

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

Державний університет «Житомирська політехніка»

### Дослідження впливу сил різання при чистовому торцевому фрезеруванні на процеси формоутворення оброблюваних поверхонь

*Широке впровадження процесів чистового торцевого фрезерування замість процесів абразивної обробки пояснюється їх високою продуктивністю та можливістю забезпечення оброблюваних поверхонь малої шорсткості з необхідним мікрорельєфом. Разом з тим для процесів ступінчастого торцевого фрезерування, на відміну від звичайних процесів фрезерування, є можливість забезпечення необхідної геометрії різального елемента, який формує оброблену поверхню. При цьому особливу увагу необхідно приділяти питанням стабілізації положення формоутворюючого різального елемента і впливу сил різання на пружний відтиск інструменту. В роботі авторами розглянуто процес торцевого ступінчастого фрезерування однозубою та багатозубою торцевою ступінчастою фрезою. В результаті проведених досліджень встановлено вплив сил різання чорнових різальних елементів на зміну положення формоутворюючого різального елемента, що впливає на розмірні характеристики оброблюваних поверхонь. Запропоновано удосконалення конструкції ступінчастої торцевої фрези для зменшення деформацій інструменту та похибок обробки плоских поверхонь. Результати дослідження підтверджують доцільність подальшого пошуку резервів покращення якості обробки шляхом розробки нових конструкцій фрез, які б забезпечували необхідні показники мікрогеометрії оброблених поверхонь.*

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

**Постановка проблеми.** Сучасне машинобудування висуває все більш високі вимоги до якості виготовлених деталей та їх точності. В процесі експлуатації машин певна чистота поверхонь контактуючих деталей утворюється після їх припрацювання, незалежно від точності їх обробки. При цьому дійсна площа контакту, через яку передається тиск від однієї деталі до іншої, становить малу частину від номінально обмеженої розмірами контактуючих поверхонь. Це призводить до контактних деформацій поверхневих шарів деталей, що в свою чергу визначає їх експлуатаційні властивості (зносостійкість, контактну жорсткість тощо). Враховуючи, що при фінішній обробці видаляється припуск незначної величини, продуктивність процесу характеризується площею поверхні деталі, обробленої в одиницю часу. Особливо така характеристика має значення для виготовлення великогабаритних деталей, коли на процес обробки витрачається значний час. Продуктивність процесу обробки та досягнення необхідних параметрів стану поверхневого шару виробів залежить від режимів різання та застосування різального інструменту оптимальної конструкції для кожного конкретного випадку обробки.

Під час фінішної обробки великогабаритних деталей проблема підвищення продуктивності є особливо гострою. Для забезпечення ефективності процесу необхідно застосовувати подачі не менше за 0,6 мм/об, а шорсткість обробленої поверхні деталей має становити  $Ra = 0,32-1,25$  мкм. Якщо йдеться про обробку таких матеріалів, як загартовані сталі, сірий чавун, то її слід проводити із застосуванням різального інструменту, оснащеного надтвердими матеріалами (НТМ), тому що у цих умовах вони мають найбільшу працездатність порівняно з інструментами, що оснащені традиційними матеріалами [1, 2]. Такий спосіб фінішної обробки має низку переваг по відношенню до шліфування, недоліком якого є висока теплова напруженість у зв'язку з інтенсивним тертям абразивних зерен у зонах контакту. Це призводить до появи на оброблюваних поверхнях припикань, мікротріщин та інших температурних дефектів, усунути які не завжди вдається наступним абразивним або алмазним доведенням [3]. Разом з тим під час торцевого фрезерування на якість обробки деталей значною мірою впливає жорсткість технологічної системи. Пружні відтиски в системі: верстат; пристосування; деталь; інструмент викликають похибки у розмірах та формі деталей, що досягають у ряді випадків до 80 % від загальних похибок обробки [4–12].

