DOI: https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-45-58 УДК 621.914.22

Г.М. Виговський, к.т.н., доц. М.М. Плисак, аспірант Ю.О. Коваль, аспірант

Державний університет «Житомирська політехніка»

Дослідження торцевої ступінчастої фрези при фінішній обробці плоских поверхонь

V статті представлено результати експериментального дослідження впливу складових сили різання на якість обробки при чистовому торцевому фрезеруванні сірого чавуну СЧ21 із застосуванням розробленої торцевої ступінчастої фрези. Особливу увагу приділено аналізу сил різання, шорсткості поверхні та відхилень від площинності оброблених поверхонь залежно від параметрів режиму обробки – швидкості різання та подачі на зуб. Проведено порівняння результатів під час використання одного нерухомо закріпленого різального елемента (PE) відносно корпусу фрези та застосування рухомого PE з контактом відносно копіра. Встановлено, що при підвищенні подачі на зуб зростають усі складові сили різання, що веде до погіршення як шорсткості обробки, так і збільшення відхилення від площинності. Разом з тим при підвищенні обробленої поверхні. Запропонована конструкція фрези з виконанням чистового PE в осьовому напрямі з пружним контактом із нерухомим копіром дозволяє компенсувати пружні деформації, стабілізувати положення PE та знизити похибки обробки. Отримані результати можуть бути використані під час оптимізації конструкцій торцевих фрез та режимів обробки для підвищення точності поверхні.

Ключові слова: торцеве фрезерування; ступінчаста фреза; сили різання; шорсткість; площинність; чистова обробка; СЧ21.

Постановка проблеми. Процеси механічної обробки відіграють ключову роль у забезпеченні високої якості поверхні та геометричної точності виготовлюваних деталей. У процесі різання виникають високі температури, залишкові напруження, пластичні деформації, хімічні реакції між інструментом і заготовкою, що в сукупності впливає на якість оброблених поверхонь [1, 2]. Одним із найважливіших параметрів, що визначають ефективність і стабільність обробки, є сили різання, адже вони безпосередньо впливають як на якість поверхні, так і на загальну ефективність та безпечність процесу [3, 4]. Їх коливання можуть призводити до передчасного зносу інструменту, нестабільної роботи технологічної системи (ТС) і, як наслідок, до зниження точності обробки [5–9]. Контроль, вимірювання та моделювання сил різання є критично важливими для оптимізації параметрів обробки, прогнозування зносу інструменту та забезпечення сталої якості поверхні [10-12]. Особливо це актуально під час обробки тонкостінних заготовок, де навіть незначні відхилення сил можуть спричинити появу браку [13-16]. Серед методів фінішної обробки торцеве фрезерування посідає провідне місце завдяки своїй універсальності, високій продуктивності та здатності формувати якісні плоскі поверхні [17–19], по відношенню до шліфування, недоліком якого є висока теплова напруженість процесу обробки. Це призводить до появи на оброблюваних поверхнях припікань, мікротріщин та інших температурних дефектів, усунути які не завжди вдається наступним абразивним або алмазним доведенням [20].

У низці досліджень [21–25] зазначено, що конструкція торцевої фрези, зокрема кількість різальних елементів, істотно впливає на силові характеристики процесу фрезерування, енергоспоживання, рівень вібрацій та якість обробленої поверхні. Збільшення кількості РЕ дозволяє зменшити навантаження на окремі платівки, однак призводить до ускладнення процесу через складну взаємодію між ними. Формування обробленої поверхні за участю декількох РЕ, для яких осьове положення змінюється під дією ударних та змінних деформацій, що виникають у фрезі в момент входження та виходу РЕ із зони різання, не гарантує стабільного процесу формоутворення при різанні торцевими фрезами. Додатковим фактором, що погіршує якість формоутворення, є похибки у взаємному розташуванні РЕ, зумовлені похибками базування та закріплення інструменту на верстаті.

Застосування ступінчастого торцевого фрезерування [26, 27], на відміну від звичайних процесів фрезерування, залишає резерви підвищення якості обробки шляхом удосконалення конструктивних параметрів фрези, з можливістю розміщення чистового РЕ на найменшій радіальній відстані від осі фрези, а в осьовому напрямі – з найбільшим вильотом відносно корпусу фрези. Це гарантує, що формоутворення буде здійснюватися тільки чистовим РЕ, що дозволяє створювати йому необхідну геометрію залежно від фізико-механічних характеристик оброблюваних деталей. Відома торцева ступінчаста фреза (рис. 1, *a*) має конструкцію з рухомою зовнішньою обоймою (з чорновими РЕ) та жорстко закріпленою внутрішньою обоймою (з чистовими РЕ), з'єднаними пружною перемичкою. Це дозволяє частково компенсувати

змінний припуск за рахунок деформації перемички під дією сил різання. Однак недоліком є неможливість регулювання пружних властивостей, що призводить до нестабільного навантаження на чистові РЕ та погіршення якості обробки, особливо через ударні навантаження при холостому ході [28]. Наступна конструкція торцевої ступінчастої фрези (рис. 1, δ) зі спеціальним натискним елементом сегментної форми, що взаємодіє з поворотними державками під час обертання. Це забезпечує притискання державок для здійснення різання, а після виходу із зони різання – автоматичне їх відведення за допомогою відцентрової сили, що дозволяє уникнути утворення рисок на обробленій поверхні. Проте деформація державок під дією сил різання змінює їх осьове положення, що знижує якість обробки [29]. Найближчий аналог (рис. 1, ϵ) – спосіб плоского фрезерування торцевими фрезами, де припуск знімають чорновими та чистовими РЕ, розташованими за спірально-ступінчастою схемою. Основним недоліком цього є виникнення значних осьових сил при різанні, що призводить до зміщення чистових РЕ і погіршення якості обробки через збільшення висоти мікронерівностей [30].



Рис. 1. Конструкції торцевих ступінчастих фрез [28–30]

Таким чином, виникає потреба у дослідженні впливу конструктивних параметрів, створення торцевої ступінчастої фрези із забезпечення стабільного положення чистового формоутворюючого PE у процесі торцевого фрезерування плоских поверхонь, що своєю чергою призведе до підвищення якості обробки. Це дозволить краще зрозуміти механізми утворення похибок, спричинених нестабільністю навантаження, та обгрунтувати рекомендації для підвищення якості поверхні шляхом контролю динаміки сил різання в процесі торцевого фрезерування.

