

Г.М. Виговський, к.т.н., доц.
М.М. Плисак, аспірант
С.І. Радкевич, PhD, доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Дослідження процесу різання торцевою ступінчастою фрезою з рухомих формоутворюючим різальним елементом

У статті представлено результати експериментального дослідження впливу складових сили різання на мікро- та макрогеометрію оброблюваної плоскої поверхні при чистовому торцевому фрезеруванні сірого чавуну СЧ-21 (270 НВ) 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 при використанні нерухомо закріплених відносно корпусу фрези різальних елементів (РЕ) та застосування рухомого чистового формоутворюючого РЕ з пружним контактом відносно нерухомого копіра. Встановлено, що при підвищенні подачі на зуб зростають усі складові сили різання, що веде до погіршення як шорсткості обробки, так і до збільшення відхилення від площинності. Разом з тим, при підвищенні швидкості різання до $V=26,4$ м/с спостерігається зниження сил різання та покращення мікро- та макрогеометрії оброблюваної плоскої поверхні. Запропонована конструкція фрези з рухомих в осьовому напрямі чистовим РЕ, що пружно контактує із нерухомих копіром, дозволяє компенсувати пружні деформації технологічної системи (ТС) та зменшити похибки обробки. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкцій торцевих фрез та режимів обробки для підвищення мікро- та макрогеометрії плоских поверхонь при чистовому торцевому фрезеруванні.

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

Постановка проблеми. Торцеве фрезерування є прогресивним методом механічної обробки деталей, оскільки одночасно при обробці приймають участь у різанні кілька РЕ фрези, що дозволяє забезпечувати високу продуктивність та відповідні якісні характеристики оброблюваних поверхонь [1–4]. Порівняно з абразивними методами обробки, торцеве фрезерування має вищу продуктивність, дозволяє знімати більший шар матеріалу за один прохід та зменшувати тепловий вплив на деталь усуваючи припінання, мікротріщини та інші температурні дефекти [5].

Разом з тим, кінематичні та динамічні характеристики процесу торцевого фрезерування пов'язані з переривчастим характером різання через періодичний вхід і вихід РЕ із зони різання, що спричиняє змінні динамічні деформації, які погіршують мікро- та макрогеометрію оброблюваної поверхні, а також прискорюють зношування РЕ та вузлів верстата. Крім того, нерівномірність сил різання викликає коливання ТС у результаті чого суттєво зменшується реальна кількість РЕ, які приймають участь у різанні. Погіршення динаміки процесу призводить до зниження динамічної жорсткості ТС в результаті нерівномірного силового навантаження, пружних деформацій корпусу фрези, осьових переміщень РЕ, нерівномірного розподілу припуску між РЕ та як наслідок, до збільшення відхилення від площинності та зростання шорсткості оброблюваної поверхні [8–9]. Дослідженнями [9–13] підтверджено, що підвищення динамічної жорсткості ТС «верстат – інструмент» дозволяє покращити мікро- та макрогеометрію оброблюваної поверхні.

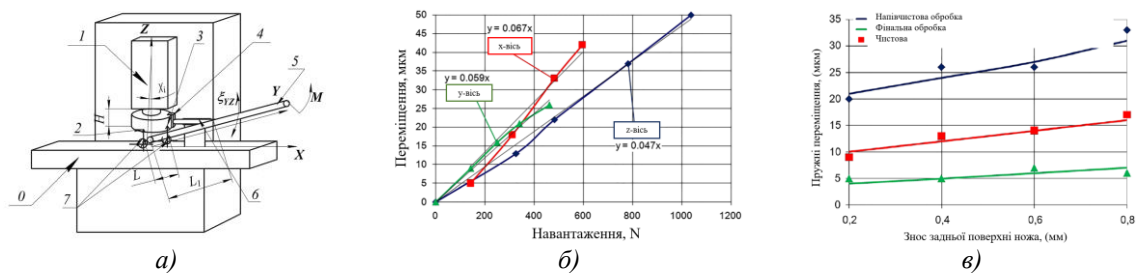


Рис. 1. Вимірювання жорсткості ТС вертикально фрезерного верстата: а) схема вимірювання; б) пружні деформації ТС; в) деформації ТС у результаті зносу задньої поверхні РЕ [11]

Враховуючи проблеми динамічної нестабільності процесу торцевого фрезерування, одним із ефективних шляхів підвищення продуктивності та якості обробки є застосування спеціальних конструкцій торцевих фрез. Зокрема, спірально-ступінчастих фрез косокутного різання з безвершинними різальними кромками, оснащеними НТМ, які дозволяють значно підвищити продуктивність обробки, забезпечити високу зносостійкість та отримати поверхні малої шорсткості [14, 15]. Проте навіть при використанні таких конструкцій залишаються проблеми, пов'язані з підвищеними силами різання, які діють на чорнові РЕ, які знімають більшу частину припуску, та призводять до зміни осьового положення чистових РЕ, які формують поверхню. При формуванні поверхні чистовими РЕ на їх осьове положення додатково впливають ударні та змінні деформації фрези на ділянках врізання та виходу чорнових РЕ із зони різання [16–18].

Пошук прихованих резервів процесів обробки спірально-ступінчастими фрезами косокутного різання, оснащеними НТМ, вимагає проведення додаткових досліджень щодо впливу різних факторів на характеристики оброблених поверхонь для забезпечення стабільного положення чистового формуючого РЕ [19–21], що дозволить краще зрозуміти механізми утворення похибок, спричинених нестабільністю процесу формоутворення та обґрунтувати рекомендації для підвищення якісних характеристик обробки плоских поверхонь.

Метою роботи є виконання експериментальних досліджень розробленої конструкції торцевої ступінчастої фрези [19] з рухомим чистовим РЕ, що пружно контактує з нерухомо закріпленим копіром, а також із нерухомо закріпленим чорновими РЕ відносно корпусу фрези, на сили різання, шорсткість та точність обробки плоскої поверхні з сірого чавуну *СЧ-21 (270 НВ)*.

Постановка завдання. На основі комп'ютерного моделювання, було встановлено, що недоліком способу торцевого ступінчастого фрезерування є те, що при різанні чорновими РЕ, які зрізають більшу частину припуску, виникають значні осьові сили різання, які діють у напрямі паралельному осі фрези та викликають переміщення чистових РЕ в цьому напрямі у зв'язку із їх жорстким закріпленням у корпусі фрези.

Для першого етапу експериментальних досліджень було використано розроблену торцеву ступінчасту фрезу діаметром 315 мм з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та нерухожим в осьовому напрямі чистовим РЕ. РЕ були розташовані на різних відстанях відносно осі фрези та з різним вильотом відносно корпусу фрези. Розміри радіусів на яких розміщені РЕ: $R_1 = 142$ мм; $R_2 = 141,6$ мм; $R_3 = 141,2$ мм; $R_4 = 140,8$ мм; $R_5 = 140,4$ мм; $R_6 = 140$ мм; передній кут $\gamma = -10^\circ$; задній кут $\alpha_v = 12^\circ$; кут нахилу головної різальної кромки $\lambda = -35^\circ$; інструментальний матеріал Гексаніт-Р. Режими та умови обробки підбиралися таким чином, щоб забезпечити можливість комплексної оцінки впливу сил різання на шорсткість обробленої поверхні та відхилення від площинності залежно від режимів обробки деталі із сірого чавуну *СЧ-21 (270 НВ)*. Швидкість різання змінювалась від $v_c = 2,6$ м/с до $v_c = 26,4$ м/с; подача на зуб від $S_z = 0,156$ мм/зуб до $S_z = 0,39$ мм/зуб; глибина різання була постійною $t = 0,75$ мм.

