) торцева ступінчаста фреза, б) конструкція різального елемента [6]

Умови моделювання: косокутне фрезерування сірого чавуну СЧ-21; швидкість різання $v = 2,5$ м/с; подача $S_z = 0,625$ мм/зуб; глибина різання $t = 0,12$ мм; інструмент – торцева ступінчаста фреза діаметром 360 мм, оснащена 24 різальними елементами з використанням спірально-ступінчастого розташування (рис. 3, а). Закріплення та базування різальних елементів у корпусі фрези 1 здійснюється клино-гвинтовим механізмом, завдяки клину 2, що має похилий зріз та болту 3, якими здійснюється закріплення в потрібному положенні різальних елементів 4. Точне регулювання осевого положення цих різальних елементів здійснюється мікрометричними гвинтами 5. Інструментальний матеріал – гексаніт-Р. Геометрія різця: плоска передня поверхня, передній кут $\gamma = -10^\circ$, задній кут у напрямку вектора швидкості різання $\alpha_v = 12^\circ$ (рис. 3, б). Кут нахилу головних різальних кромки $\lambda = -35$. Значення складових сил різання (тангенційна – P_z , осьова – P_x , радіальна – P_y), що були виміряні під час експериментальних досліджень однозубою торцевою фрезою діаметром 250 мм [6] і комп’ютерного моделювання [20] представлені на рисунку 4. Для дослідження використовувалися максимальні значення складових сил різання, при подачі на зуб $S_z = 0,625$ (мм/зуб).

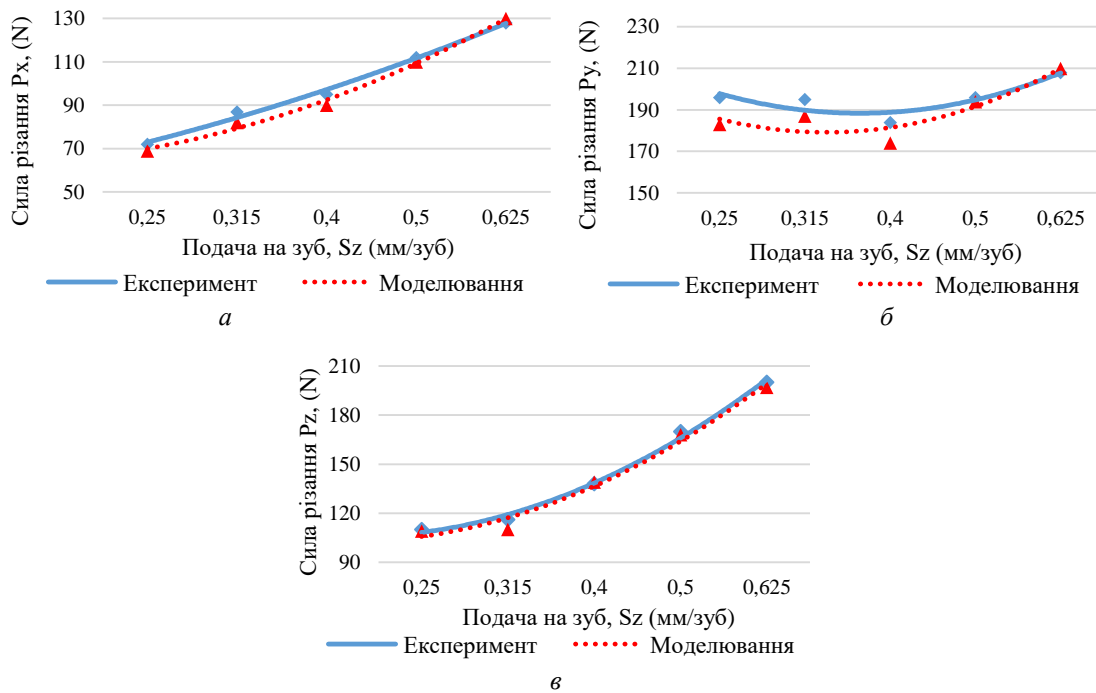


Рис. 4. Залежність складових сил різання: а) P_x від подачі на зуб S_z ; б) P_y від подачі на зуб S_z ; в) P_z від подачі на зуб S_z , при торцевому фрезеруванні сірого чавуну СЧ-21 [6, 20]