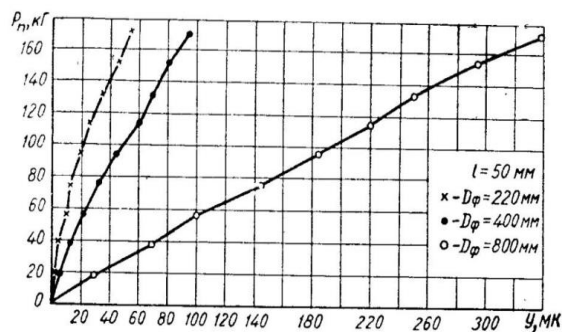


Рис. 1. Діаграма жорсткості корпусу торцевих фрез залежно від діаметра [13]

Так дослідженнями торцевих фрез однакової товщини – 80 мм [13] та діаметрами – 220, 400 та 800 мм було встановлено, що у всій технологічній системі найбільші похибки оброблюваної поверхні заготовок виникають у зв'язку з деформаціями корпусів фрез. Зі збільшенням діаметра корпусу фрези, а отже, і згинального моменту відносно осі фрези, пружні відтиски фрези від заготовки значно збільшуються (рис. 1). Отже зі збільшенням діаметра фрези значення відхилення від площинності будуть зростати та негативно позначатися на якості оброблюваних поверхонь заготовок [13]. Дослідження з виконанням нахилу шпинделя на повздовжньо-фрезерному верстаті з торцевими фрезами діаметром 220, 400 та 800 мм підтвердили, що фактичне відхилення від площинності зростає зі збільшенням діаметрів фрез.

При торцевому фрезеруванні фрезою діаметром 400 мм заготовок шириною, більшою за діаметр фрези, за кілька проходів на обробленій поверхні залишалися характерні переходи. Величини сходинок та висоту мікронерівностей вимірювали після двох проходів, як на основній поверхні, так і в місці переходу між двома обробленими площинами. Результати досліджень показали, що зі збільшенням глибини різання та подачі величина сходинок зростає – це пояснюється зростанням зусиль різання, внаслідок чого збільшуються пружні відтиски фрези від заготовки та зменшується точність обробки. При збільшенні вильоту шпинделя величина сходинок зростала незначно, тоді як зі збільшенням діаметра фрези розмір сходинок різко зростав [14].

Для вибору конкретного технічного рішення, що забезпечує підвищення продуктивності фінішної обробки без погіршення якості обробленої поверхні, необхідно визначити особливості контактної взаємодії в зоні різання формують ризальних елементів, які визначають величину мікро- та макронерівностей оброблених поверхонь деталей.

**Мета** – дослідити вплив осьових складових сили різання  $P_Y$  при однозубому та багатозубому фрезеруванні торцевими ступінчастими фрезами, що оснащені НТМ, на характер пружних відтисків формують ризального елемента фрез в напрямі нормальному до оброблюваної поверхні заготовки.

**Постановка завдання.** Умови моделювання: косокутне торцеве фрезерування сірого чавуну СЧ21 (170НВ) та вуглецевої сталі У8 (46HRC) однозубою і багатозубою ступінчастою фрезою діаметром 360 мм. Багатозуба фреза оснащена 24 ризальними елементами з використанням спіральноступінчастого розташування. Інструментальний матеріал – гексаніт-Р. Значення складових сил різання (тангенційна –  $P_Z$ , осьова –  $P_X$ , радіальна –  $P_Y$ ) були виміряні під час експериментальних досліджень однозубою торцевою фрезою та виконаного порівняльного комп'ютерного моделювання [1, 15]. Отримані значення сил різання  $P_Z$ ,  $P_X$ ,  $P_Y$  були використані для проведення розрахунку з використанням програмного забезпечення *Ansys*. Найбільше на точність обробки впливають пружний відтиск формують ризального елемента в напрямі нормальному до оброблюваної поверхні заготовки. Тому доцільно розглянути переміщення у напрямку дії радіальної складової сили різання  $P_Y$ .

Встановлено, що залежно від зміни радіальної складової сили різання  $P_Y$ , збільшується пружний відтиск формують ризального елемента від оброблюваної поверхні заготовки, що вимірюється по нормалі до неї (рис. 2).

За ступінчастого торцевого фрезерування кожен із чорнових ризальних елементів має зняти свій припуск та залишити стабільний припуск для формують ризального елемента, який розташований на найменшому радіусі відносно осі фрези та з найбільшим осьовим вильотом відносно корпусу фрези.