Метою роботи є експериментальне дослідження впливу розробленої конструкції торцевої ступінчастої фрези [31] з рухомим чистовим РЕ, що пружно контактує з копіром, а також з нерухомо закріпленим РЕ відносно корпусу фрези, на сили різання, шорсткість та точність обробки плоских поверхонь з сірого чавуну СЧ21.

Постановка завдання. Недоліком способу торцевого ступінчастого фрезерування є те, що при різанні чорновими PE, які зрізають більшу частину припуску, виникають значні сили різання, які діють у напрямі, паралельному осі фрези, та викликають переміщення чистових PE в цьому напрямі у зв'язку з їх жорстким закріпленням у корпусі фрези, що погіршує якість обробки. Тому виконання чистового PE в осьовому напрямі з пружним контактом з нерухомим копіром [31] дозволяє формувати плоску поверхню відповідно до профіля копіра незалежно від сил різання, які будуть діяти на PE. Жорстке закріплення на корпусі верстата копіра дозволяє гасити високочастотні коливання за рахунок великої маси. У процесі фрезерування за дугою контакту змінюються товщини зрізаного шару, що викликає змінні деформації технологічної системи, тому створення змінної висоти копіра зі збільшенням його висоти при збільшенні товщини зрізаного шару дозволяє забезпечити стабільне положення чистового PE, який формує оброблену поверхню, навіть при значних деформаціях TC [31, 32].



Рис. 2. Конструкція спроєктованої торцевої ступінчастої фрези [31, 32]

Торцева ступінчаста фреза (рис. 2) складається із корпусу 1, який закріплений на шпинделі 2 верстата гвинтами 3. У корпусі 1 фрези встановлені чорнові РЕ 4, що нерухомо закріплені гвинтами 5 відносно корпусу 1 фрези та розміщені за спіралями зі збільшенням вильотів відносно торця корпусу 1 фрези при зменшенні радіальних розташувань елементів. До нерухомої частини 6 верстата приєднаний гвинтами 7 копір 8. До копіра 8 пружиною 9, що встановлена на рухомому чистовому РЕ 10, притиснутий підшипник 11, що встановлений на чистовому РЕ 10. Рухомий чистовий РЕ 10 у радіальному напрямі розміщений на найменшій відстані від осі фрези, а в осьовому напрямі з найбільшим вильотом по відношенню до нерухомих чорнових РЕ, що дозволяє забезпечити формоутворення обробленої поверхні чистовим РЕ 10, що пружно контактує під дією зусилля пружини 9 через підшипник 11 з копіром 8. Величина осьового переміщення чистового РЕ 10 залежить від висоти копіра 8 на ділянці процесу різання плоскої поверхні деталі.

Експериментальні дослідження спроєктованої торцевої ступінчастої фрези проводилися на вертикально-фрезерному верстаті 6P12 (рис. 3, a). Для вимірювання сил різання, що виникають при фрезеруванні, використовувався сконструйований монолітний трикомпонентний динамометр (рис. 3, δ). Стійки динамометра мають високу жорсткість, що забезпечує одержання високої точності вимірювання незалежно від точки прикладення сили, а відсутність рухливих ланок і стиків забезпечує стабільність вимірювання.



а

б

Рис. 3. Обладнання для проведення експериментальних досліджень: а) вертикально-фрезерний верстат 6P12; б) динамометр, що складається з платформи 1, у якій закріплювалася оброблювана деталь за допомогою гвинтів 2 із різзю M16. Основа 5 має чотири опорні стійкі 3 та фіксується до стола верстата гвинтами 4

Для дослідження залежності сил різання, шорсткості оброблюваної поверхі, відхилень від площинності від режимів обробки сірого чавуну СЧ21 270 НВ використовувалася зібрана установка, зображена на рисунку 4. Було використано розроблену торцеву ступінчасту фрезу діаметром 315 мм з одним нерухомо закріпленим РЕ, оснащеним гексанітом-Р, відносно корпусу фрези, який розташовувався на найменшій радіальній відстані відносно осі фрези та застосовуючи рухомий РЕ з пружним контактом відносно копіра. Геометрія різальної платівки: плоска передня поверхня; передній кут $\gamma = -10^{\circ}$; задній кут у напрямку вектора швидкості різання $\alpha_v = 12^{\circ}$. Кут нахилу головної різальної кромки $\lambda = -35^{\circ}$. Швидкість різання змінювалася від V = 1,17 до 11,72 м/с; подача на зуб також змінювалася з $S_z = 0,0156$ до $S_z = 0,39$ (мм/зуб); глибина різання була постійною t = 0,125 мм.



Рис. 4. Установка для проведення експерименту: 1 – копір; 2 – спроєктована торцева ступінчаста фреза; 3 – рухомий РЕ з контактом відносно копіра; 4 – динамометр; 5 – заготовка СЧ21; 6 – вертикально-фрезерний верстат 6Р12

Після проведення експерименту з одним нерухомо закріпленим РЕ відносно корпусу (рис. 5, δ), який розташований на найменшій радіальній відстані відносно осі фрези використовуючи установку, зображену на рисунку 4, було отримано значення складових сил різання (P_x – радіальна, P_y – осьова, P_z – тангенційна), що передавалися на комп'ютер через bluetooth (рис. 5, a), автоматично записувались у форматі Microsoft Excel Worksheet. Також було виміряно шорсткість оброблюваної поверхі та визначено відхилення від площинності. Отримані результати наведено у таблиці 1.