Після прикладання вказаних зусиль до різальних елементів і проведення розрахунку були отримані числові значення осьових переміщень (рис. 5). Найбільше на точність обробки впливають пружні переміщення формують формують різальних елементів від оброблюваної поверхні заготовки, що вимірюється по нормалі до неї. Тому доцільно розглянути переміщення у напрямку дії осової складової сили різання P_x .

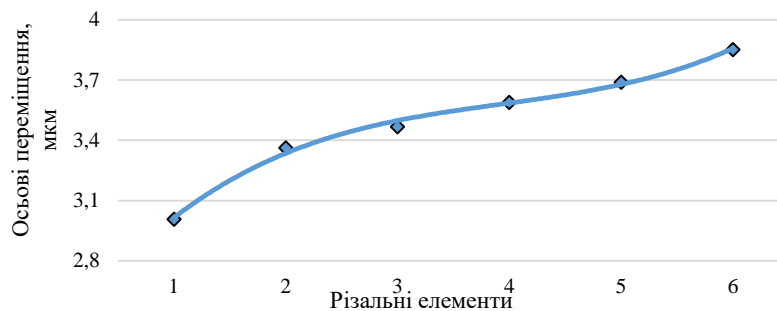


Рис. 5. Максимальні значення осьових переміщення різальних елементів у результаті пружних деформацій корпусу торцевої ступінчастої фрези при фрезеруванні сірого чавуну СЧ-21

З результатів розрахунку (рис. 5) можна зробити висновок, що осьова сила різання викликає значні пружні деформації корпусу торцевої ступінчастої фрези, які призводять до зміни положення різальних елементів у напрямі, перпендикулярному до обробленої поверхні. З наведених максимальних значень осьових переміщень різальних елементів 1–6 особливу уваги слід приділити шостому формують формують різальному елементу, який розміщений в осьовому напрямі на найбільшій відстані від торця фрези, а в радіальному напрямі – на найменшій відстані від осі фрези (r) та остаточно формує оброблену поверхню. Розраховані максимальні значення осьових переміщень формують формують різального елемента для цієї конструкції фрези і режимів різання становлять 3,85 мкм. Такі осьові переміщення різальних елементів призводять до зміни параметрів зрізаного шару, нерівномірного навантаження, зносу та неучасті у різанні окремих різальних елементів. Одним зі шляхів зменшення осьових переміщень різальних елементів є аналіз та удосконалення геометричних параметрів конструкції спроектованої торцевої ступінчастої фрези шляхом визначення параметрів, які впливають на осьові переміщення, та їх подальше врахування при оптимізації чи розробці нової конструкції. Оптимізація конструкції торцевої фрези в середовищі Ansys полягає у знаходженні таких величин конструктивних параметрів (змінних проектування), за яких цільова функція приймає максимальне чи мінімальне значення. Цільова функція цього оптимізаційного дослідження – мінімізація осьових переміщень різальних елементів фрези під дією робочого навантаження.

Отже, змінними оптимізаційного дослідження є 2 параметри:

- 1) значення радіального розташування чистового різального елемента (рис. 3, а, поз. 5), діапазон зміни 110...168 мм;
- 2) значення діаметра отвору для клина (рис. 6, а, поз. 6), діапазон зміни 11,5...16 мм.