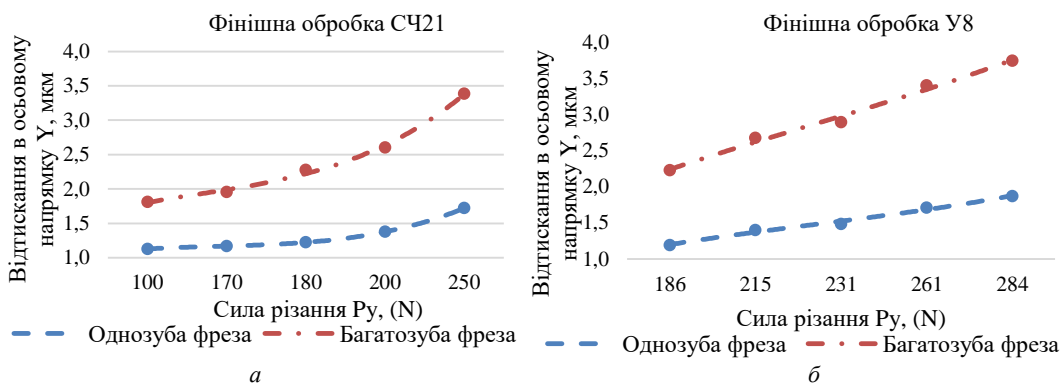


Рис. 2. Розраховані пружні відтиски формоутворюючого різального елемента від оброблюваної поверхні заготовки при фінішному торцевому фрезеруванні однозубою та багатозубою фрезою: а) сірого чавуну СЧ21; б) вуглецевої сталі У8

З отриманих результатів (рис. 2) видно, що пружні відтиски формоутворюючих різальних елементів однозубими і багатозубими фрезами залежать від зміни радіальних складових сил різання  $P_y$ , які змінюються від режимів обробки, геометрії різального інструменту, зносу тощо. При фрезеруванні багатозубою фрезою залежно від зміни сили різання  $P_y$  на попередніх п'яти чорнових різальних елементах сумарна сила буде викликати переміщення формоутворюючого різального елемента відносно оброблюваної поверхні заготовки, а отже не буде забезпечуватися його стабільне положення і, як результат, – зменшення точності обробки та збільшення відхилення від площинності оброблюваної поверхні.

Одним зі шляхів зменшення впливу  $P_y$  на пружний відтиск формоутворюючого різального елемента від оброблюваної поверхні заготовки є його відокремлення від попередніх чорнових різальних елементів, які беруть участь у різанні.

Відокремлення чистового різального елемента від чорнових може бути здійснено за рахунок виконання наскрізних пазів у корпусі фрези дисковими фрезами, що дозволяє виключити процес деформації пружного прямокутного сектора, в якому розміщений формоутворюючий різальний елемент, під дією радіальних сил, які виникають на чорнових різальних елементах. Довжина наскрізних пазів у корпусі фрези сектора з чистовим різальним елементом обиралася за конструктивними параметрами фрези в діапазоні 50–70 мм, а ширина сектора – 50 мм [16]. Після проведення розрахунку з відокремленням шостого формоутворюючого різального елемента від попередніх п'яти чорнових були отримані результати його пружних відтисків від оброблюваної поверхні заготовки (рис. 3).