Максимальні значення складових сил різання P_x , P_y , P_z , шорсткість поверхні R_a , відхилення від площинності з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та чистовим РЕ наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Отримані результати експерименту з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та чистовим РЕ

№ з/п	Швидкість різання V , м/с	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Кут λ , град	Глибина різання, мм	P_x , Н	P_y , Н	P_z , Н	Шорсткість поверхні, R_a , мкм			Відхилення від площинності, мм
								Вхід	Центр	Вихід	
1	2,6	0,156	-35°	t - 0,75	382	578	478	9,6	9,8	9,4	0,02
2		0,25			387	599	530	14,8	16,3	15,2	0,03
3		0,39			526	685	745	18,8	21,5	20,8	0,03
4	4,1	0,1			272	559	419	4,9	5,2	4,8	0,03
5		0,156			333	577	465	8,5	9,2	7,8	0,04
6		0,25			356	595	545	10,8	12,5	11,5	0,02
7	6,6	0,063			327	464	456	3,6	4	3,4	0,04
8		0,1			368	540	476	4,8	5,1	4,7	0,05
9		0,156			399	630	507	9,4	9,8	9,2	0,03
10	10,4	0,039			378	449	462	4,1	3,2	2,4	0,07
11		0,063			382	531	477	4,6	4,2	3,2	0,04
12		0,1			433	594	499	7,2	5,3	4,3	0,04
13	16,5	0,025			340	403	406	3,1	2,9	2,6	0,05
14		0,039			320	578	574	3,8	4,0	3,7	0,05
15		0,063			585	618	605	5,3	5,0	4,9	0,04
16	26,4	0,0156			298	360	393	1,6	1,7	1,6	0,01
17		0,025			312	603	556	2,0	2,2	2,0	0,02
18		0,039			438	583	564	2,5	2,6	2,5	0,06

Отримані залежності складових сили різання P_x , P_y , P_z від v_c , та S_z з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та чистовим РЕ, наведені на (рис. 2).

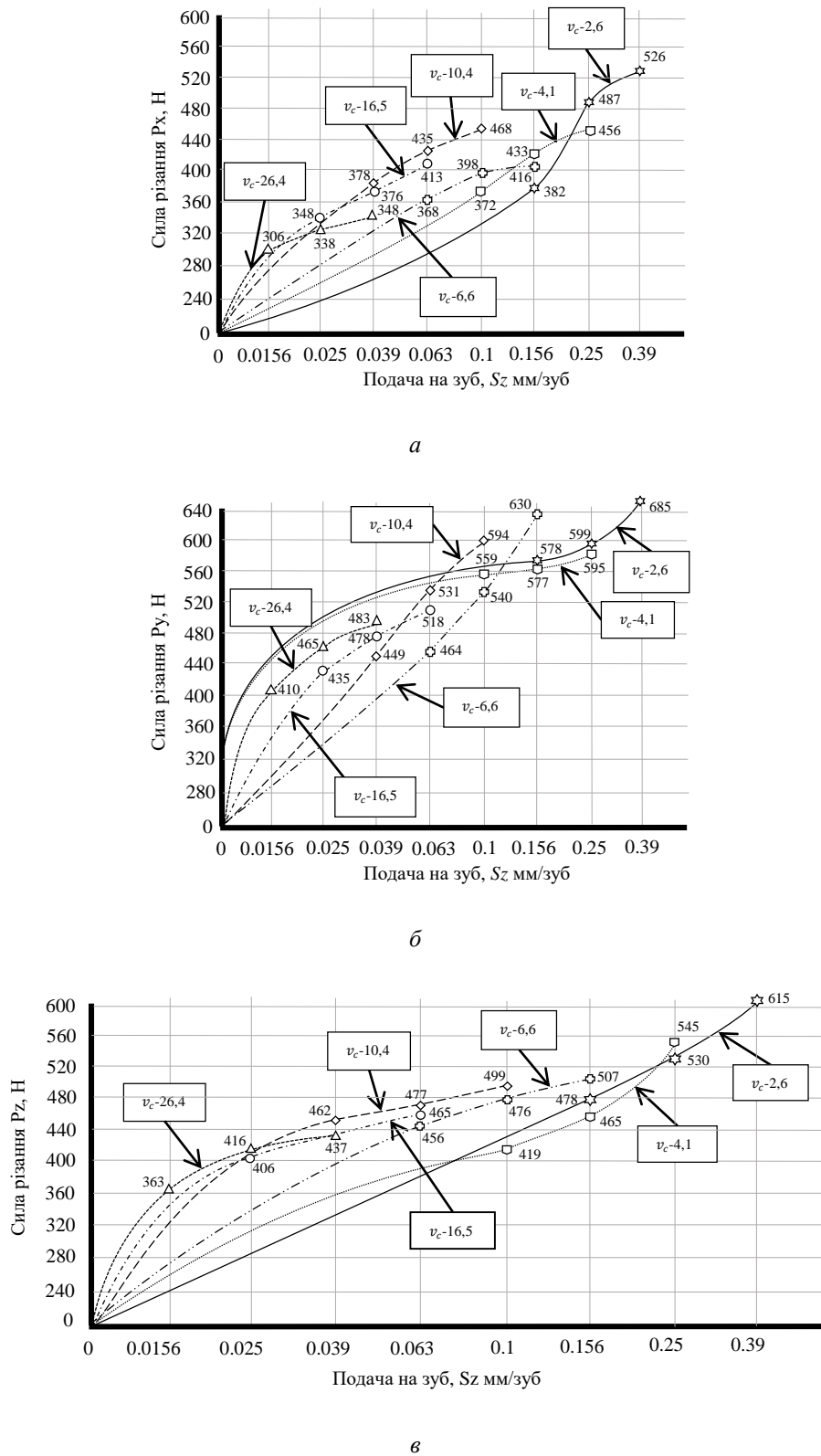


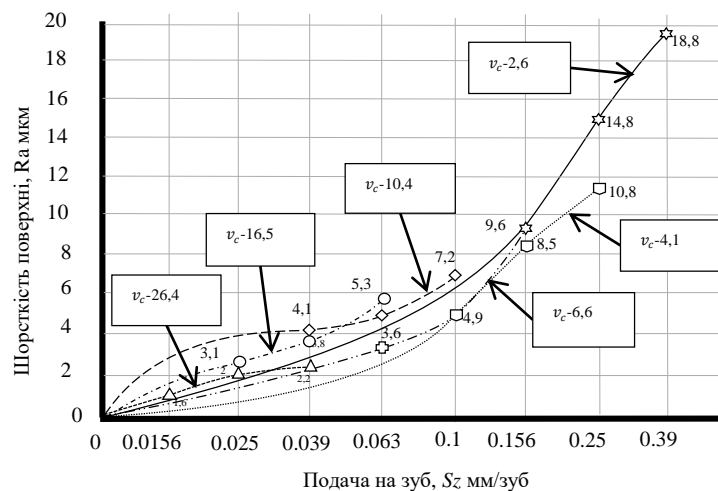
Рис. 2. Залежність складових сили різання P_x , P_y , P_z від швидкості різання v_c та подачі на зуб S_z з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та чистовим РЕ: а) P_x – радіальна; б) P_y – осьова; в) P_z – тангенційна.