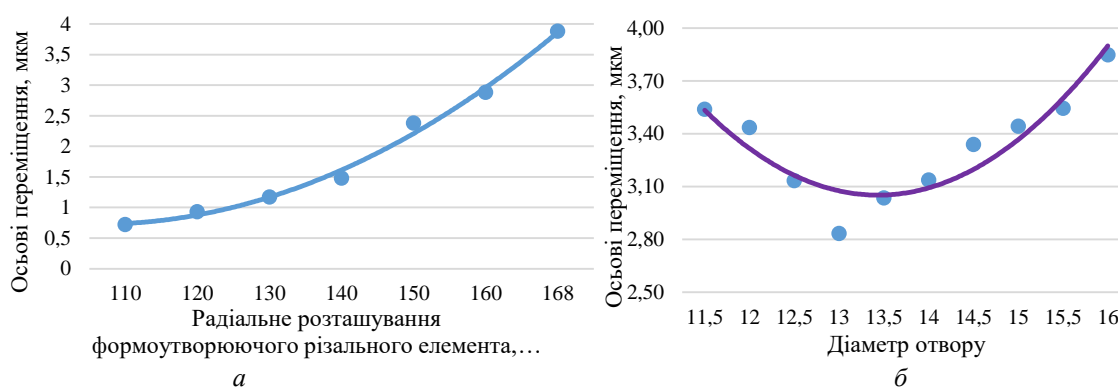


Рис. 6. Залежність осьових переміщень від зміни параметрів оптимізаційного дослідження: а) від радіального розташування формують формують різального елемента; б) від діаметра отвору для клина

Результати моделювання дають можливість зробити висновки, що зміна радіального розташування формують формують різального елемента в радіальному напрямі від осі фрези (r) (рис. 6, а) зменшить осьові переміщення з 3,85 до 0,7 мкм, проте обмежить ширину фрезерування. Змінюючи діаметр отвору для клина (рис. 6, б), можна також впливати на осьові переміщення формують формують різального елемента, що в свою чергу буде позитивно відобразитися на шорсткості обробленої поверхні.

Одним із варіантів зменшення осевих переміщень формуючого різального елемента було запропоновано відокремити його від п'яти чорнових різальних елементів. Для цього потрібно розглянути вплив 4-х факторів: радіальне розташування формуючого різального елемента (рис. 3, а, поз. 4); радіальне розташування розрізу (рис. 7, а), ширина розрізу 1 і 2 (рис. 7, а). Отже, змінними оптимізаційного дослідження були такі параметри: значення радіального розташування формуючого різального елемента – діапазон зміни 150...155 мм; значення радіального розташування розрізу – діапазон зміни 130...145 мм; значення ширини розрізу 1 (10...20 мм) і розрізу 2 (20...30 мм).

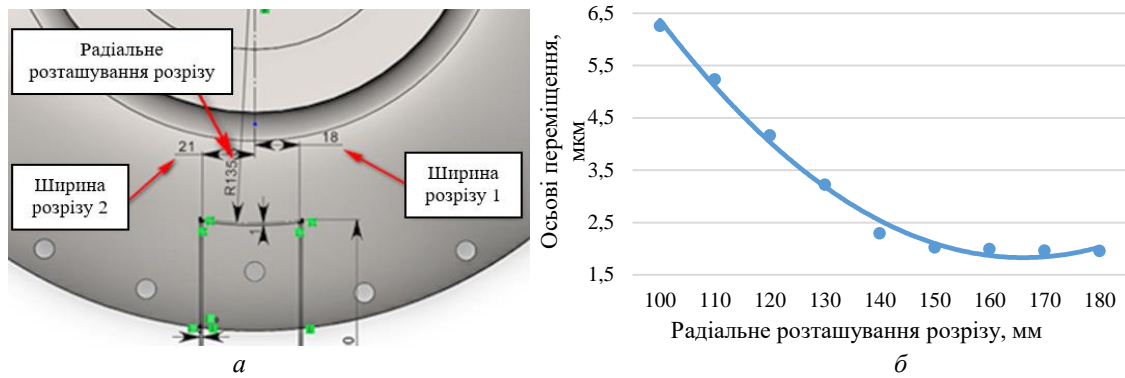


Рис. 7. Відокремлення формуючого різального елемента від чорнових:
а) радіальне розташування та ширина розрізу; б) вплив радіального розташування розрізу на осьові переміщення формуючого різального елемента

При розгляді лише радіального розташування розрізу (рис. 7, б) було встановлено, що зменшення відстані призводить до значних осевих переміщень формуючого різального елемента, на відміну від збільшення. Отже, для подальшого розрахунку можна вибрати діапазон зміни радіального розташування від 130 до 150 мм, а ширину розрізу 1 від 10 до 20 мм та розрізу 2 від 20 до 30 мм.

