

## **Дослідження напружено-деформованого стану торцевої фрези для чистової обробки площин**

*За даними аналізу опублікованих робіт авторів, що досліджували процес фінішної обробки деталей торцевим фрезеруванням, встановлена доцільність використання процесів торцевого фрезерування для фінішного формування поверхневого шару деталей, що оброблюються. При цьому значні переваги мають технологічні процеси з використання торцевих фрез косокутного різання, оснащених надтвердими матеріалами, зі спірально-ступінчастим розташуванням різальних елементів. Разом з тим, нестаціонарність процесу різання, яка властива процесам торцевого фрезерування, призводить до змінних деформацій технологічної системи, що негативно впливає на якісні характеристики обробки. Виконані авторами дослідження напружено-деформованого стану торцевої фрези (одної зі складових технологічної системи) дозволила визначити процес деформації корпусу фрези, що призводить до зміни положення формоутворюючих різальних кромки, а це, у свою чергу, до зміни умов формоутворення оброблених поверхонь. Встановлені величини осьових переміщень формоутворюючих різальних ножів дозволяють прогнозувати якість оброблених поверхонь та розробити заходи з мінімізації деформацій інструмента в умовах нестаціонарного процесу торцевого фрезерування.*

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

**Постановка проблеми.** Виробництво металорізальних верстатів та іншого високоточного обладнання ставить високі вимоги до якості базових поверхонь. Для забезпечення необхідної жорсткості та зносостійкості з'єднань окремі деталі повинні мати мінімальні відхилення від площинності, необхідну шорсткість обробки та високі фізико-механічні властивості поверхневого шару.

Одержання деталей точних розмірів та форм передбачає використання високоточних, прогресивних фінішних операцій. В більшості випадків – це операції шліфування, недоліками яких є низька продуктивність та дефекти поверхневого шару у зв'язку із високотемпературними процесами різання. Останнім часом широкого розповсюдження знайшли методи процеси торцевого фрезерування інструментами, оснащеними надтвердими матеріалами (НТМ) [1–2]: обробка фрезами з НТМ характеризується високою продуктивністю, якісними характеристиками поверхневого шару тощо. Разом з тим, більшість конструкцій торцевих фрез використовують звичайну схему різання з розподілом припуску за подачею, що суттєво зменшує реальну кількість ножів, що беруть участь у різанні і погіршують динаміку процесу фрезерування. Значні переваги мають конструкції спірально-ступінчастих фрез косокутного різання з безвершинними різальними кромками, оснащеними НТМ, які мають значно більшу продуктивність обробки, високу зносостійкість та дозволяють отримувати поверхні малої шорсткості [3]. При цьому пошук прихованих резервів для процесів обробки спірально-ступінчастими фрезами косокутного різання, оснащеними НТМ, вимагає проведення додаткових досліджень процесів деформацій технологічної системи, що дозволить прогнозувати отримання необхідного макро– і мікропрофілю оброблених поверхонь та шляхи підвищення точності обробки.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У ряді досліджень [4–5] були розглянуті питання впливу режиму обробки та геометрії інструмента на якісні характеристики оброблених поверхонь. Разом з тим, в більшості випадків питання визначення оптимальних режимів різання та геометрії інструмента розглядалися для різних конструкцій різальних інструментів, які мали традиційну геометрію і не враховували особливості формування поверхневих шарів в умовах процесів чистового різання. Характерною особливістю яких є малі перетину шару, що зрізаються, та різання з товщинами зрізу, близькими до нуля, та радіусу округлення різальних кромки. Нераціональна геометрія різальних інструментів веде до зменшення продуктивності обробки та якості обробки.

У розроблених [6–7] торцевих фрезах застосовані такі технічні рішення:

- використана спірально-ступінчаста схема різання з розміщенням різальних елементів за логарифмічними спіралями;
- розроблена косокутна геометрія різальних елементів;
- запропонована безвершинна монотонна геометрія різальних кромки з радіусами при вершині 6–10 мм;
- удосконалені посадкові місця для підвищення точності базування інструмента на верстатах.