Радіальна складова сили різання P_x (рис. 2, а) у випадку одночасної роботи чорнових та чистового РЕ досягає значень 306–526 Н, що істотно перевищує значення, отримані для фрези з одним РЕ [21]. У діапазоні подач на зуб S_z від 0,0156 мм/зуб до 0,156 мм/зуб спостерігається загальна тенденція до зростання P_x із підвищенням S_z , хоча залежності мають більш складний характер, що зумовлено перерозподілом припуску між кожним РЕ в процесі різання. Зміна v_c від 2,6 м/с до 26,4 м/с не призводить до чітко вираженої монотонної зміни P_x , а вплив швидкості різання v_c проявляється переважно у вигляді зміни сил різання в межах 10–20 %, що пов'язано із зміною контактних умов на різальній кромці та відмінностями фактичної колової швидкості на різних радіусах розташування РЕ. Радіальна складова P_x при цьому є основним джерелом радіального навантаження на ШВ і визначає напрямок відхилення його осі, а отже – впливає на точність форми деталі та взаємного розташування оброблених поверхонь.

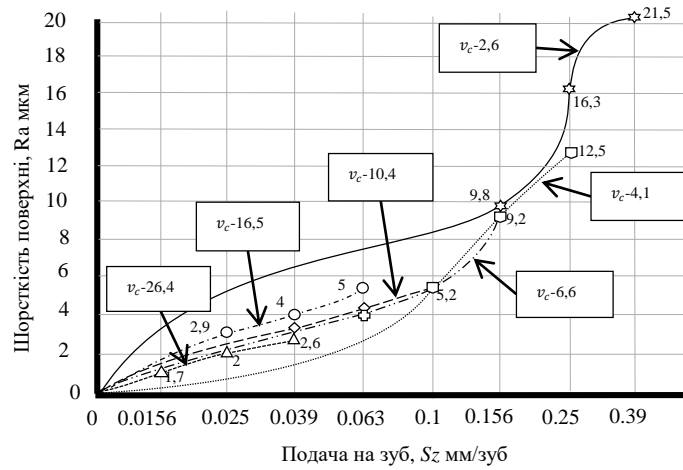
Осьова складова сили різання P_y (рис. 2, б) є найбільшою і досягає 410–685 Н. У діапазоні малих і середніх подач на зуб S_z від 0,0156 мм/зуб до 0,1 мм/зуб величина P_y із збільшенням S_z зростає майже монотонно, що зумовлено збільшенням сумарного об'єму матеріалу, що зрізається всіма РЕ за один оберт. При поєднанні великих подач на зуб S_z із малою швидкістю різання v_c від 2,6 м/с до 4,1 м/с фіксуються максимальні значення P_y , що вказує на високий рівень силового навантаження на ШВ. Для режимів із підвищеною швидкістю різання v_c від 16,5 м/с до 26,4 м/с величина P_y дещо знижується, що узгоджується з раніше виявленою тенденцією до зменшення сил різання при збільшенні v_c за сталих геометричних умов [21].

Тангенціальна складова сили різання P_z (рис. 2, в), що безпосередньо пов'язана з потужністю різання, досягає 363–615 Н. У межах подач на зуб S_z від 0,025 мм/зуб до 0,156 мм/зуб процес різання супроводжується підвищенням P_z , особливо при малих значеннях швидкості різання v_c від 2,6 м/с до 4,1 м/с. Для режимів із підвищеною швидкістю різання v_c від 16,5 м/с до 26,4 м/с величина P_z є нижчою, що пояснюється сприятливішими умовами стружкоутворення, зменшенням питомих контактних тисків та частковим перерозподілом рівнодійної сили в осьовому напрямі завдяки негативному куту $\lambda = -35^\circ$. Встановлено, що складові сили різання P_x , P_z навантажують ШВ у напрямі перпендикулярному до осі обертання, що суттєво впливає на пружну деформацію фрези та поведінку ТС.

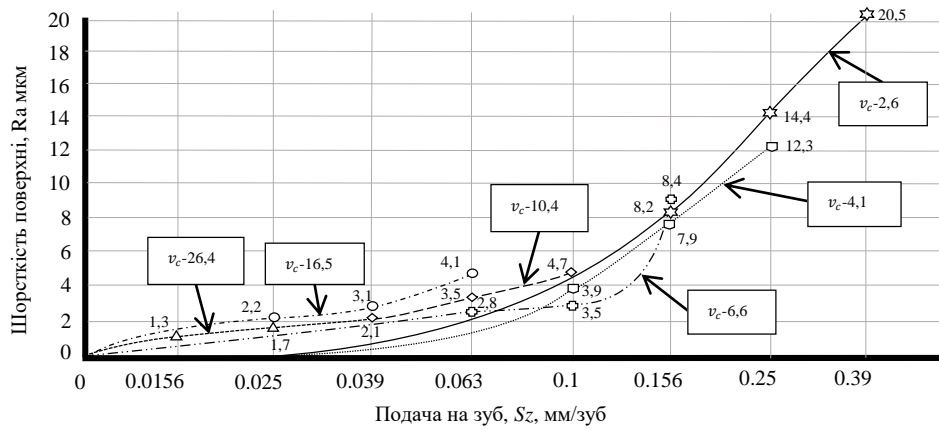
Отримані залежності шорсткості обробленої поверхні R_a від v_c , та S_z з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та чистовим РЕ, наведені на (рис. 3).



а



б



в

Рис. 3. Залежність шорсткості поверхні R_a від швидкості різання v_c та подачі на зуб S_z з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та чистовим РЕ:
а) R_a на вході; б) R_a по центру; в) R_a на виході.

На ділянці виходу (рис. 3, в) РЕ із заготовки при малих подачах на зуб S_z від $0,0156$ мм/зуб до $0,039$ мм/зуб параметр R_a не перевищує $1-2$ мкм, однак при збільшенні S_z від $0,063$ мм/зуб до $0,1$ мм/зуб параметр R_a зростає швидше, ніж на ділянці врізання чи в центрі заготовки, досягаючи $6-10$ мкм. У зоні великих подач на зуб S_z від $0,156$ мм/зуб до $0,25$ мм/зуб при мінімальній швидкості різання $v_c = 2,6$ м/с параметр R_a перевищує $18-20$ мкм, що свідчить про підвищену схильність до відколювання вершин графітних включень та посилену дію коливань в момент виходу РЕ із контакту. Для швидкості різання v_c від $16,5$ м/с до $26,4$ м/с параметр R_a на виході помітно нижчі, що свідчить про більш стабільний характер процесу різання при високих v_c .

Отримані залежності показують, що для спірально-ступінчастої фрези з нерухомо закріпленими у корпусі фрези РЕ, вирішальним фактором формоутворення поверхні залишається подача на зуб, а при збільшенні супроводжується стійким зростанням R_a . Швидкість різання v_c після підвищення від $16,5$ м/с до $26,4$ м/с дає змогу зменшити R_a поверхні на всіх ділянках заготовки, що узгоджується зі зниженням сил різання й поліпшенням умов стружкоутворення. Найбільш критичною є ділянка виходу РЕ, де комбінований вплив підвищених сил призводить до максимальних значень R_a , саме для цієї зони доцільно обмежувати S_z та збільшувати v_c .

Отримані значення відхилення від площинності в залежності від v_c , та S_z з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та чистовим РЕ, наведені на (рис. 4).