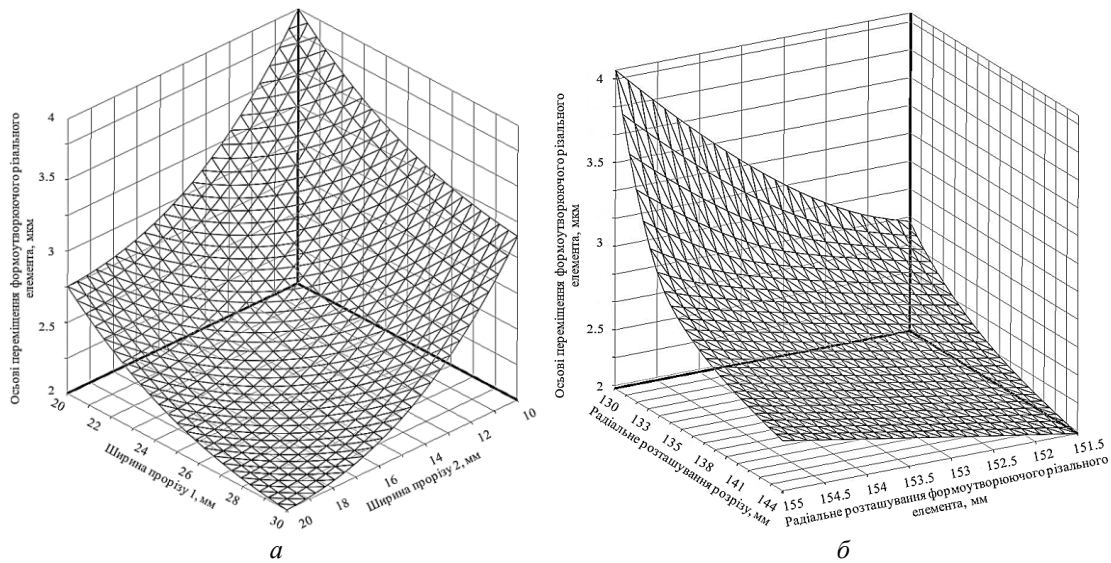


Рис. 8. Вплив геометричних параметрів на осьові переміщення формуючого різального елемента: а) зміна ширини розрізу; б) зміна радіального розташування розрізу і формуючого різального елемента

Отримані результати осевих переміщень (рис. 8) формуючого різального елемента після відокремлення та зміни геометричних параметрів показують, що ширина розрізу 1 та 2 має бути максимального розміру (рис. 8, а), оскільки зменшення ширини призводить до збільшення осевих переміщень формуючого різального елемента. Аналіз зміни радіального розташування розрізу та розташування формуючого різального елемента показує, що його відокремлення від чорнових різальних елементів сильно впливає на осьові переміщення (рис. 8, б), де мінімальні значення становлять 1,95 мкм. На основі отриманих результатів (рис. 6–8) був проведений порівняльний розрахунок трьох варіантів фрези (рис. 9): 1) торцева ступінчаста фреза; 2) торцева ступінчаста фреза з розрізом; 3) торцева ступінчаста фреза із зміною радіального розташування формуючого різального елемента з

використанням програмного забезпечення Ansys. Це дозволило проаналізувати зміну осевих переміщень різальних елементів торцевої ступінчастої фрези при обробці сірого чавуну СЧ-21.