Спроекована гама торцевих [8] фрез діаметром від 125 до 500 мм, з використанням вище зазначених рішень, підтвердила високу продуктивність при обробці чавунів та загартованих деталей на вертикально- та продольно-фрезерних, горизонтально-розточних та верстатах з ЧПУ. Фрези запроваджені у виробництво для обробки деталей різних типів з високими вимогами до макро- та мікрогеометрії оброблених поверхонь.

Для підвищення якості обробки авторами [9] виконані теоретичні та експериментальні дослідження впливу похибок розташування торцевих фрез від точного геометричного положення на відхилення від площинності та шорсткості оброблених поверхонь, разом з тим, у дослідженнях не розглядалися питання деформацій інструмента (однієї із складових технологічної системи) під дією сил різання, що не дає можливість прогнозувати вихідні показники якості оброблених поверхонь.

**Мета дослідження.** Визначення напружено-деформованого стану спроекованої торцевої фрези з урахуванням сучасних вимог до скорочення термінів виконання проектно-конструкторських робіт та підвищення їх якості з застосування CAD/CAM/CAE – систем.

**Викладення основного матеріалу.** Як об'єкт дослідження було обрано збірну торцеву фрезу (рис. 1) діаметром 360 мм, призначену для напівчистої та чистої обробки за один прохід. Фреза оснащена 24 різальними елементами з використанням спірально-ступінчастого розташування. Закріплення та базування різальних елементів у корпусі фрези здійснюється клино-гвинтовим механізмом.

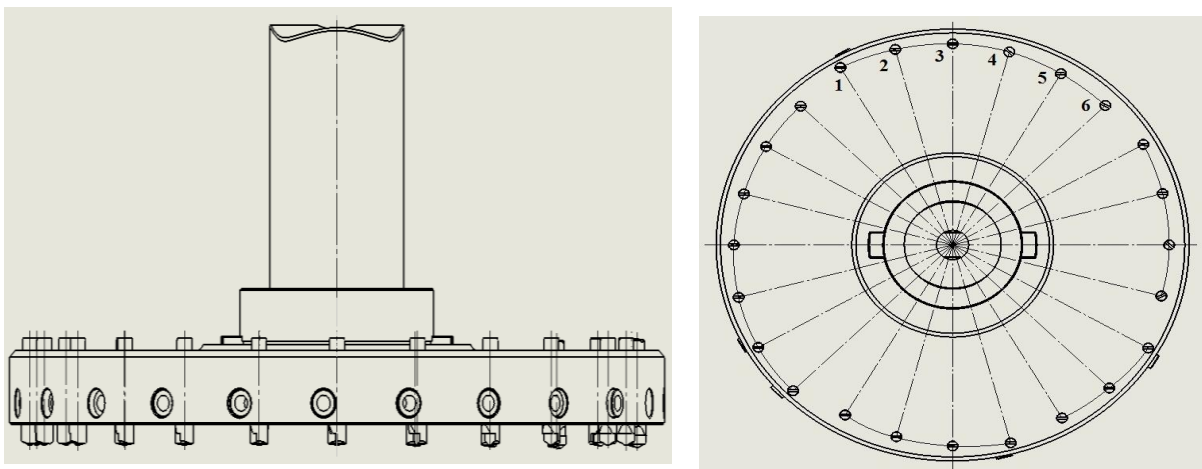


Рис. 1. Спірально-ступінчаста торцева фреза

На першому етапі досліджувався напружено-деформований стан торцевої фрези, враховуючи момент затягування клино-гвинтового механізму, який може змінюватися залежно від прикладеного зусилля затягування, що призводить до зміни деформованого стану в області розташування клино-гвинтового механізму та зміни положення різальних елементів.