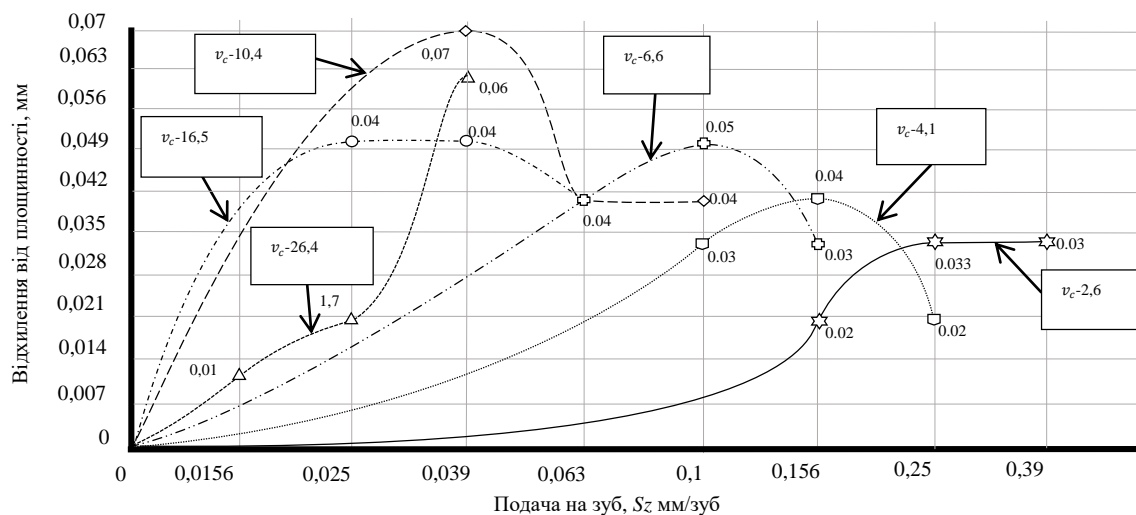


Рис. 4. Відхилення від площинності в залежності від швидкості різання v_c та подачі на зуб S_z з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та чистовим РЕ.

Діапазон експериментально отриманих відхилень від площинності (рис. 4) становить від $0,01$ до $0,07$ мм на площині шириною 160 мм. Мінімальні значення від $0,01$ до $0,02$ мм спостерігаються за малих подач на зуб S_z від $0,0156$ мм/зуб до $0,025$ мм/зуб при підвищених швидкостях різання v_c від $16,5$ м/с до $26,4$ м/с, що свідчить про стабільний характер різання в цих умовах. Максимальні відхилення від площинності від $0,06$ до $0,07$ мм фіксуються в області середніх значеннях подачі на зуб S_z від $0,039$ мм/зуб до $0,063$ мм/зуб у поєднанні з середніми і підвищеними швидкостями різання v_c від $6,6$ м/с до $10,4$ м/с. Саме в цьому діапазоні, згідно з результатами вимірювань сил різання, спостерігаються підвищені величини складових P_y та P_z , що призводить до збільшення деформацій ШВ-фрези та амплітуд коливань фрези. Для спіральної-ступінчастої фрези з нерухомо закріпленими РЕ одночасна робота декількох РЕ на різних радіусах і з різним осьовим вильотом створює складну картину силового навантаження з можливим збудженням коливань, що безпосередньо проявляється у збільшенні похибок макрогеометрії. За подальшого збільшення подачі на зуб S_z від $0,1$ мм/зуб до $0,25$ мм/зуб, відхилення від площинності знаходяться в межах $0,02$ – $0,04$ мм і не демонструють різкого зростання. Це можна пояснити тим, що за великих подач на зуб S_z зростає жорсткість контакту РЕ із заготовкою, унаслідок чого високочастотні коливання демпфуються, незважаючи на підвищені значення сил різання. Для найменших і найбільших v_c $2,6$ м/с та $26,4$ м/с відхилення від площинності при великих S_z залишаються відносно невисокими, що свідчить про відсутність виражених резонансних явищ у цих режимах.

Наступний експеримент було проведено з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та рухомими чистовими РЕ з пружним контактом відносно нерухомого копіра. Рухомий чистовий РЕ 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, що пружно контактує під дією зусилля пружини 9 через підшипник 6 з копіром 5. (рис. 5, б) [19–21]. Попередні чорнові РЕ виконують послідовне чорнове знімання припуску, тоді як чистовий РЕ ізольовано від їхнього силового впливу за рахунок пружного контакту з копіром. Рухомий чистовий РЕ, який пружно контактує з копіром, дозволяє значною мірою компенсувати вплив змінного навантаження та дає змогу підтримувати практично сталу осьову позицію чистового РЕ відносно оброблюваної поверхні незалежно від пружних деформацій, спричинених силами різання на попередніх чорнових РЕ.

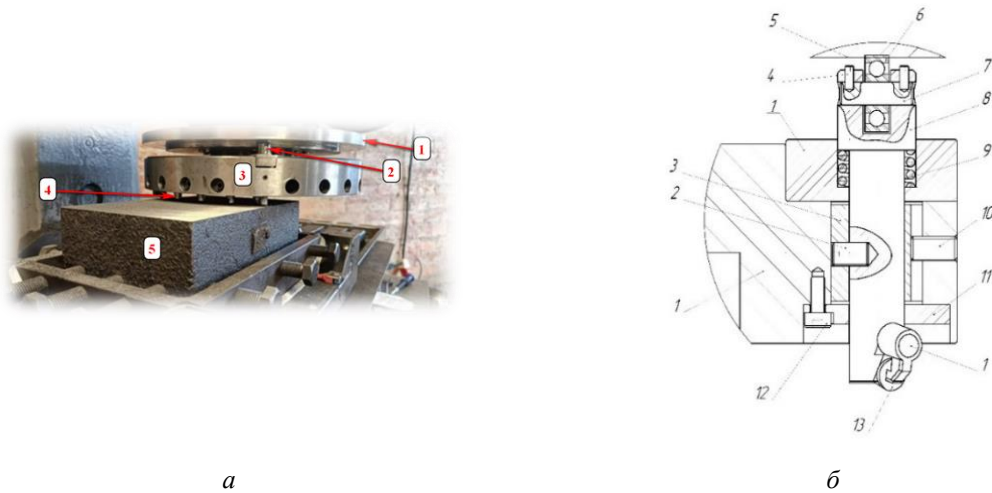


Рис. 5. Спірально-ступінчаста фреза:

а) 1 – копір; 2 – рухомий РЕ; 3 – фреза; 4 – чорнові РЕ; 5 – заготовка; б) конструкція рухомого 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 [19].

Максимальні значення складових сил різання P_x , P_y , P_z , шорсткості поверхні R_a , відхилення від площинності з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та рухомим чистовим РЕ з пружним контактом відносно нерухомого копіра, наведені в (табл. 2).

Таблиця 2

Отримані результати експерименту з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та рухомим чистовим РЕ з пружним контактом відносно нерухомого копіра

№ з/п	Швидкість різання V , м/с	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Кут λ , град	Глибина різання, мм	P_x , Н	P_y , Н	P_z , Н	Шорсткість поверхні, R_a , мкм			Відхилення від площинності, мм
								Вхід	Центр	Вихід	
1	2,6	0,156	-35	t-0.75	267	376	335	2,8	3,0	2,8	0,030
2		0,25			319	479	395	3,1	4,0	4,0	0,038
3		0,39			433	562	445	5,2	5,3	5,4	0,045
4	4,1	0,1			201	271	250	3,1	3,1	3,1	0,023
5		0,156			241	330	300	3,5	3,6	3,6	0,026
6		0,25			281	386	355	3,6	3,8	3,6	0,035
7	6,6	0,063			197	298	266	3,0	3,1	3,0	0,018
8		0,1			238	349	311	3,6	3,8	3,8	0,021
9		0,156			261	389	357	3,8	3,8	3,8	0,027
10	10,4	0,039			373	453	391	1,6	1,6	1,6	0,014
11		0,063			420	497	436	2,2	2,2	2,2	0,015
12		0,1			514	527	517	3,0	3,1	3,0	0,020
13	16,5	0,025			329	388	464	1,0	1,1	1,0	0,008
14		0,04			351	433	491	1,6	1,7	1,6	0,014
15		0,063			356	478	529	2,0	2,2	2,2	0,015
16	26,4	0,0156			292	420	383	0,7	0,8	0,7	0,003
17		0,025			308	445	427	1,1	1,2	1,1	0,006
18		0,039			335	485	454	1,3	1,3	1,4	0,012

Отримані залежності складових сили різання P_x , P_y , P_z від v_c та S_z з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та рухомим чистовим РЕ з пружним контактом відносно нерухомого копіра, наведені на (рис. 6).