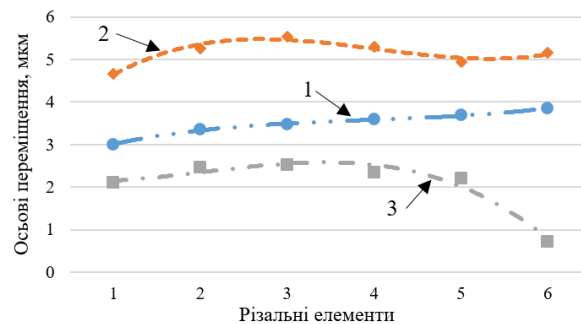


Рис. 9. Розраховані максимальні значення осевих переміщень різальних елементів у результаті пружних деформацій корпусу торцевої ступінчастої фрези: 1) торцева ступінчаста фреза; 2) торцева ступінчаста фреза з відокремленням формуючого різального елемента від чорнових; 3) торцева ступінчаста фреза зі зміною радіального розташування формуючого різального елемента

Результати комп'ютерного моделювання (рис. 9) показують, що суцільний корпус фрези має більшу жорсткість та краще протидіє силам різання. Однак такий корпус фрези має свій недолік – це вплив осевих переміщень чорнових різальних елементів на формуючий елемент, що змінює його осеве положення перпендикулярно оброблюваній поверхні заготовки. Відокремлення формуючого різального елемента зменшить вплив осевих переміщень чорнових різальних елементів, проте знизить жорсткість корпусу фрези та збільшить осеві переміщення всіх різальних елементів. Разом з тим зміна радіального розташування формуючого різального елемента відносно центра фрези позитивно впливає на зменшення осевих переміщень усіх різальних елементів, але буде обмежувати ширину фрезерування.

Висновки. Встановлено, що під час торцевого фрезерування сірого чавуну СЧ-21 виникають значні осеві сили різання P_x , які призводять до пружних деформацій корпусу фрези та осевих переміщень різальних елементів, а максимальні значення для формуючого різального елемента становлять 3,85 мкм. Формуючий різальний елемент у процесі торцевого фрезерування видаляє тонкий шар металу (остаточно формуючи поверхню заготовки), тому важливо забезпечити його стабільне положення.

З'ясовано, що радіальне розташування формуючого різального елемента значно впливає на осеві переміщення. Зменшення відстані розташування відносно осі фрези зменшить осеві переміщення з 3,85 мкм до 0,7 мкм не тільки формуючого, а й чорнових різальних елементів, однак обмежить ширину фрезерування. Змінюючи діаметр отвору для клина, можна також впливати на осеві переміщення формуючого різального елемента, що в свою чергу буде позитивно відображатися на шорсткості обробленої поверхні. Дослідженнями відокремлення формуючого різального елемента від чорнових встановлено, що зменшення відстані радіального розташування розрізу та зміни ширини розрізу призводить до значних осевих переміщень, максимальні значення яких становлять 6 мкм. Зменшення радіальної відстані від 130 до 180 мм із максимальною шириною розрізу зменшують осеві переміщення до 2,1 мкм. Відокремлення формуючого різального елемента дозволить зменшити вплив осевих переміщень чорнових різальних елементів, проте знизить жорсткість корпусу фрези та збільшить осеві переміщення всіх різальних елементів.

Список використаної літератури:

1. Основи формування поверхонь при механічній обробці / Н.С. Равська, П.Р. Родін, Т.П. Ніколаєнко, П.П. Мельничук. – Житомир : ЖІПІ, 2000. – 232 с.
2. Мельничук П.П. Наукові основи чистового торцевого фрезерування плоских поверхонь : автореф. д.т.н. / П.П. Мельничук. – К. : НТУУ «КПІ», 2002. – 26 с.
3. Виговський Г.М. Сучасні тенденції розвитку обробки матеріалів різанням. Процеси механічної обробки в машинобудуванні / Г.М. Виговський // Вісник ЖДТУ. – 2010. – № 2 (9). – С. 1–6.
4. Громовий О.А. Шляхи удосконалення процесу обробки плоских поверхонь деталей фрезеруванням / О.А. Громовий, Г.М. Виговський, Н.О. Балицька // Технічна інженерія. – 2020. – № 2 (86). – С. 48–53.
5. Мельничук П.П. Теоретико-технологічне обґрунтування можливостей обробки плоских поверхонь деталей торцевим лезовим інструментом, оснащеним надтвердими матеріалами, замість шліфування / П.П. Мельничук, В.Ю. Лосєв // Вісник ХНУ. Сер. : Технічні науки. – 2014. – № 3. – С. 164–172.
6. Виговський Г.М. Підвищення працездатності торцевих фрез для чистової обробки плоских поверхонь : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня к.т.н. : 05.03.01 Процеси механічної обробки, верстати та інструменти / Г.М. Виговський. – Київ, 2000. – 16 с.
7. Виговський Г.М. Процес різання торцевими ступінчастими фрезами з косокутною геометрією різальних частин, що оснащені надтвердими матеріалами (НТМ) / Г.М. Виговський, П.П. Мельничук // Вісник ЖІПІ. – 1998. – № 7. – С. 73–81.

8. Виговський Г.М. Безвершинне косокутне фрезерування. Шорсткість поверхні / Г.М. Виговський, П.П. Мельничук // Вісник НТТУ «КПІ». Сер. : Машинобудування. – 1999. – № 37. – С. 262–275.
9. Engineering Methodology for Determining Elastic Displacements of the Joint «Spindle Assembly-Face Milling Cutter» While Machining Planes / H.Vyhovskyi, M.Plysak, N. Balytska and other // Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Cham : Springer, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5_26.
10. The Imitation Study of Taper Connections Stiffness of Face Milling Cutter Shank Using Machine Spindle in the SolidWorks Simulation Environment / O.Melnyk, L.Hlembotska, N.Balytska and other // Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Cham : Springer, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-22365-6_60.
11. Liang J.C. A comprehensive error compensation system for correcting geometric, thermal, and cutting force-induced errors / J.C. Liang, H.F. Li, J.Ni // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 1997. – № 13. – P. 708–712.
12. Виговський Г.М. Дослідження напружено-деформованого стану торцевої фрези для чистової обробки площин / Г.М. Виговський, М.М. Плисак // Вісник ЖДТУ. Сер. : Технічні науки. – 2019. – № 1 (83). – P. 53–58. DOI: 10.26642/tn-2019-1(83)-53-58.
13. High-definition metrology enabled surface variation control by cutting load balancing / Nguyen, Hai Trong and other // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2016. – № 138 (2).
14. Characterization of cutting force induced surface shape variation in face milling using high-definition metrology / Nguyen, Hai Trong, Hui Wang, S. Jack Hu // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2013. – № 135 (4).
15. Effects of tool deflection in the high-speed milling of inclined surfaces / L.N. Lopez de Lacalle, A.Lamikiz, J.A. Sanchez, M.A. Salgado // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2004. – № 24. – P. 621–631.
16. High-definition metrology enabled surface variation control by reducing cutter-spindle deflection / Nguyen, Hai Trong, Hui Wang, S. Jack Hu // International Manufacturing Science and Engineering Conference. – American Society of Mechanical Engineers. – 2014. – Vol. 45806.
17. Мельничук П.П. Динаміка процесу торцевого фрезерування при зношуванні різальних елементів / П.П. Мельничук, Я.А. Степчин // Вісник ЖДТУ. Сер. : Технічні науки. – 2012. – № 2 (61). – С. 33–40. DOI: 10.26642/tn-2012-2(61)-33-40.
18. A study of the influence of processing parameters and tool wear on elastic displacements of the technological system under face milling / D.Y. Pimenov, V.I. Guzeev, T.Mikolajczyk and other // Int J Adv Manuf Technol. – 2017. – № 92. – P. 4473–4486. DOI: 10.1007/s00170-017-0516-6.
19. Виговський Г.М. Розрахунок деформацій торцевої фрези за допомогою методу кінцевих елементів / Г.М. Виговський, О.А. Громовий, Р.В. Карбієвський // Вісник ЖДТУ. Сер. : Технічні науки. – 2005 – № 12. – С. 56–66.
20. Numerical Simulation of Cutting Forces in Face Milling / H.Vyhovskyi, M.Plysak, N.Balytska and other // Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Cham : Springer, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-16651-8_21.