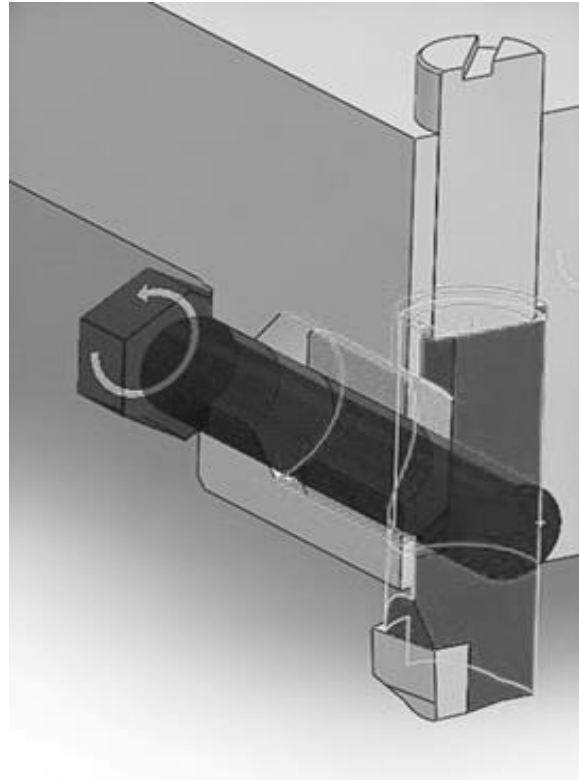
На другому етапі визначалися переміщення корпусу фрези та різальних елементів під дією сил затискання у з'єднанні клино-гвинтових механізмів з різальними елементами та сил різання, які виникають у процесі напівчистої обробки торцевою фрезою деталі із сірого чавуну СЧ21 (160–250 НВ) зі швидкістю різання  $V = 5$  м/с, глибиною різання  $t = 0,75$  мм, подачею  $S = 0,25$  мм/об. Розрахунки виконувалися для випадку участі у різанні різальних елементів 1–6 (рис. 1), розміщених у радіальному напрямі за спіраллю. Значення складових сили різання, що були виміряні під час експериментальних досліджень [4], представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

Значення складових сил різання для різальних елементів 1–6

№ різального елемента	Значення складових сил різання, Н		
	$P_y$	$P_z$	$P_x$
1	17,7	13,5	7,8
2	21,0	16,0	9,6
3	23,4	18,0	11,3
4	26,9	20,5	14,6
5	32,6	22,5	16,9
6	38,0	25,6	20,1'

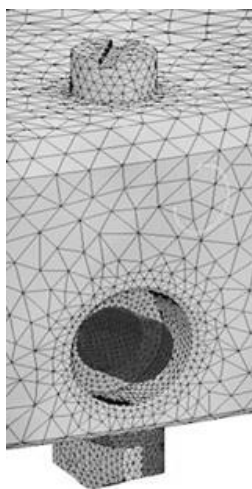
Для розрахунку клино-гвинтового механізму було використано «*Nonlinear Static Analysis*» в модулі *Simulation*. Особливості налаштування граничних умов наведені на (рис. 2, а). Було використано команду «*No Penetration*» (*Немає проникнення*) з підпунктом «*Surface to surface*» (*Поверхність с поверхністю*), а також враховувалося «*Friction*» (*Тертя*). Обмеження формувалися між: державкою та корпусом, клином і державкою, корпусом і клином, штифтом та державкою (рис. 2, б). Для імітації затягування було використано віртуальний з'єднувач «Болт» (рис. 2, б) враховуючи, крок різі, матеріал болта, клас міцності, крутний момент затягування.