а

б

Рис. 5. Проведення експерименту: а) отримання сигналу сил різання на комп'ютер; б) 1 – встановлення глибини різання; 2 – індикатор ІГЦ 0–10 мм; 3 – заготовка СЧ215 – спроєктована ступінчаста фреза, 4 – нерухомо закріплений РЕ відносно корпусу фрези оснащений гексанітом-Р

Максимальні значення складових сил різання (P_x – радіальна, P_y – осьова, P_z – тангенційна), шорсткість оброблюваної поверхі R_a , відхилення від площинності з одним нерухомо закріпленим РЕ відносно корпусу фрези наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

№ з/п	Швидкість різання, V, м/с	Подача на зуб, <i>S</i> z, мм/зуб	Кут нахилу різальної кромки, λ, град.	Глибина різання, <i>t</i> , мм	P_x , N	<i>P</i> _y , N	<i>P</i> _z , N	Шорст Вхіл	гкість по <i>R</i> a, мкм Центр	верхні, Вихіл	Відхилення від площинності, мм
1		0,156			89	213	144	8,2	8,8	7,2	0,01
2	1,17	0,25			92	221	160	13,9	15,1	13,2	0,025
3	,	0,39			112	195	185	17,6	20,3	21	0,02
4	1,83	0,1			79	180	125	3,7	3,2	3,8	0,015
5		0,156			84	186	132	7,3	8,3	6,2	0,03
6		0,25			88	192	147	9,8	14,5	11,3	0,015
7		0,0625			76	167	109	2,7	3	2,3	0,023
8	2,93	0,1			87	200	118	4,1	3,9	3,2	0,028
9		0,156	-35°	t-0,125	93	240	124	8,4	9,1	8	0,015
10		0,039			90	184	118	3,4	2,7	2	0,04
11	4.615	0,063			91	225	122	3,8	3,5	2,7	0,02
12	4,015	0,1			105	255	138	6	4,4	3,6	0,015
13		0,025			72	215	104	2,2	1,9	1,8	0,015
14	7,33	0,039			75	160	109	2,9	2,3	2,3	0,009
15		0,063			82	190	98	4,5	3,8	3,7	0,004
16		0,0156			64	186	89	1	1,1	1,3	0,01
17	11.72	0,025			67	205	93	1,3	1,6	1,7	0,02
18	11,72	0,039			71	195	98	1,9	2	1,9	0,006

Отримані результати проведеного експерименту з одним нерухомо закріпленим PE відносно корпусу фрези

Отримані значення складових сили різання (P_x – радіальна, P_y – осьова, P_z – тангенційна) залежно від швидкості різання V та подачі S_z з одним нерухомо закріпленим РЕ відносно корпусу фрези наведені на рисунку 6.



Рис. 6. Складові сили різання (*P_x* – радіальна, *P_y* – осьова, *P_z* – тангенційна) залежно від швидкості різання V та подачі *S_z* з одним нерухомо закріпленим РЕ відносно корпусу фрези

На рисунку 6 наведено залежності складових сили різання (P_x – радіальна, P_y – осьова, P_z – тангенційна) від подачі на зуб при різних значеннях швидкості різання. Аналіз графіків показує, що зі збільшенням подачі на зуб спостерігається закономірне зростання всіх трьох складових сили різання. Найбільш суттєве зростання характерне для тангенційної складової P_z , що пов'язано зі зростанням об'єму зрізаного шару і відповідно енерговитрат на різання. Максимальні значення сил фіксуються при $S_z = 0,39$ мм/зуб і швидкості V = 1,17 м/с. Саме при цих режимах відмічається пікове навантаження на інструмент, зокрема P_z досягає 185 H, що вказує на значне зусилля знімання матеріалу.

При цьому характерною особливістю є те, що при середніх швидкостях, особливо V = 4,615 м/с, сили різання мають локальні максимуми, що може свідчити про появу резонансних деформацій інструменту та відповідне погіршення стабільності процесу. Після досягнення пікових значень зі збільшенням швидкості різання до V = 7,33 м/с та V = 11,72 м/с, значення всіх складових сили різання знижуються, що свідчить про зменшення опору різанню. Такий ефект може бути зумовлений термічним пом'якшенням матеріалу у зоні різання та покращенням умов стружкоутворення. Також варто зазначити, що при мінімальних значеннях подачі ($S_z = 0,0156-0,039$ мм/зуб) сили різання мають найнижчі значення, незалежно від швидкості різання, що є характерним для процесів чистової обробки.

Загалом результати, представлені на рисунку 6, свідчать про важливість оптимального вибору режимів фрезерування для зниження силового навантаження на інструмент та забезпечення стабільності процесу формоутворення. Найкращий баланс між мінімізацією сили різання та ефективністю обробки досягається при використанні середніх значень подачі ($S_z = 0,1-0,156$ мм/зуб) у поєднанні з підвищеною швидкістю різання (V = 7,33-11,72 м/с).

Отримані значення шорсткості поверхні R_a залежно від швидкості різання V та подачі S_z з одним нерухомо закріпленим РЕ відносно корпусу фрези наведено на рисунку 7.



Рис. 7. Шорсткості поверхні R_a залежно від швидкості різання V та подачі S_z з одним нерухомо закріпленим РЕ відносно корпусу фрези

Аналіз отриманих результатів (рис. 7) свідчить, що якість поверхні істотно залежить як від швидкості різання, так і від подачі на зуб. Спостерігається закономірна тенденція: при збільшенні подачі на зуб середньоарифметична висота мікронерівностей R_a зростає, що пояснюється збільшенням товщини зрізаного шару. Найнижчі значення R_a (від 2,3 мкм до 1,1 мкм) були зафіксовані при низьких подачах ($S_z = 0,0156-0,039$ мм/зуб) і високих швидкостях різання (від V = 4,615 до V = 11,72 м/с), що є типовим для чистової обробки. Зі зменшенням швидкості різання або збільшенням подачі R_a зростає, особливо у режимах, коли виникають резонансні коливання або нестабільності в роботі інструменту (наприклад, при V = 4,615 м/с та від $S_z = 0,063-0,39$ мм/зуб). Це пов'язано з погіршенням умов різання, зростанням силових навантажень та вібрацій.

Таким чином, для досягнення мінімальної шорсткості доцільно використовувати малі подачі в поєднанні з високими швидкостями різання. Це забезпечує оптимальні умови формування мікрорельєфу поверхні та знижує ризики виникнення дефектів.

Отримані значення відхилення від площинності залежно від швидкості різання V та подачі S_z з одним нерухомо закріпленим РЕ відносно корпусу фрези наведено на рисунку 8.



Рис. 8. Відхилення від площинності залежно від швидкості різання V та подачі S_z з одним нерухомо закріпленим РЕ відносно корпусу фрези

Результат на рисунку 8 демонструє вплив технологічних режимів на точність геометрії обробленої поверхні. Найменші відхилення від площинності (до 4 мкм) фіксувалися при низьких подачах ($S_z = 0,0156-0,063$ мм/зуб) та високих швидкостях різання (від V = 7,33 м/с до V = 11,72 м/с), що знову підтверджує перевагу чистового режиму обробки. При середніх швидкостях та зростанні подачі спостерігається зростання відхилень, з піковими значеннями до 0,04 мм, що, ймовірно, зумовлено підвищеним навантаженням на інструмент, вібраціями та деформацією технологічної системи.