References:

1. Ravska, N.S., Rodin, P.R., Nikolaienko, T.P. and Melnychuk, P.P. (2000), *Osnovy formoutvorennya poverkhon pry mekhanichnii obrobtsi*, ZhITI, Zhytomyr, 232 p.
2. Melnychuk, P.P. (2002), *Naukovi osnovy chystovoho tortsevoho frezeruvannia ploskykh poverkhon*, DSc Abstract of dissertation, NTUU «KPI», K., 26 p.
3. Vyhovskyi, H.M. (2010), «Suchasni tendentsii rozvytku obrobky materialiv rizanniam. Protsesy mekhanichnoi obrobky v mashynobuduvanni», *Visnyk ZhDTU*, No. 2 (9), pp. 1–6.
4. Hromovyi, O.A., Vyhovskyi, H.M. and Balytska, N.O. (2020), «Shliakhy udoskonalennia protsesu obrobky ploskykh poverkhon detalei frezeruvanniam», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (86), pp. 48–53.
5. Melnychuk, P.P. and Loiev, V.Iu. (2014), «Teoretyko-teknologichne obruntuvannia mozhyvosti obrobky ploskykh poverkhon detalei tortsevym lezovym instrumentom, osnashchenym nadtverdymy materialamy, zamist shlifuvannia», *Visnyk KhNU*. Ser. *Tekhnichni nauky*, No. 3, pp. 164–172.
6. Vyhovskyi, H.M. (2000), *Pidvyshchennia pratsezdatsnosti tortsevyykh frez dlia chystovoi obrobky ploskykh poverkhon*, PhD Abstract of dissertation, 05.03.01 Protsesy mekhanichnoi obrobky, verstaty ta instrumenty, Kyiv, 16 p.
7. Vyhovskyi, H.M. and Melnychuk, P.P. (1998), «Protses rizannia tortsevymy stupinchatymy frezamy z kosokutnoiu heometriieiu rizalnykh chastyn, shcho osnashcheni nadtverdymy materialamy (NTM)», *Visnyk ZhITI*, No. 7, pp. 73–81.
8. Vyhovskyi, H.M. and Melnychuk, P.P. (1999), «Bezvershynne kosokutne frezeruvannia. Shorstkist poverkhni», *Visnyk NTU «KPI»*. Ser. *Mashynobuduvannia*, No. 37, pp. 262–275.
9. Vyhovskyi, H., Plysak, M., Balytska, N. et al. (2021), «Engineering Methodology for Determining Elastic Displacements of the Joint "Spindle Assembly-Face Milling Cutter" While Machining Planes», *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-030-68014-5_26.
10. Melnyk, O., Hlembotska, L., Balytska, N. et al. (2020), «The Imitation Study of Taper Connections Stiffness of Face Milling Cutter Shank Using Machine Spindle in the SolidWorks Simulation Environment», *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-030-22365-6_60.
11. Liang, J.C., Li, H.F. and Ni, J. (1997), «A comprehensive error compensation system for correcting geometric, thermal, and cutting force-induced errors», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No. 13, pp. 708–712.