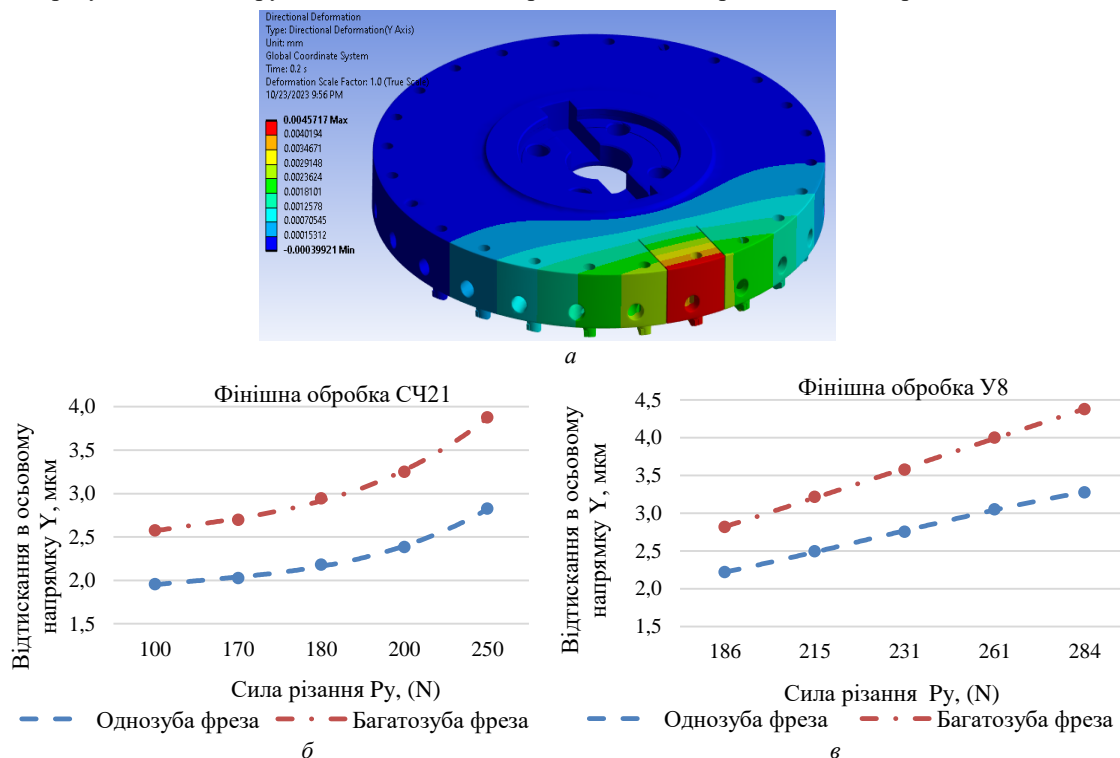


Рис. 3. Пружні відтиски формоутворюючого різального елемента від оброблюваної поверхні заготовки з довжиною наскрізних пазів у корпусі фрези 50 мм: а) деформація корпусу фрези; б) обробка сірого чавуну СЧ21; в) обробка вуглецевої сталі У8

Після відокремлення формуючого різального елемента від чорнових з довжиною наскрізних пазів в корпусі фрези 50 мм було встановлено, що пружні відтиски від оброблюваної поверхні заготовки збільшилися на 0,5 мкм за рахунок зменшення жорсткості місця розташування формуючого різального елемента у корпусі фрези (рис. 3). При збільшенні довжини наскрізних пазів у корпусі фрези до 70 мм сектора з чистовим різальним елементом встановлені величини пружного відтиску від оброблюваної поверхні заготовки формуючого різального елемента залежно від зміни сили різання  $P_Y$  для однозубої та багатозубої фрези (рис. 4).