Наступний експеримент було проведено при застосуванні рухомого РЕ з пружним контактом відносно нерухомого копіра (рис. 9).



Рис. 9. Рухомий РЕ з контактом відносно копіра: 1 – зажим платівки, 2 – корпус фрези, 3 – гужон М5, 4 – гужон М2, 5 – копір, 6 – підшипник, 7 – вал, 8 – державка, 9 – пружина, 10 – гужон М6, 11 – нижня кришка, 12 – гвинт М4, 13 – різальна платівка, 14 – верхня кришка

Максимальні значення складових сил різання (P_x – радіальна, P_y – осьова, P_z – тангенційна), шорсткість оброблюваної поверхі R_a , відхилення від площинності застосовуючи рухомий РЕ з контактом відносно копіру, наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

№ 3/П	Швидкість різання, V, м/с	Подача на зуб, <i>S</i> _z , мм/зуб	Кут нахилу різальної кромки, λ, град	Глибина різання, t, град.	$P_x,$ N	Py, N	Pz, N	Шорс	ткість пов <i>R</i> a, мкм	ерхні,	Відхилення від площинності, мкм
1		0,156			87	138	124	2,3	2,5	2,3	0,02
2	1,17	0,25			94	190	139	2,6	3,3	3,3	0,025
3		0,39			101	230	152	4,3	4,4	4,5	0,03
4		0,1			76	143	116	2,6	2,6	2,6	0,015
5	1,83	0,156			79	183	127	2,9	3	3	0,017
6		0,25			84	221	132	3	3,2	3	0,023
7		0,0625			73	154	108	2,5	2,6	2,5	0,012
8	2,93	0,1			74	186	117	3	3,2	3,2	0,014
9		0,156	35	T 0 125	77	210	121	3,2	3,2	3,2	0,018
10		0,039	-33	1-0,125	69	167	94	1,3	1,3	1,3	0,009
11	4,615	0,063			68	185	102	1,8	1,8	1,8	0,01
12		0,1			72	197	112	2,5	2,6	2,5	0,013
13		0,025			61	155	86	0,8	0,9	0,8	0,005
14	7,33	0,04			65	173	91	1,3	1,4	1,3	0,009
15		0,063	-		66	191	98	1,7	1,8	1,8	0,01
16	11,72	0,0156			54	168	71	0,6	0,7	0,6	0,002
17		0,025			57	178	79	0,9	1	0,9	0,004
18		0,039			62	194	84	1,1	1,1	1,2	0,008

Отримані результати проведеного експерименту при застосуванні рухомого РЕ
з контактом відносно копіра

Отримані значення складових сили різання (P_x – радіальна, P_y – осьова, P_z – тангенційна) залежно від швидкості різання V та подачі S_z , застосовуючи рухомий РЕ з контактом відносно копіру, наведено на рисунку 10.



а



б



Рис. 10. Складові сили різання (Р_х – радіальна, Р_у – осьова, Р_z – тангенційна) залежно від швидкості різання V та подачі S_z, застосовуючи рухомий PE з контактом відносно копіра

Аналіз результатів (рис. 10), який демонструє зміну складових сили різання (*P_x* – радіальна, *P_y* – осьова, P_z – тангенційна), залежно від швидкості різання та подачі на зуб, виявляє закономірні тенденції, що мають вирішальне значення для оптимізації процесу фрезерування. Зі зростанням швидкості різання в діапазоні від V = 1,17 м/с до V = 11,72 м/с, відзначається чітке зниження всіх складових сили різання. Це пояснюється зменшенням сили опору матеріалу різанню, зумовленого локальним підвищенням температури в зоні контакту та термічним розм'якшенням оброблюваного шару. Найменші значення сили спостерігаються саме за максимальної швидкості різання V = 11,72 м/с, що свідчить про підвищення ефективності різального процесу за рахунок покращення умов стружкоутворення та зменшення коефіцієнта тертя. У той же час збільшення подачі на зуб від $S_z = 0.0156$ до $S_z = 0.39$ мм/зуб, супроводжується значним ростом усіх трьох складових сили різання, зокрема осьової Р_у, яка виявилася найбільш чутливою до змін параметрів і досягала значень понад 230 Н. Таке навантаження особливо критичне в контексті деформацій технологічної системи, оскільки осьова складова Р_у прямо впливає на стійкість положення інструмента та точність формоутворення. Важливим є те, що використання запропонованої конструкції інструмента з рухомим чистовим РЕ, який пружно контактує з копіром, дозволяє значною мірою компенсувати вплив змінного навантаження.

Така конструктивна особливість забезпечує адаптивне регулювання осьового положення чистового РЕ без втручання у жорстку кінематику верстата, що дає змогу утримувати стабільну траєкторію різання навіть за умов локального зростання деформацій у зоні обробки. У підсумку, поєднання високої швидкості різання з мінімальною подачею забезпечує не лише зниження сил різання, а й підвищення стабільності процесу та якості оброблюваної поверхні, що особливо важливо при фрезеруванні відповідальних плоских поверхонь з високими вимогами до точності.



Отримані значення шорсткості поверхні R_a залежно від швидкості різання V та подачі S_z застосовуючи рухомий РЕ з контактом відносно копіра, наведено на рисунку 11.

0,39



Рис. 11. Шорсткість поверхні R_a залежно від швидкості різання V та подачі S_z, застосовуючи рухомий PE з контактом відносно копіра

Отримані результати (рис. 11) ілюструють зміну параметра шорсткості поверхні R_a залежно від режимів обробки – швидкості різання та подачі на зуб, що дозволяє чітко простежити характер впливу технологічних параметрів на якість обробленої поверхні при фрезеруванні сірого чавуну СЧ21 з використанням рухомого чистового РЕ, який здійснює формоутворення за рахунок пружного контакту з копіром. Найбільш виразною є залежність R_a від подачі, зі зростанням подачі від $S_z = 0,0156$ до $S_z = 0,39$ мм/зуб шорсткість поверхні зростає в кілька разів від мінімальних значень 0,6 мкм до максимуму понад 4,5 мкм, що пояснюється тим, що при збільшенні подачі зростає товщина зрізаного шару, а отже і шорсткість поверхні.