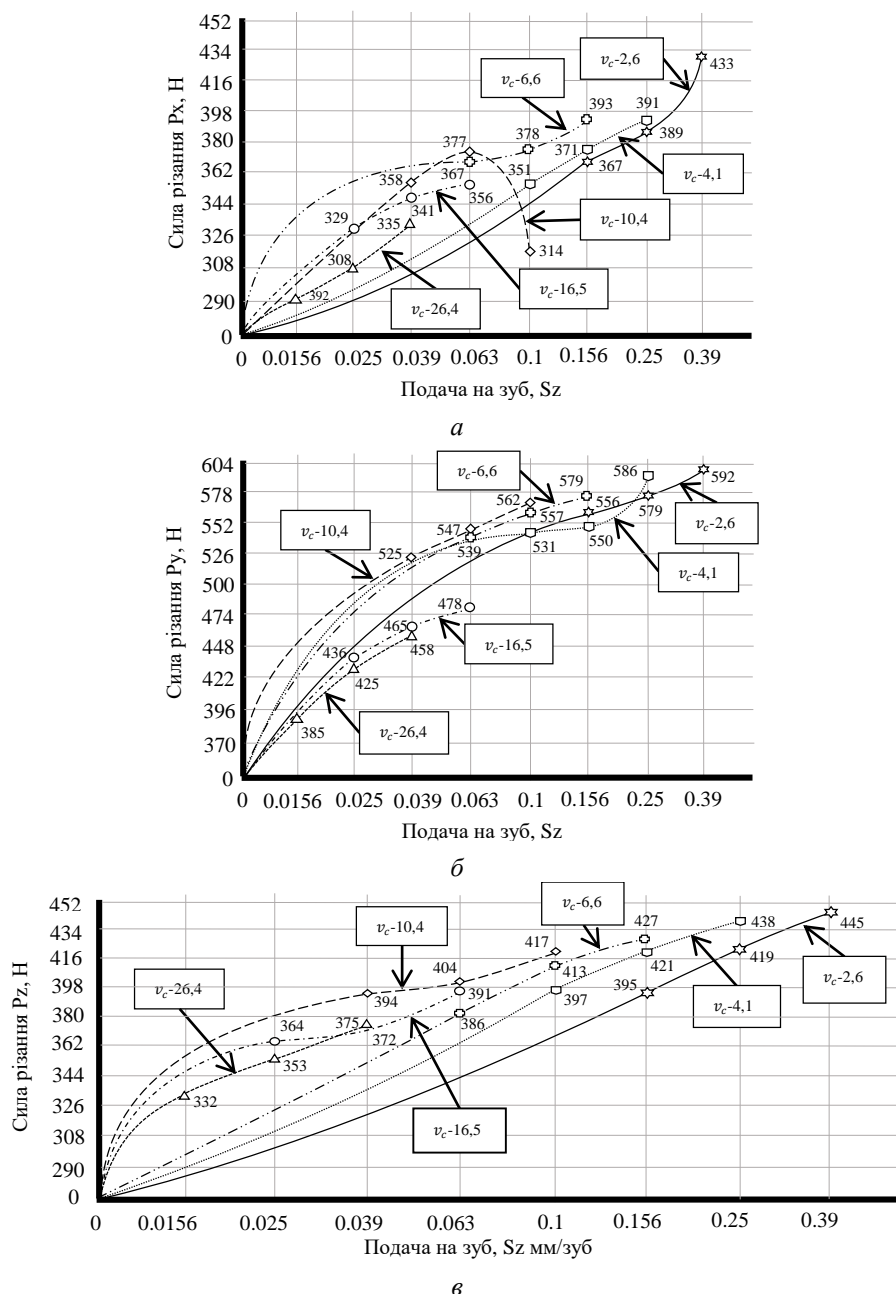


Рис. 6. Залежність складових сили різання P_x , P_y , P_z від v_c та S_z з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та рухомим чистовим РЕ з пружним контактом відносно копіра: а) P_x – радіальна; б) P_y – осьова; в) P_z – тангенційна.

Радіальна складова сили різання P_x (рис. 6, а) у випадку одночасної роботи чорнових та рухомого чистового РЕ, змінюється в межах 292–433 Н. Для всіх значень швидкості різання v_c спостерігається чітка тенденція до зростання P_x із підвищенням подачі на зуб S_z від 0,0156 до 0,39 мм/зуб зміна сили різання має майже лінійний характер, без різких стрибків і локальних екстремумів, а розкид не перевищує 5–10%, що свідчить про високу повторюваність та стабільність. Порівняно з попередньою схемою (рис. 2), максимальні величини P_x у виконанні ступені з рухомим чистовим РЕ є дещо меншими, а розкид по швидкостях є суттєво меншим. Це пояснюється тим, що рухомий чистовий РЕ, який пружно контактує з копіром є більш жорстким щодо пружних деформацій корпусу фрези, зумовлених роботою чорнових РЕ. Іншими словами, радіальні зміщення спричинені попередніми чорновими РЕ майже не змінюють миттєву товщину зрізу чистового РЕ, тому і P_x має стабільніший характер.

Осьова складова сили різання P_y (рис. 6, б) є найбільшою і досягає 385–592 Н. У діапазоні подач на зуб S_z від 0,0156 мм/зуб до 0,156 мм/зуб залежності P_y від S_z є квазілінійними і демонструють монотонне

зростання P_y зі збільшенням подачі на зуб S_z , що повністю узгоджується з уявленнями про вплив миттєвої товщини зрізу на силові параметри процесу. У діапазоні великих подач на зуб S_z від $0,25$ мм/зуб до $0,39$ мм/зуб підвищення P_y уповільнюється, що можна пояснити частковим перерозподілом навантаження між чорновими РЕ та чистовим РЕ, а збільшення S_z насамперед підсилює навантаження на попередніх РЕ, тоді як чистовий РЕ маючи підпружинену опору, компенсує зростання осевих деформацій. Вплив швидкості різання v_c на P_y є незначним, а при переході до вищих швидкостей v_c від $16,5$ м/с до $26,4$ м/с спостерігається тенденція до зменшення P_y , але без різких змін. Важливим є те, що розкид значень P_y між різними швидкостями різання v_c для однієї подачі на зуб S_z став меншим, ніж у випадку ступінчастої фрези з нерухомо закріпленим у корпусі фрези чистовим РЕ. Це свідчить про те, що на підпружинений чистовий РЕ з контактом відносно копіра не діють сили різання від різання чорнових РЕ.

Тангенційна складова сили різання P_z (рис. 6, в), що безпосередньо пов'язана з потужністю різання, досягає $332\text{--}445$ Н. Залежності P_z від подачі на зуб S_z для всіх швидкостей різання практично накладаються одна на одну, показуючи майже ідеально лінійне збільшення сили з підвищенням S_z . Розкид кривих для різних швидкостей різання v_c мінімальний $5\text{--}8\%$, що вказує на високу стабільність чистового процесу за рахунок рухомого чистового РЕ. На відміну від попередньої конструкції, де в окремих режимах спостерігались локальні збільшення P_z , пов'язані з коливаннями та нестабільним стружкоутворенням, у даному випадку таких екстремумів практично немає. З фізичної точки зору це пояснюється тим, що чистовий РЕ з контактом відносно копіра, працює практично при стабільно сформованому припуску. Навіть якщо внаслідок змінних сил на чорнових РЕ корпус фрези зазнає пружних деформацій, чистовий РЕ контактуючи з копіром, зберігає незмінне положення відносно поверхні деталі, тому P_z сила визначається переважно заданими режимами різання, а не випадковими пружними деформаціями ТС.