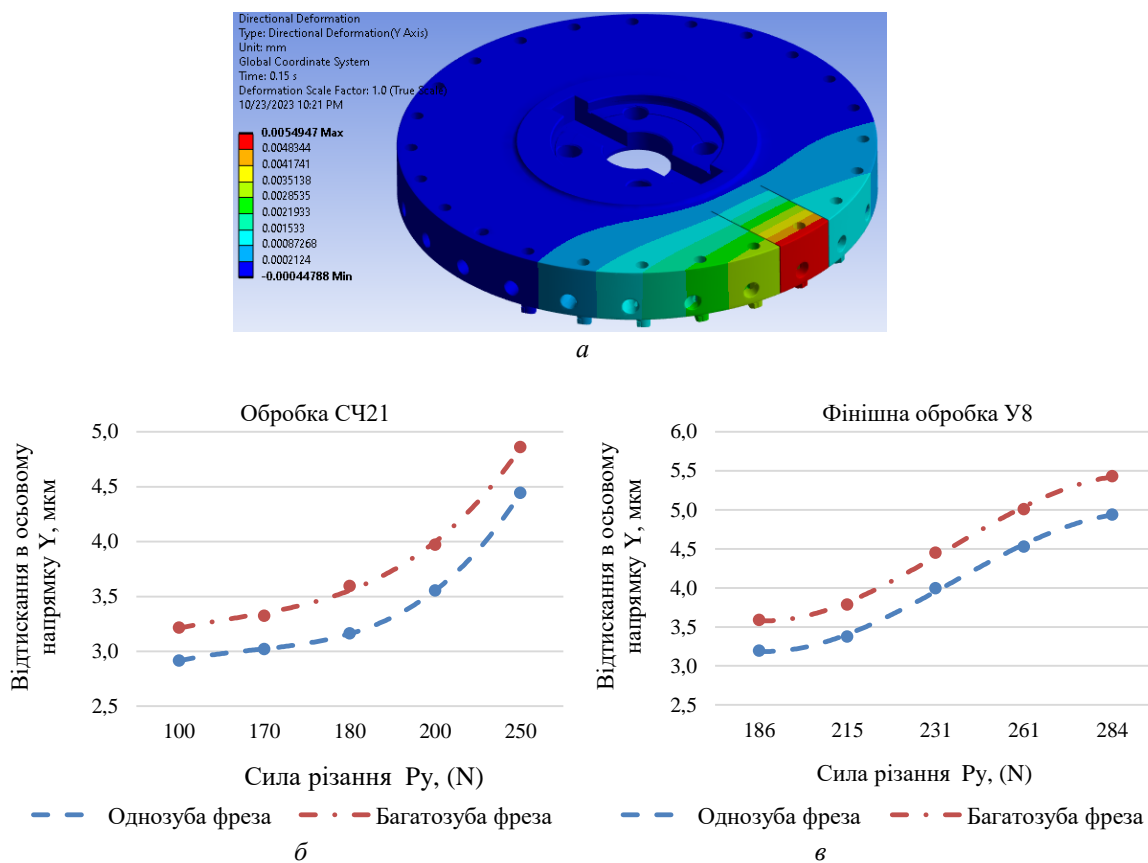


Рис. 4. Розраховані пружні відтиски формуючого різального елемента від оброблюваної поверхні заготовки з довжиною наскрізних пазів у корпусі фрези 70 мм: а – деформація корпусу фрези; б – обробка сірого чавуну СЧ21; в – обробка вуглецевої сталі У8

Отримані результати комп'ютерного моделювання показують, що збільшення довжини наскрізних пазів сектора з чистовим різальним елементом до 70 мм при фрезеруванні СЧ21 збільшує пружний відтиск чистового різального елемента для однозубої фрези до 4,5 мкм і багатозубої фрези до 5 мкм, а при фрезеруванні У8 відповідно до 4,9 мкм і багатозубої фрези до 5,5 мкм, що пов'язано зі зменшенням жорсткості місця розташування формуючого різального елемента у корпусі фрези через виконання розрізу. Виконання розрізу дає змогу зменшити вплив сили різання  $P_Y$ , яка виникає на попередніх п'яти чорнових різальних елементах та змінює величину пружного відтиску формуючого різального елемента від оброблюваної поверхні заготовки.

Аналіз графіків, наведених на рисунку 4–5 показують, що різниця пружних відтисків формуючого різального елемента для однозубих та багатозубих фрез пояснюється впливом сил різання, які виникають під час різання чорновими різальними елементами на пружний відтиск формуючого елемента. Якщо розглядати відтискання формуючого різального елемента від оброблюваної поверхні заготовки при фрезеруванні однозубою та багатозубою фрезою з суцільним корпусом, то різниця між пружним відтиском формуючого є суттєвою, що пояснюється значним впливом сил різання  $P_Y$ , яка виникає на попередніх п'яти чорнових різальних елементах та призводить до пружного відтискання формуючого різального елемента від оброблюваної поверхні заготовки (табл. 1).

Під час виконання відокремлення формуючого різального елемента від п'яти чорнових пружним сектором з довжиною наскрізних пазів сектора з чистовим різальним елементом від 50 до 70 мм відбувається зменшення різниці між відтиском формуючого різального елемента однозубої та багатозубої фрези, а отже зменшення впливу сил різання чорнових різальних елементів.