Крім того, при великих подачах підвищуються коливання системи «інструмент – заготовка», що також негативно впливає на якість поверхні. Паралельно із цим простежується позитивна тенденція зниження R_a зі збільшенням швидкості різання. Так при швидкості V = 11,72 м/с і мінімальній подачі досягаються найнижчі значення R_a (0,6–0,8 мкм), що свідчить про зменшення тертя та покращення умов формоутворення внаслідок зменшення пластичної деформації матеріалу в зоні різання. Застосування конструкції фрези з рухомим чистовим РЕ з контактом відносно копіра, що дозволяє додатково компенсувати мікроколивання та нестабільність, властиві традиційним схемам фрезерування [3, 33, 34]. Такий підхід забезпечує формування поверхонь з високою геометричною однорідністю навіть за умов змінного навантаження, що є особливо важливим при обробці точних поверхонь. Таким чином, оптимальні умови обробки – висока швидкість різання та мінімальна подача, що сприяє досягненню найвищої якості поверхневого шару, тоді як великі подачі в поєднанні з низькими швидкостями обмежують можливості забезпечення низької шорсткості через посилення деформаційних і коливальних процесів у зоні різання.

Отримані значення від хилення від площинності залежно від швидкості різання V та подачі S_z , застосовуючи рухомий РЕ з контактом відносно копіра, наведено на рисунку 12.

Відхилення від площинності наведені на рисунку 12, демонструють зміну величини відхилення від площинності обробленої поверхні залежно від основних режимів фрезерування – швидкості різання та подачі на зуб. Отримані результати свідчать про тісний взаємозв'язок між стабільністю положення інструмента в процесі обробки та кінцевою геометричною точністю поверхні. Найменші значення відхилень від площинності (0,002–0,004 мм) спостерігаються за умов високої швидкості різання (V = 7,33-11,72 м/с) та мінімальної подачі на зуб ($S_z = 0,0156-0,025$ мм/зуб). Це пояснюється зниженим рівнем динамічних сил і деформацій, які передаються на інструмент і заготовку, а також зменшенням температурних градієнтів, що виникають у зоні різання. У таких умовах технологічна система демонструє високу жорсткість і стабільність, що позитивно впливає на формування плоскої поверхні. Натомість при збільшенні подачі до $S_z = 0,156-0,39$ мм/зуб та зниженні швидкості до V = 1,17-2,93 м/с спостерігається поступове зростання від площинності до 0,03 мм. Така тенденція зумовлена збільшенням сил різання, деформаціями системи «інструмент – заготовка – верстат» та появою мікроколивань, які загалом призводять до втрати стабільності формоутворення [3, 33, 34].

Таким чином, мінімізація відхилень від площинності досягається шляхом раціонального поєднання високої швидкості різання з низькою подачею та використанням інструменту зі стабілізуючим елементом – копіром. Отримані результати підтверджують ефективність застосування запропонованої фрези для високоточних операцій, де критичною є стабільність геометрії обробленої поверхні, зокрема у виробництві деталей з високими вимогами до площинності.



Рис. 12. Відхилення від площинності залежно від швидкості різання V та подачі S_z, застосовуючи рухомий PE з контактом відносно копіра

Висновки. Під час експериментального дослідження впливу конструктивних і технологічних параметрів фрезерування на точність та якість обробки плоских поверхонь сірого чавуну СЧ21 було отримано низку важливих науково-практичних результатів:

Встановлено закономірності впливу швидкості різання та подачі на зуб на складові сили різання (P_x – радіальна, P_y – осьова, P_z – тангенційна). Зі збільшенням подачі усі складові сили зростають, що пов'язано зі збільшенням об'єму зрізаного шару. Найбільш чутливою до змін подачі виявилася тангенційна складова P_z . Зі збільшенням швидкості різання спостерігається зниження усіх складових сили, особливо при переході від середніх до високих швидкостей, що може бути зумовлено термічним розм'якшенням матеріалу у зоні різання.

Здійснено порівняльний аналіз двох варіантів конструкції інструмента: з одним нерухомо закріпленим РЕ відносно корпусу фрези та рухомим РЕ з контактом відносно копіра. У випадку з застосуванням рухомого РЕ з контактом відносно копіра досягнуто суттєвого покращення шорсткості поверхні (R_a до 0,6 мкм) та зниження відхилення від площинності до 0,002 мм. Це свідчить про високу ефективність запропонованої конструкції у забезпеченні стабільного формоутворення. Рухомий чистовий РЕ з контактом відносно копіра виявився дієвим компенсатором осьових деформацій фрези та технологічної системи. Така схема дозволяє стабілізувати положення різальної частини інструмента у процесі обробки незалежно від змін навантаження, що забезпечує високу геометричну точність і повторюваність результатів. Проаналізовано динамічну поведінку інструменту в різних режимах обробки. Виявлено, що при середніх швидкостях різання можливе виникнення локальних максимумів сил, що пов'язано з резонансними коливаннями.

Підтверджено, що оптимальне поєднання високої швидкості різання (V = 7,33-11,72 м/с) з низькою подачею ($S_z = 0,0156-0,039$ мм/зуб) забезпечує мінімальне навантаження на інструмент, високу стабільність формоутворення, найменшу шорсткість і точність обробки. Це підтверджує доцільність застосування таких режимів при чистовому фрезеруванні відповідальних плоских поверхонь. Отримані результати мають прикладне значення для розроблення нових типів торцевих ступінчастих фрез, вдосконалення схем їх встановлення та налаштування верстатів, а також можуть слугувати підґрунтям для побудови математичних моделей процесів фрезерування з урахуванням деформацій інструменту та технологічної системи. Впровадження запропонованої конструкції інструменту дозволяє підвищити точність обробки без значного ускладнення конструкції фрези чи верстата, що відкриває широкі можливості для використання у серійному та дрібносерійному виробництві.

Таким чином, дослідження підтвердило ефективність застосування торцевої ступінчастої фрези з рухомим чистовим РЕ при фінішній обробці. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкцій різального інструменту, вибору раціональних режимів фрезерування та покращення технологічної точності при обробці відповідальних плоских поверхонь.