12. Vyhovskiy, H.M and Plysak, M.M. (2019), «Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu tortsevoi frezy dlia chystovoi obrobky ploshchyn», *Visnyk ZhDTU. Ser. Tekhnichni nauky*, No. 1 (83), pp. 53–58, doi: 10.26642/tn-2019-1(83)-53-58.
13. Nguyen, Hai Trong et al. (2016), «High-definition metrology enabled surface variation control by cutting load balancing», *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, No. 138 (2).
14. Nguyen, Hai Trong, Hui Wang and Jack Hu, S. (2013), «Characterization of cutting force induced surface shape variation in face milling using high-definition metrology», *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, No. 135 (4).
15. Lopez de Lacalle, L.N., Lamikiz, A., Sanchez, J.A. and Salgado, M.A. (2004), «Effects of tool deflection in the high-speed milling of inclined surfaces», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No. 24, pp. 621–631.
16. Nguyen, Hai Trong, Hui Wang and Jack Hu S. (2014), «High-definition metrology enabled surface variation control by reducing cutter-spindle deflection», *International Manufacturing Science and Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers, Vol. 45806.
17. Melnychuk, P.P. and Stepchyn, Ya.A. (2012), «Dynamika protsesu tortsevoho frezeruvannia pry znoshuvanni rizalnykh elementiv», *Visnyk ZhDTU. Ser. Tekhnichni nauky*, No. 2 (61), pp. 33–40, doi: 10.26642/tn-2012-2(61)-33-40.
18. Pimenov, D.Y., Guzeev, V.I., Mikolajczyk, T. et al. (2017), «A study of the influence of processing parameters and tool wear on elastic displacements of the technological system under face milling», *Int J Adv Manuf Technol*, No. 92, pp. 4473–4486, doi: 10.1007/s00170-017-0516-6.
19. Vyhovskiy, H.M., Hromovyi, O.A. and Karbiievskiy, R.V. (2005), «Rozrakhunok deformatsii tortsevoi frezy za dopomohoiu metodu kintsevykh elementiv», *Visnyk ZhDTU. Ser. Tekhnichni nauky*, No. 12, pp. 56–66.
20. Vyhovskiy, H., Plysak, M., Balytska, N. et al. (2023), «Numerical Simulation of Cutting Forces in Face Milling», *Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-031-16651-8_21.

Виговський Георгій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-2199-5129>.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проектування різальних інструментів;
- різальний інструмент для гнучких виробничих систем.

Громовий Олексій Андрійович – кандидат технічних наук, доцент, декан факультету комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-2761-0736>.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- системи автоматизованого проектування в машинобудуванні;
- адитивні технології виробництва.

Плисак Микола Миколайович – аспірант кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-3244-6037>.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проектування різальних інструментів.

Vyhovskyi H.M., Gromovyy O.A., Plysak M.M.

Analysis of the influence of the location schemes of form-forming cutting elements on the deformation processes of step face milling cutters

In recent times, methods of finishing flat surfaces with face mills equipped super-hard materials have become widespread. However, the non-stationarity of the cutting process, which is characteristic of face milling processes, leads to variable deformations of the technological system, which can negatively affect the initial quality indicators of the responsible surfaces, the necessary characteristics of contact stiffness, wear resistance, reliability of mechanisms and machines depend on their processing. The paper investigates the axial displacements of the forming cutting elements as a result of the elastic deformation of the body 360 mm diameter face mill step cutter, which is equipped with super-hard tool material (hexanite-R). The effect of geometrical parameters was studied, change in the radial arrangement of the finishing cutting element, a change in the diameter of the wedge hole on axial movements during the finish milling of gray cast iron. It was established that reducing the distance of the radial arrangement of the finishing cutting element allows to significantly reduce the axial movements of the forming cutting elements, but will limit the milling width. The influence of the separation of the finished cutting element from the rough ones on the axial displacements was studied. Axial displacements of three types of cutters are compared: a step face mill; a step face mill with separation of the finishing cutting element; a step face mill with a change in the radial location of the finishing cutting element. The results of the research confirm that there is a reserve for improving the quality of processing, by analysing the geometric parameters of face mill and developing new designs that will ensure the required quality of processing.

Keywords: face milling; face mill; oblique cutting; step face mills.

Стаття надійшла до редакції 12.04.2023.