Отримані залежності шорсткості поверхні R_a від v_c , та S_z з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та рухомим чистовим РЕ з пружним контактом відносно нерухомого копіра, наведені на (рис. 7).

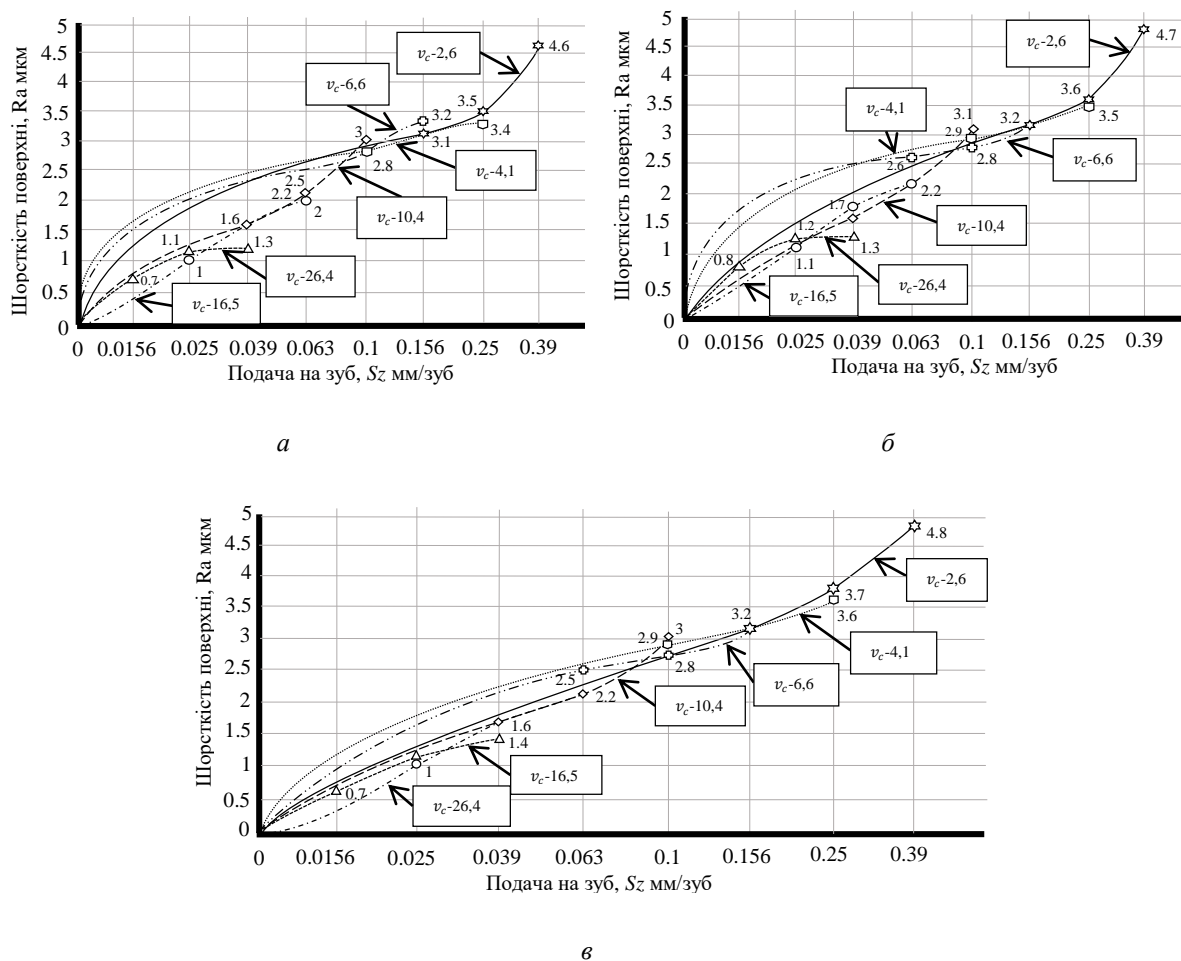


Рис. 7. Шорсткості поверхні R_a в залежності від v_c та S_z з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та рухомим чистовим РЕ з пружним контактом відносно копіра: а) R_a на вході; б) R_a по центру; в) R_a на виході

На ділянці врізання (рис. 7, а) отримані залежності свідчать про суттєве покращення умов формоутворення мікрорельєфу порівняно з попередньою схемою фрезерування (рис. 3). За малих $S_z = 0,0156...0,039$ мм/зуб значення R_a для всіх швидкостей різання не перевищували $R_a = 0,7-1,6$ мкм. При цьому вплив v_c проявлявся лише як незначне зниження R_a при переході до вищих $v_c = 16,5$ та $26,4$ м/с, без різких стрибків або локальних максимумів. Із підвищенням $S_z = 0,063...0,156$ мм/зуб значення R_a закономірно зростали майже лінійно, досягаючи $R_a = 2-3,2$ мкм. Лише при $S_z = 0,25...0,39$ мм/зуб і мінімальній $v_c = 2,6$ м/с спостерігалось помітне погіршення R_a до $3,4-4,6$ мкм, однак навіть у цьому випадку показник залишався у межах, прийнятних для чистової обробки.

По центру заготовки (рис. 7, б), для малих значень подачі на зуб $S_z = 0,0156...0,039$ мм/зуб параметр R_a знаходився в інтервалі $0,8-1,7$ мкм, а при збільшенні $S_z = 0,063...0,156$ мм/зуб значення R_a зросли до $2,2-3,2$ мкм. Максимальні значення R_a $3,5 - 4,7$ мкм знову фіксувалися при $S_z = 0,25...0,39$ мм/зуб та найменшою v_c . Водночас при середніх і високих v_c залежності були плавними й практично позбавлені локальних піків, що свідчить про зменшення впливу динамічних деформацій на процес чистового різання.

Найбільш помітний ефект удосконаленої конструкції проявився на ділянці виходу РЕ з матеріалу (рис. 7, в). Для рухомого чистового РЕ при малих $S_z = 0,0156...0,039$ мм/зуб значення R_a не перевищували $0,7-1,6$ мкм, тобто були цілком співставними з показниками на ділянці врізання та в центрі. За середніх подач $S_z = 0,063...0,156$ мм/зуб значення R_a зростали до $2,2-3,2$ мкм. Лише за поєднання найвищих $S_z = 0,25...0,39$ мм/зуб й мінімальної v_c параметр R_a досягав $4,8$ мкм. Важливо, що рівень R_a на виході практично не відрізнявся від значень у центрі і на ділянці врізання – зникла характерна «найгірша зона», притаманна фрезеруванню без ізолюваного чистового РЕ.

Отримані значення відхилення від площинності в залежності від v_c та S_z із однією ступеню, з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та рухомим чистовим РЕ з пружним контактом відносно нерухомого копіра, наведені на (рис. 8.), для ступені з рухомим чистовим РЕ становлять від $0,003$ до $0,045$ мм на площині шириною 160 мм. Мінімальні значення спостерігаються при малих подачах на зуб S_z від $0,0156$ мм/зуб до $0,039$ мм/зуб у поєднанні з підвищеними швидкостями різання v_c від $10,4$ м/с до $26,4$ м/с, де відхилення не перевищують від $0,003$ до $0,014$ мм. Це свідчить про високу жорсткість та стабільність положення рухомого чистового РЕ відносно оброблюваної поверхні навіть за умов силового навантаження на чорнових РЕ. Із збільшенням подачі на зуб S_z від $0,063$ мм/зуб до $0,156$ мм/зуб відхилення від площинності закономірно зростають від $0,015$ до $0,03$ мм. Для середніх і високих швидкостей різання v_c від $6,6$ м/с до $16,5$ м/с відхилення змінюються в досить вузькому діапазоні, без різких піків, тоді як при найменших швидкостях різання v_c від $2,6$ до $4,1$ м/с та великих подачах на зуб S_z фіксуються дещо більші значення. Це пояснюється тим, що за підвищених подачах на зуб S_z , особливо при малих швидкостях різання v_c , зростають величини P_x та P_y , а отже – пружні деформації елементів ТС, завдяки ізоляції рухомого чистового РЕ деформації лише частково впливають на його положення, а перехід до середніх та високих v_c дозволяє утримувати відхилення від площинності на рівні, що не перевищує $3-20$ мкм. Це свідчить про те, що пружний контакт РЕ з копіром ізолює значну частину пружних деформацій від дії сил різання чорнових РЕ і забезпечує більш стабільне формоутворення макрогеометрії поверхні на заключній стадії обробки.