Список використаної літератури:

- Optimization of Cutting Condi-tions for Minimum Residual Stress, Cutting Force and Surface Roughness in End Milling of S50C Medium Carbon Steel / N.Masmiati, A.A.D. Sarhan, M.A. Hassan, M.Hamdi // Measurement. – 2016. – № 86. – P. 253–265.
- 2. Effect of Temperature on Milling Stability of Thin-Walled Parts / *Y.Liu*, *N.Cui*, *H.Chen and other* // Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf. 2022. № 237. P. 414–423.

- 3. Stability of Micro-Milling Tool Consider-ing Tool Breakage / S.Y. Liang, Y.-Y. Ren, B.-G. Jia and other // J. Manuf. Mater. Process. 2024. № 8. 122 p.
- 4. Study on Distributing Principle of Force Density Function for Complex Three-Dimension Groove Milling Insert / *Y.N. Cheng, Z.J. Li, M.L. Zheng, Y.G. Zhao* // Mater. Sci. Forum. 2009. Vol. 626–627. P. 629–634.
- 5. Степчин Я.А. Порівняльна характеристика динаміки процесів торцевого фрезерування фрезами стандартних та спеціальних конструкцій / Я.А. Степчин // Вісник ЖДТУ. Сер. : Технічні науки. 2016. № 1 (72). С. 51–56.
- 6. Виговський Г.М. Коливання сил різання при обробці деталей торцевими ступінчастими фрезами / Г.М. Виговський // Вісник ЖІТІ. Інженерні науки. 1999. Вип. 9.
- 7. Виговський Г.М. Дослідження впливу сил різання при чистовому торцевому фрезеруванні на процеси формоутворення оброблюваних поверхонь / Г.М. Виговський, О.А. Громовий, М.М. Плисак // Технічна інженерія. 2023. № 2 (92). С. 53–59. DOI: 10.26642/ten-2023-2(92)-53-59.
- 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 ; in V.Tonkonogyi et al. ed. – 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5_26.
- 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 ; in V.Ivanov et al. ed. – 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-22365-6_60.
- Vásquez Céspedes H. Measuring Cutting Forces in Machining Processes / H.Vásquez Céspedes // Rev. Ing. 2011. № 11. – P. 129–141.
- Modelling and Optimiza-tion of the Cutting Forces during Ti6al4v Milling Process Using the Response Surface Methodol-ogy and Dynamometer / I.A. Daniyan, I.Tlhabadira, S.N. Phokobye and other // MMSci. J. – 2019. – Vol. 128. – P. 3353–3363.
- 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 ; in V.Tonkonogyi, V.Ivanov, J.Trojanowska et al. ed. – 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-16651-8_21.
- 13. Li H.Z. An Experimental Study of Tool Wear and Cutting Force Variation in the End Milling of Inconel 718 with Coated Carbide Inserts / H.Z. Li, H.Zeng, X.Q. Chen // J. Mater. Process Technol. 2006. Vol. 180. P. 296–304.
- 14. *Ding P.* Time-Varying Dynamic Modeling of Micro-Milling Considering Tool Wear and the Process Parameter Identification / *P.Ding, X.Huang, Y.Li* // Mech. Based Des. Struct. Mach. 2024. Vol. 52. P. 8658–8684.
- 15. Improvement of Dispersion Stability and Polishing Performance of Chemical Mechanical Polishing Slurry for Cemented Car-bide Inserts / *C.Qin, W.Chen, C.Zhang and other* // J. Dispers. Sci. Technol. 2023. P. 1–11.
- Dynamic Cutting Force and Stress Distribution of Carbide Insert during Asymmetric Milling of 508III Steel / L.Liu, G.Wang, J.Liu and other // Integr. Ferroelectr. – 2021. – Vol. 217. – P. 163–169.
- 17. The Relation-ships between Cutting Parameters, Tool Wear, Cutting Force and Vibration / X.Chuangwen, D.Jianming, C.Yuzhen and other // Adv. Mech. Eng. 2018. Vol. 10. DOI: 1687814017750434.
- Yesilyurt I. Modeling and Experimental Verification of Cutting Forces in Gear Tooth Cutting / I.Yesilyurt, H.Gursoy // Mach. Sci. Technol. – 2018. – Vol. 22. – P. 30–47.
- 19. Milling Heads for Machining Mutually Perpendicular Flat Surfaces / P.Kushnirov, M.Gel'atko, I.Dehtiarov and other // MM Sci. J. 2023. P. 6441-6445.
- Мельничук П.П. Теоретико-технологічне обґрунтування можливостей обробки плоских поверхонь деталей торцевим лезовим інструментом, оснащеним надтвердими матеріалами, замість шліфування / П.П. Мельничук, В.Ю. Лосв // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – № 3. – С. 164–172.
- 21. Wu W.P. Investigation of the Effects of Face-Milling Parameters of Ultra-Large-Scale Plane on Milling Quality / W.P. Wu // Int. J. Adv. Manuf.Technol. 2008. Vol. 37. P. 241–249.
- 22. *Tan G.* Experimental Study on Adhesive Wear of Milling Insert with Complex Groove / *G.Tan, G.Liu, G.Li* // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2009. Vol. 44. P. 631–637.
- Mrkvica I.Comparison of Round Insert's Lifetime When Milling Inconel 718 / I.Mrkvica, M.Janoš // Key Eng. Mater. – 2014. – Vol. 581. – P. 26–31.
- 24. *Dilipak H*. The Investigation of The Effects of Number of Inserts, Cutting Speed and Feed Rate on Surface Roughness in Milling of AISI D3 / *H.Dilipak, A.Gezgin* // Steel. J. Polytech.-Politek. Derg. 2010. Vol. 13. P. 29–32.
- 25. Виговський Г.М. Аналіз впливу схем розташування формоутворюючих різальних елементів на процеси відтиск торцевих ступінчастих фрез / Г.М. Виговський, О.А. Громовий, М.М. Плисак // Технічна інженерія. 2023. Вип. 1 (91). С. 42–49. DOI:10.26642/ten-2023-1(91)-42-49.
- Виговський Г.М. Підвищення працездатності торцевих фрез для чистової обробки плоских поверхонь : автореф. дис. ... к.т.н. : 05.03.01 Процеси механічної обробки, верстати та інструменти / Г.М. Виговський. – К., 2000. – 16 с.
- 27. Виговський Г.М. Процес різання торцевими ступінчатими фрезами з косокутною геометрією різальних частин, що оснащені надтвердими матеріалами / Г.М. Виговський, П.П. Мельничук // Вісник ЖІТІ. 1998. № 7. С. 73–81.
- 28. Patent No. 2,761,196. Face mill / Graves C.O., Hans E. 4 Sep. 1956.
- 29. Patent No. 8,550,753. Face mill for fine milling / Sture S. 8 Oct. 2013.
- 30. Деклараційний патент на винахід № 40156 А Україна. Спосіб плоского фрезерування торцевими фрезами / Виговський Г.М., Громовий О.А., Лоєв В.Ю., Мельничук П.П. Заявл. 17.07.2000. ; Опубл. 16.07.2001.
- 31. Пат. № 158589 Україна. Торцева ступінчаста фреза / Виговський Г.М., Балицька Н.О., Глембоцька Л.Є., Мельник О.Л., Плисак М.М., Громовий О.А. – Заявл. 01.07.2024 ; опубл. 26.02.2025.