Таблиця 1

Розрахована різниця між отриманими значеннями відтискання формоутворюючого різального елемента від поверхні заготовки при однозубому та багатозубому фрезеруванні

Оброблюваний матеріал									
СЧ21					У8				
Сила різання $P_Y$ (N)					Сила різання $P_Y$ (N)				
100	170	180	200	250	186	215	231	261	284
Суцільна фреза					Суцільна фреза				
0.68 мкм	0.78 мкм	1.05 мкм	1.22 мкм	1.66 мкм	1.03 мкм	1.27 мкм	1.41 мкм	1.69 мкм	1.87 мкм
Довжина наскрізних пазів в корпусі фрези 50 мм					Довжина наскрізних пазів в корпусі фрези 50 мм				
0.62 мкм	0.67 мкм	0.76 мкм	0.87 мкм	1.05 мкм	0.60 мкм	0.72 мкм	0.82 мкм	0.95 мкм	1.10 мкм
Довжина наскрізних пазів в корпусі фрези 70 мм					Довжина наскрізних пазів в корпусі фрези 50 мм				
0.30 мкм	0.30 мкм	0.32 мкм	0.33 мкм	0.38 мкм	0.39 мкм	0.41 мкм	0.45 мкм	0.48 мкм	0.49 мкм

Аналіз виконаних розрахунків показує, що вплив сили різання  $P_Y$ , яка виникає на попередніх чорнових різальних елементах, призводить до пружного відтиску формоутворюючого різального елемента від поверхні заготовки залежно від значення складової сил різання  $P_Y$ . При багатоступінчастому фрезеруванні відокремлення формоутворюючого різального елемента значно зменшує вплив сили різання  $P_Y$  від різання чорновими різальними на пружний відтиск формоутворюючого різального елемента від оброблюваної поверхні заготовки, а отже є можливість забезпечення стабільного зняття припуску формоутворюючим різальним елементом шляхом розробки нової конструкції торцевої ступінчастої фрези з можливістю безпосереднього контакту пружного сектора з чистовим різальним елементом відносно шпинделя верстата, що дозволить ізолювати чистовий різальний елемент від підвищених деформацій корпусу фрези.

#### Висновки.

1. Встановлено, що при фінішному косокутному фрезеруванні сірого чавуну СЧ21 та вуглецевої сталі У8 ступінчастою фрезою із суцільним корпусом значно впливає сила різання чорновими різальними елементами на пружний відтиск формоутворюючого різального елемента, що негативно позначається на якості обробки.

2. Виконання сектора, в якому розміщений чистовий різальний елемент, дозволяє ізолювати його від підвищених деформацій корпусу фрези за рахунок збільшених сил різання, які виникають під час різання чорновими різальними елементами.

3. Положення формоутворюючого різального елемента значною мірою залежить від пружних характеристик пружного сектора, в якому розміщений чистовий різальний елемент.

4. При подальшому конструюванні чистових ступінчастих торцевих фрез перспективним є відокремлення чистового різального елемента від корпусу фрези в напрямі дії сил різання вздовж осі фрези та базування пружного сектора відносно шпинделя верстата, що дозволить стабілізувати положення чистового різального елемента та підвищити якість обробки, що буде розглянуто у подальших дослідженнях.

#### 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, верстата та інструменти / *Г.М. Виговський*. – К., 2000. – 16 с.
2. *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.
3. *Мельничук П.П.* Теоретико-технологічне обґрунтування можливостей обробки плоских поверхонь деталей торцевим лезовим інструментом, оснащеним надтвердими матеріалами, замість шліфування / *П.П. Мельничук, В.Ю. Лоев* // Вісник ХНУ. Сер. : Технічні науки. – 2014. – № 3. – С. 164–172.
4. *Zhenyu S.* Influence of dynamic effects on surface roughness for face milling process / *S.Zhenyu, L.Luning, L.Zhanqiang* // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – № 80. – P. 1823–1831.
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. Дослідження напружено-деформованого стану торцевої фрези для чистової обробки площин / Г.М. Виговський, М.М. Плисак // Вісник ЖДТУ. Серія : Технічні науки. – 2019. – № 1 (83). – С. 53–58. DOI: 10.26642/tn-2019-1(83)-53-58.
7. 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.
8. 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).
9. 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).
10. 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.
11. 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.
12. 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. Guzev, T.Mikolajczyk and other // Int J Adv Manuf Technol. – 2017. – № 92. – P. 4473–4486. DOI: 10.1007/s00170-017-0516-6.
13. Ісаєв А.І. Чистова обробка площин великогабаритних деталей / А.І. Ісаєв, В.Є. Коїре, З.Н. Зубовська. – Київ, 1962.
14. 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.
15. 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.
16. 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.