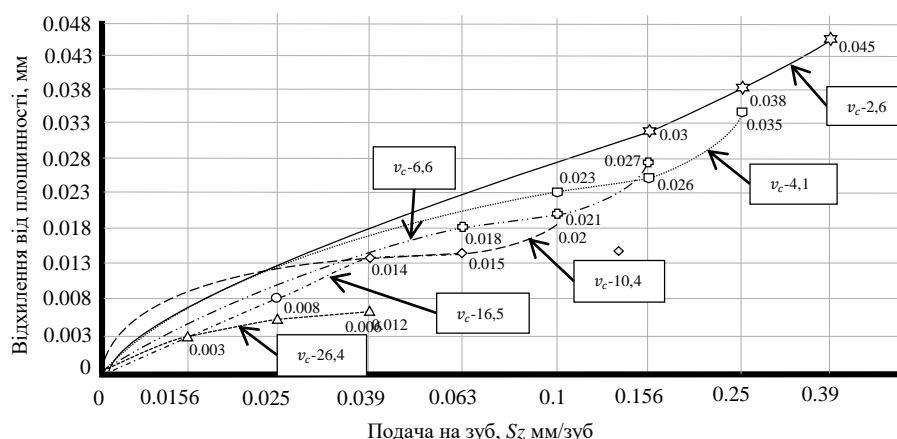


Рис. 8. Відхилення від площинності в залежності від v_c та S_z з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та рухомим чистовим РЕ з пружним контактом відносно копіра.

Таким чином, мінімізація відхилень від площинності досягається шляхом раціонального поєднання високої швидкості різання та використання рухомого чистового РЕ з пружним контактом відносно

нерухомого копіра. Отримані результати підтверджують ефективність застосування запропонованої фрези для високоточних операцій, де важливими характеристиками є стабільність мікро- та макрогеометрії обробленої поверхні, зокрема у виробництві деталей з високими вимогами до площинності.

Висновки. Здійснено порівняльний аналіз двох варіантів конструкції спірально-ступінчастої фрези: з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та чистовим РЕ та з нерухомо закріпленими у корпусі фрези чорновими та рухомим чистовим РЕ з контактом відносно нерухомого копіра. У випадку з застосуванням рухомого РЕ з контактом відносно нерухомого копіра досягнуто суттєвого покращення мікро- та макрогеометрії плоскої поверхні. Параметр шорсткості знижується з $R_a = 15\text{--}20$ мкм до $R_a \leq 4,5\text{--}5$ мкм, а при подачах $S_z \leq 0,063\text{--}0,1$ мм/зуб стабільно досягається $R_a = 0,7\text{--}1,6$ мкм, що відповідає вимогам фінішного фрезерування. Це свідчить про високу ефективність запропонованої конструкції у забезпеченні стабільного положення різальної частини рухомого чистового РЕ у процесі обробки незалежно від змін навантаження на чорнових РЕ, що забезпечує кращу мікро- та макрогеометрію плоскої поверхні і повторюваність результатів.

Встановлено, що збільшення подачі на зуб S_z супроводжується майже лінійним зростанням шорсткості R_a , тоді як швидкість різання v_c має другорядний вплив. Водночас рівномірність показників у зонах різання, по центру та на виході РЕ характеризується стабільністю положення рухомим чистовим РЕ з контактом відносно нерухомого копіра та зменшення впливу коливань ТС.

Застосування рухомим чистовим РЕ з контактом відносно нерухомого копіра, супроводжується зниженням і стабілізацією складових сили різання P_x , P_y , P_z , порівняно з жорстко закріпленим чистовим РЕ у корпусі фрези. Для жорстко закріпленого чистового РЕ спостерігається значна зміна сил різання при переході від середніх до високих швидкостей, що відображає вплив динаміки ТС. У випадку з рухомим чистовим РЕ з контактом відносно нерухомого копіра, розкид значень істотно зменшується, а характер залежності визначається переважно подачею S_z .

Запропонована конструктивна схема забезпечує відокремлення чистового етапу формоутворення від силового впливу чорнових РЕ, зниження та стабілізацію складових сил різання, отримання кращої мікро- та макрогеометрії плоскої поверхні без зміни основних режимів різання. 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:

1. *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.
2. *Kundrak J.* 3D roughness parameters of surfaces face milled by special tools / *J.Kundrak, C.Felhó*. – 2020.
3. Towards an Automatic-optimized tool selection for milling process, based on data from Sandvik Coromant / *H.Zarkti, A.El Mesbahi, A.Rechia, O.Jaider* // In Xeme Conference Internationale: Conception et Production Intégrées, 2015.
4. Performance of whisker-reinforced ceramic tools in milling nickel-based superalloy / *M.A. El-Bestawi, T.I. El-Wardany, D.Yan, M.Tan* // CIRP annals. – 1993. – Vol. 42, Issue 1. – P. 99–102.
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 Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – № 3. – С. 164–172.
6. High-definition metrology enabled surface variation control by cutting load balancing / *H.T. Nguyen and other* // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2016. – № 138 (2).
7. *Nguyen H.T.* High-definition metrology enabled surface variation control by reducing cutter-spindle deflection / *H.T. Nguyen, H.Wang, S.J. Hu* // International Manufacturing Science and Engineering Conference. – American Society of Mechanical Engineers, 2014. – Vol. 45806.
8. *Nguyen H.T.* Characterization of cutting force induced surface shape variation in face milling using high-definition metrology / *H.T. Nguyen, H.Wang, S.J.Hu* // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2013. – № 135 (4).
9. *Andersson C.* Experimental studies of cutting force variation in face milling / *C.Andersson, M.Andersson, J.E. Ståhl* // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2011. – Vol. 51, Issue 1. – P. 67–76.
10. High Speed Face Milling Cutters Dynamic Response with Deformation / *F.C. Tao, G.C. Chen, B.Jiang and other* // Advanced Materials Research. – 2012. – P. 186–191.
11. 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.
12. *Кушніров П.В.* Агрегатні головки для фрезерування широких плоских поверхонь / *П.В. Кушніров, Н.В. Захаров* // Стіна. – 1996. – № 2. – С. 29–31.
13. *Кушніров П.В.* Обробка площин торцевою фрезою: нові варіанти / *П.В. Кушніров* // Обладнання та інструмент для професіоналів. – 2004. – № 4 (51). – С. 4–5.
14. *Виговський Г.М.* Підвищення працездатності торцевих фрез для чистової обробки плоских поверхонь / *Г.М. Виговський, О.А. Громовий, В.В. Серов* // Вісник ЖІТІ. Технічні науки. – 2001. – С. 23–26.