- Удосконалення конструкції торцевої ступінчастої фрези для фінішної обробки плоских поверхонь деталей / Г.М. Виговський, М.М. Плисак, Л.Є. Глембоцька, А.В. Голубовський // Технічна інженерія. – 2024. – № 1 (93). – С. 45–51. DOI: 10.26642/ten-2024-1(93)-45-51.
- Prediction of a chatter stability of thin-walled parts during high-speed milling considering a variation of dynamic characteristics based on surface roughness measurement / *M.Damous, N.Zeroudi, A.Chellil and other* // Int J Adv Manuf Technol. – 2023. – Vol. 127. – P. 5729–5744. DOI: 10.1007/s00170-023-11945-6.
- 34. *Iglesias A*. Optimisation of face milling operations with structural chatter using a stability model based process planning methodology / *A.Iglesias, J.Munoa, J.Ciurana* // Int J Adv Manuf Technol. 2014. Vol. 70. P. 559–571. DOI: 10.1007/s00170-013-5199-z.

References:

- Masmiati, N., Sarhan, A.A.D., Hassan, M.A. and Hamdi, M. (2016), «Optimization of Cutting Condi-tions for Minimum Residual Stress, Cutting Force and Surface Roughness in End Milling of S50C Medium Carbon Steel», *Measurement*, No. 86, pp. 253–265.
- Liu, Y., Cui, N., Chen, H.et al. (2022), «Effect of Temperature on Milling Stability of Thin-Walled Parts», Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf, No. 237, pp. 414–423.
- 3. Liang, S.Y., Ren, Y.-Y., Jia, B.-G. et al. (2024), «Stability of Micro-Milling Tool Consider-ing Tool Breakage», J. Manuf. Mater. Process., No. 8, 122 p.
- Cheng, Y.N., Li, M.L. and Zheng, Y.G. (2009), «Zhao Study on Distributing Principle of Force Density Function for Complex Three-Dimension Groove Milling Insert», *Mater. Sci. Forum.*, Vol. 626–627, pp. 629–634.
- 5. Stepchyn, Ya.A. (2016), «Porivnialna kharakterystyka dynamiky protsesiv tortsevoho frezeruvannia frezamy standartnykh ta spetsialnykh konstruktsii», *Visnyk ZhDTU*. Ser. *Tekhnichni nauky*, No. 1 (72), pp. 51–56.
- 6. Vyhovskyi, H.M. (1999), «Kolyvannia syl rizannia pry obrobtsi detalei tortsevymy stupinchastymy frezamy», *Visnyk ZhITI. Inzhenerni nauky*, Issue 9.
- 7. Vyhovskyi, H.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.
- 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», in Tonkonogyi, V. et al. (ed.), Advanced Manufacturing Processes II, (InterPartner) 2020, Lecture Notes in Mechanical Engineering, doi: 10.1007/978-3-030-68014-5_26.
- Melnyk, O., Hlembotska, L., Balytska, N. et al. (2019), «The Imitation Study of Taper Connections Stiffness of Face Milling Cutter Shank Using Machine Spindle in the SolidWorks Simulation Environment», in Ivanov, V. et al. (ed.), *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II, (DSMIE) 2019*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, doi: 10.1007/978-3-030-22365-6_60.
- 10. Vásquez Céspedes, H. (2011), «Measuring Cutting Forces in Machining Processes», Rev. Ing., No. 11, pp. 129–141.
- Daniyan, I.A., Tlhabadira, I., Phokobye, S.N. et al. (2019), «Modelling and Optimiza-tion of the Cutting Forces during Ti6al4v Milling Process Using the Response Surface Methodol-ogy and Dynamometer», *MMSci. J.*, Vol. 128., pp. 3353–3363.
- 12. Vyhovskyi, H., Plysak, M., Balytska, N. et al. (2023), «Numerical Simulation of Cutting Forces in Face Milling», in Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J. et al. (ed.), *Advanced Manufacturing Processes IV, (InterPartner)* 2022, Lecture Notes in Mechanical Engineering, doi: 10.1007/978-3-031-16651-8_21.
- Li, H.Z., Zeng, H. and Chen, X.Q. (2006), «An Experimental Study of Tool Wear and Cutting Force Variation in the End Milling of Inconel 718 with Coated Carbide Inserts», J. Mater. Process Technol., Vol. 180, pp. 296–304.
- 14. Ding, P. and Li, Y. (2024), «Time-Varying Dynamic Modeling of Micro-Milling Considering Tool Wear and the Process Parameter Identification», *Mech. Based Des. Struct. Mach.*, Vol. 52, pp. 8658–8684.
- 15. Qin, C., Chen, W., Zhang, C. et al. (2023), «Improvement of Dispersion Stability and Polishing Performance of Chemical Mechanical Polishing Slurry for Cemented Car-bide Inserts», J. Dispers. Sci. Technol., pp. 1–11.
- 16. Liu, L., Wang, G., Liu, J. et al. (2021), «Dynamic Cutting Force and Stress Distribution of Carbide Insert during Asymmetric Milling of 508III Steel», *Integr. Ferroelectr.*, Vol. 217, pp. 163–169.
- 17. Chuangwen, X., Jianming, D., Yuzhen, C. et al. (2018), «The Relation-ships between Cutting Parameters, Tool Wear, Cutting Force and Vibration», *Adv. Mech. Eng.*, Vol. 10, doi: 1687814017750434.
- 18. Yesilyurt, I. and Gursoy, H. (2018), «Modeling and Experimental Verification of Cutting Forces in Gear Tooth Cutting», *Mach. Sci. Technol.*, Vol. 22, pp. 30–47.
- 19. Kushnirov, P., Gel'atko, M., Dehtiarov, I. et al. (2023), «Milling Heads for Machining Mutually Perpendicular Flat Surfaces», *MM Sci. J.*, pp. 6441–6445.
- 20. Melnychuk, P.P. and Loiev, V.Iu. (2024), «Teoretyko-tekhnolohichne obgruntuvannia mozhlyvostei obrobky ploskykh poverkhon detalei tortsevym lezovym instrumentom, osnashchenym nadtverdymy materialamy, zamist shlifuvannia», *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, No. 3, pp. 164–172.
- Wu, W.P. (2008), «Investigation of the Effects of Face-Milling Parameters of Ultra-Large-Scale Plane on Milling Quality», Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 37, pp. 241–249.
- Tan, G., Liu, G. and Li, G. (2009), «Experimental Study on Adhesive Wear of Milling Insert with Complex Groove», Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 44, pp. 631–637.
- 23. Mrkvica, I. and Janoš, M. (2014), «Comparison of Round Insert's Lifetime When Milling Inconel 718», Key Eng. Mater., Vol. 581, pp. 26–31.
- 24. Dilipak, H. and Gezgin, A. (2010), «The Investigation of The Effects of Number of Inserts, Cutting Speed and Feed Rate on Surface Roughness in Milling of AISI D3», *Steel. J. Polytech.-Politek. Derg.*, Vol. 13, pp. 29–32.