## References:

1. Vyhovskyi, H.M. (2000), *Pidvyshchennia pratsezdmatnosti tortsevykh frez dlia chystovoi obrobky ploskykh poverkhon*, Ph.D. Abstract of dissertation, 05.03.01 Protsezy mekhanichnoi obrobky, verstaty ta instrumenty, Kyiv, 16 p.
2. Vyhovskyi, H.M. and Melnychuk, P.P. (1998), «Protsezy rizannia tortsevymy stupinchatymy frezamy z kosokutnoiu heometriieiu rizalnykh chastyn, shcho osnashcheni nadtverdymy materialamy (NTM)», *Visnyk ZhITI*, No. 7, pp. 73–81.
3. Melnychuk, P.P. and Loiev, V.Iu. (2014), «Teoretyko-tekhnologichne obruntuvannia mozhyvostei obrobky ploskykh poverkhon detalei tortsevym lezovym instrumentom, osnashchenym nadtverdymy materialamy, zamist shlifuvannia», *Visnyk KhNU. Ser. Tekhnichni nauky*, No. 3, pp. 164–172.
4. Zhenyu, S., Luning, L. and Zhanqiang, L. (2015), «Influence of dynamic effects on surface roughness for face milling process», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No. 80, pp. 1823–1831.
5. Stepchyn, Ya.A. (2016), «Porivnjal'na harakterystyka dynamiky procesiv torcevoogo frezeruvannja frezamy standartnyh ta special'nyh konstrukcij», *Visnyk ZhDTU, Ser. Tekhnichni nauky*, No. 1 (72), pp. 51–56.
6. Vyhovskyi, H.M. and Plysak, M.M. (2019), «Doslidzhennia napruzhenno-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.
7. 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.
8. Nguyen, Hai Trong, Wang, Hui, Tai, Bruce L. and Ren, Jie (2016), «High-definition metrology enabled surface variation control by cutting load balancing», *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, No. 138 (2).
9. Nguyen, Hai Trong, Hui Wang and S. Jack Hu (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).
10. Nguyen, Hai Trong, Wang, Hui and Hu, S Jack (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.
11. Melnychuk, P.P., 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.

12. Pimenov, D.Y., Guzeev, V.I., Mikolajczyk, T. and other (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.
13. Isaiev, A.I., Koire, V.Ye. and Zubovska, Z.N. (1962), *Chystova obrobka ploshchyn velykohabarynykh detalei*, Kyiv.
14. 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.
15. 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.
16. Vyhovskiy, H.M., Hromoviy, O.A. and Plysak, M.M. (2023), «Analiz vplyvu skhem roztashuvannia formoutvoriuiuchykh rizalnykh elementiv na protsesy deformatsii tortsevykh stupinchastykh frez», *Tekhnichna inzheneriia*, Issue. 1 (91), pp. 42–49, doi:10.26642/ten-2023-1(91)-42-49.

**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.

**Vyhovskiy H.M., Gromovyy O.A., Plysak M.M.**

#### **The influence of cutting forces study during finishing step face milling on the treated surfaces shaping processes**

The wide implementation of finishing face milling processes instead of abrasive treatment processes is explained by their high productivity and the possibility of providing processed surfaces of low roughness with the necessary microrelief. At the same time, for stepped face milling processes, unlike conventional milling processes, it is possible to ensure the necessary geometry of the cutting element that forms the machined surface. At the same time, special attention should be paid to the issues of stabilizing the position of the forming cutting element and the effect of cutting forces on the elastic impression of the tool. In the work, the authors considered the process of face step milling with a single-tooth and multi-tooth face step milling cutter. As a result of the research, the influence of the cutting forces of the rough cutting elements on the change in the position of the forming cutting element, which affects the dimensional characteristics of the processed surfaces, was established. It is proposed to improve the design of the stepped face mill to reduce the deformations of the tool and reduce the processing errors of flat surfaces. The results of the study confirm the feasibility of the necessary search for reserves to improve the quality of processing, by developing new designs that would provide the necessary indicators of the microgeometry of the processed surfaces.

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

Стаття надійшла до редакції 20.10.2023