15. Виговський Г.М. Процес різання торцевими ступінчастими фрезами з косокутною геометрією різальних частин, що оснащені надтвердими матеріалами / Г.М. Виговський, П.П. Мельничук // Вісник ЖІТІ. – 1998. – № 7. – С. 73–81.
16. 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). – С. 53–58. DOI: 10.26642/tn-2019-1(83)-53-58.
17. Виговський Г.М. Аналіз впливу схем розташування формуютьорюючих різальних елементів на процеси деформації торцевих ступінчастих фрез / Г.М. Виговський, О.А. Громовий, М.М. Плисак // Технічна інженерія. – 2023. – № 1 (91). – С. 42–49. DOI: 10.26642/ten-2023-1(91)-42-49.
18. Виговський Г.М. Дослідження впливу сил різання при чистовому торцевому фрезеруванні на процеси формотворення 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.
19. Пат. 158589 Україна Торцева ступінчаста фреза / Г.М. Виговський, Н.О. Балицька, Л.С. Глембоцька та інші ; заявл. 01.07.2024 ; опубл. 26.02.2025.
20. Удосконалення конструкції торцевої ступінчастої фрези для фінішної обробки плоских поверхонь деталей / Г.М. Виговський, М.М. Плисак, Л.С. Глембоцька, А.В. Голубовський // Технічна інженерія. – 2024. – № 1 (93). – С. 45–51. DOI: 10.26642/ten-2024-1(93)-45-51.
21. Виговський Г.М. Дослідження торцевої ступінчастої фрези при фінішній обробці плоских поверхонь / Г.М. Виговський, М.М. Плисак, Ю.О. Коваль // Технічна інженерія. – 2025. – № 1 (95). – С. 45–58. DOI: 10.26642/ten-2025-1(95)-45-58.

References:

1. Vyhovskiy, H.M. (2000), *Pidvyshchennia pratsezdatsnosti tortsevykh frez dlia chystovoi obrobky ploskykh poverkhon*, Abstract of Ph.D. dissertation 05.03.01 Protsezy mekhanichnoi obrobky, verstaty ta instrumenty, K., 16 p.
2. Kundrak, J. and Felhó, C. (2020), «3D roughness parameters of surfaces face milled by special tools».
3. Zarkti, H., El Mesbahi, A., Rechia, A. and Jaider, O. (2015), «Towards an Automatic-optimized tool selection for milling process, based on data from Sandvik Coromant», *Conception et Production Intégrées*, In Xeme Conference Internationale.
4. El-Bestawi, M.A., El-Wardany, T.I., Yan, D. and Tan, M. (1993), «Performance of whisker-reinforced ceramic tools in milling nickel-based superalloy», *CIRP annals*, Vol. 42, Issue 1, pp. 99–102.
5. Melnychuk, P.P. and Loiev, V.Yu. (2014), «Teoretyko-tekhnologichne 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.
6. Nguyen, H.T. et al. (2016), «High-definition metrology enabled surface variation control by cutting load balancing», *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, No. 138 (2).
7. Nguyen, H.T., Wang, H. and Hu, S.J. (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.
8. Nguyen, H.T., Wang, H. and Hu, S.J. (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).
9. Andersson, C., Andersson, M. and Ståhl, J.E. (2011), «Experimental studies of cutting force variation in face milling», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 51, Issue 1, pp. 67–76.
10. Tao, F.C., Chen, G.C., Jiang, B. et al. (2012), «High Speed Face Milling Cutters Dynamic Response with Deformation», *Advanced Materials Research*, pp. 186–191.
11. 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.
12. Kushnirov, P.V. and Zakharov, N.V. (1996), «Ahrehatni holovky dlia frezeruvannia shyrokykh ploskykh poverkhon», *Stina*, No. 2, pp. 29–31.
13. Kushnirov, P.V. (2004), «Obrobka ploschyn tortsevoiu frezoiu: novi varianty», *Obladnannia ta instrument dlia profesionaliv*, No. 4 (51), pp. 4–5.
14. Vyhovskiy, H.M., Hromovyi, O.A. and Serov, V.V. (2001), «Pidvyshchennia pratsezdatsnosti tortsevykh frez dlia chystovoi obrobky ploskykh poverkhon», *Visnyk ZhITI. Tekhnichninauky*, pp. 23–26.
15. Vyhovskiy, H.M. and Melnychuk, P.P. (1998), «Protsezy rizannia tortsevymy stupinchatymy frezamy z kosokutnoiu heometriieiu rizalnykh chastyn, shcho osnashcheni nadtverdymy materialamy», *Visnyk ZhITI*, No. 7, pp. 73–81.
16. Vyhovskiy, H.M. and Plysak, M.M. (2019), «Doslidzhennia napruzheno-deformovanoho stanu tortsevoi frezy dlia chystovoi obrobky ploschyn», *Visnyk ZhDTU. Ser. Tekhnichni nauky*, No. 1 (83), pp. 53–58, doi: 10.26642/tn-2019-1(83)-53-58.
17. Vyhovskiy, H.M., Hromovyi, O.A. and Plysak, M.M. (2023), «Analiz vplyvu skhem roztashuvannia formoutvoriuyuchykh rizalnykh elementiv na protsezy deformatsii tortsevykh stupinchastykh frez», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (91), pp. 42–49, doi: 10.26642/ten-2023-1(91)-42-49.
18. Vyhovskiy, H.M., Hromovyi, O.A. and Plysak, M.M. (2023), «Doslidzhennia vplyvu syl rizannia pry chystovomu tortsevomu frezeruvanni na protsezy formoutvorennya obrobliuvanykh poverkhon», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (92), pp. 53–59, doi: 10.26642/ten-2023-2(92)-53-59.
19. Vyhovskiy, H.M., Balytska, N.O., Hlembotska, L.Ye. et al., *Tortseva stupinchasta fresa*, Pat. 158589 Ukraina, zaiavl. 01.07.2024, opubl. 26.02.2025.

20. Vyhovskiy, H.M., Plysak, M.M., Hlembotska, L.Ye. and Holubovskiy, A.V. (2024), «Udoskonalennia konstrukttsii 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.
21. Vyhovskiy, H.M., Plysak, M.M. and Koval, Yu.O. (2025), «Doslidzhennia tortsevoi stupinchastoi frezy pry finishnii obrobtsi ploskykh poverkhon», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (95), pp. 45–58, doi: 10.26642/ten-2025-1(95)-45-58.

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.

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.

Радкевич Світлана Іванівна – PhD, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

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

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проектування різальних інструментів.

Vyhovskiy H.M., Plysak M.M., Radkevych S.I.

Research on an improved design of a face step milling cutter for enhancing the micro- and macro-geometry of flat surfaces

The article presents the results of an experimental study of the influence of cutting force components on the micro- and macro-geometry of the machined flat surface during finish face milling of grey cast iron GCI21 (similar to EN-GJL-200) using a developed face step milling cutter. Particular attention is paid to the analysis of cutting forces, surface roughness, and flatness deviations of the machined surfaces depending on the machining parameters, namely cutting speed and feed per tooth. A comparison of the results obtained using cutting elements (CE) rigidly fixed relative to the cutter body and the use of a movable finishing CE with elastic contact relative to a stationary cam was carried out. It was established that with an increase in feed per tooth, all components of the cutting force increase, which leads to a deterioration of surface roughness and an increase in flatness deviation. At the same time, increasing the cutting speed up to $V = 26.4$ m/s results in a decrease in cutting forces and an improvement in the micro- and macro-geometry of the machined flat surface. The proposed cutter design with a finishing CE movable in the axial direction and elastically contacting a stationary cam makes it possible to compensate for elastic deformations of the technological system (TS) and reduce machining errors. The obtained results can be used for optimizing the design of face milling cutters and machining parameters in order to improve the micro- and macro-geometry of flat surfaces during finish face milling.

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

Стаття надійшла до редакції 09.01.2026.