- 25. Vyhovskyi, H.M., Hromovyi, O.A. and Plysak, M.M. (2023), «Analiz vplyvu skhem roztashuvannia formoutvoriuiuchykh rizalnykh elementiv na protsesy vidtysk tortsevykh stupinchastykh frez», *Tekhnichna inzheneriia*, Issue 1 (91), pp. 42–49, doi: 10.26642/ten-2023-1(91)-42-49.
- 26. Vyhovskyi, H.M. (2000), «Pidvyshchennia pratsezdatnosti tortsevykh frez dlia chystovoi obrobky ploskykh poverkhon», Abstract of Ph.D. dissertation, 05.03.01 Protsesy mekhanichnoi obrobky, verstaty ta instrumenty, K., 16 p.
- 27. Vyhovskyi, H.M. and Melnychuk, P.P. (1998), «Protses rizannia tortsevymy stupinchatymy frezamy z kosokutnoiu heometriieiu rizalnykh chastyn, shcho osnashcheni nadtverdymy materialamy», *Visnyk ZhITI*, No. 7, pp. 73–81.
- 28. Graves, C.O. and Hans, E. (1956), Patent No. 2,761,196, Face mill, 4 Sep.
- 29. Sture, S. (2013), Patent No. 8,550,753, Face mill for fine milling, 8 Oct.
- 30. Vyhovskyi, H.M., Hromovyi, O.A., Loiev, V.Iu. and Melnychuk, P.P. (2000), *Deklaratsiinyi patent na vynakhid*, No. 40156A Ukraina, Sposib ploskoho frezeruvannia tortsevymy frezamy, zaiavl. 17.07.2000, opubl. 16.07.2001.
- 31. Vyhovskyi, H.M., Balytska, N.O., Hlembotska, L.Ie., Melnyk, O.L., Plysak, M.M. and Hromovyi, O.A. (2024), *Pat. No. 158589 Ukraina, Tortseva stupinchasta freza*, zaiavl. 01.07.2024, opubl. 26.02.2025.
- 32. Vyhovskyi, H.M., Plysak, M.M., Hlembotska, L.Ie. and Holubovskyi, A.V. (2024), «Udoskonalennia konstruktsii tortsevoi stupinchastoi frezy dlia finishnoi obrobky ploskykh poverkhon detalei», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (93), pp. 45–51, doi: 10.26642/ten-2024-1(93)-45-51.
- Damous, M., Zeroudi, N., Chellil, A. et al. (2023), «Prediction of a chatter stability of thin-walled parts during highspeed milling considering a variation of dynamic characteristics based on surface roughness measurement», *Int J Adv Manuf Technol.*, Vol. 127, pp. 5729–5744, doi: 10.1007/s00170-023-11945-6.
- Iglesias, A., Munoa, J. and Ciurana, J. (2014), «Optimisation of face milling operations with structural chatter using a stability model based process planning methodology», *Int J Adv Manuf Technol.*, Vol. 70, pp. 559–571, doi: 10.1007/s00170-013-5199-z.

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;
- проєктування різальних інструментів;
- різальний інструмент для гнучких виробничих систем.

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

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

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проєктування різальних інструментів.

Коваль Юрій Олегович – аспірант кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка», спеціаліст лабораторії мехатроніки.

https://orcid.org/0009-0001-4885-860X.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- моделювання процесів різання;
- високошвидкісні процеси різання.

Vyhovskyi H.M., Plysak M.M., Koval Y.O.

Study of a face stepped milling cutter for finishing flat surfaces

The paper presents the results of an experimental study on the influence of cutting force components on machining quality during finish face milling of the grey cast iron GCI21 (similar to EN-GJL-200) using a specially developed face stepped milling cutter. Special attention is given to the analysis of cutting forces, surface roughness, and flatness deviations of the machined surfaces depending on the machining parameters – cutting speed and feed per tooth. A comparison was made between the results obtained when using a single fixed cutting insert relative to the cutter body and a movable insert in contact with a profile follower. It was found that increasing the feed per tooth leads to a rise in all components of the cutting force, which results in a deterioration in surface roughness and an increase in flatness deviations. Meanwhile, increasing the cutting speed up to V = 11,72 m/s was observed to reduce cutting forces and improve the quality of the machined surface. The proposed cutter design, with a finishing insert operating in the axial direction and maintaining elastic contact with a stationary profile follower, allows for compensation of elastic deformations, stabilization of the insert position, and reduction of machining errors. The obtained results can be used to optimize face milling cutter designs and machining parameters in order to improve machining accuracy and surface quality during milling operations.

Keywords: face milling; stepped cutter; cutting forces; surface roughness; flatness; finishing; grey cast iron GCI21.

Стаття надійшла до редакції 15.04.2025.