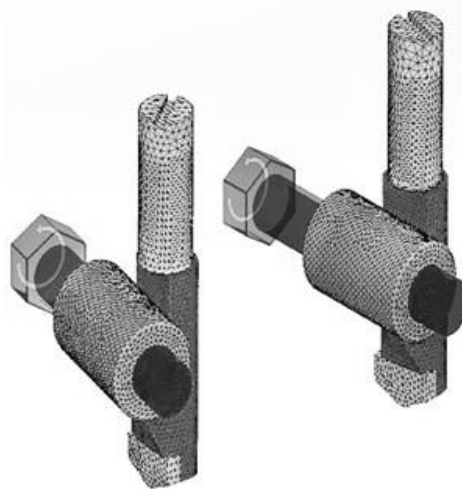
а) б)

Рис. 2. Встановлення граничних умов «*No Penetration*» (а), а також налаштування обмежень між компонентами (б)

За замовчуванням **SolidWorks Simulation** створює стандартну сітку середньої щільності на основі глобального розміру елемента, беручи до уваги її обсяг, площу поверхні та інші геометричні характеристики. Розмір створюваної сітки (кількість вузлів та елементів) залежить від геометрії та розмірів моделі, параметрів управління сіткою, налаштування граничних умов. Для отримання результатів з прийнятною точністю було використано ущільнену сітку (рис. 3) у зоні контакту клина з корпусом, державки з корпусом з використанням параметру «*Mesh Control*» *Управление сеткой*).



а)



б)

Рис. 3. Ущільнена сітка на зовнішніх (а) та внутрішніх (б) компонентах

Щільна сітка в області підвищує точність результатів, а також зменшує так звані помилки дискретизації [10–12] (рис. 3).

В результаті проведення розрахунку клино-гвинтового механізму були отримані числові значення переміщень різальних кромок фрези та корпусу у осьовому напрямку, які виникають після прикладення вказаних зусиль затягування болта. Оскільки найбільше на точність обробки впливає пружній відтиск різальних елементів від оброблюваної поверхні, що вимірюється по нормалі до неї, то доцільно розглянути переміщення різальних кромок у осьовому напрямку. Представлений графік переміщень різальних елементів та корпусу фрези в осьовому напрямку представлений на рисунку 4.

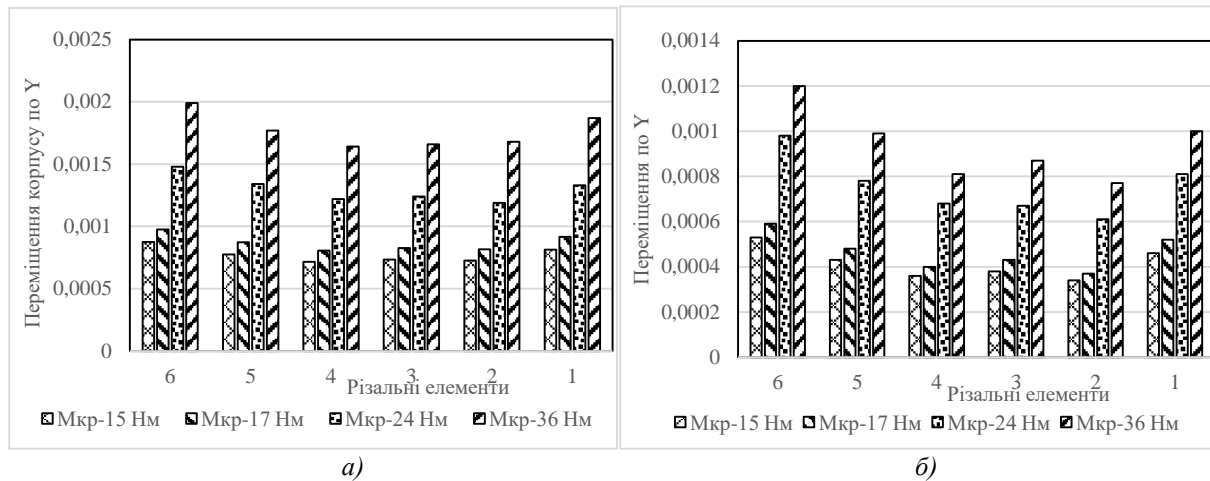


Рис. 4. Переміщення корпусу фрези (а) та різальних кромок (б) в осьовому  $Y$  напрямі

Аналізуючи переміщення (рис. 4), які виникають в результаті затягування клино-гвинтового механізму відповідно до норм затягування по ОСТ 37.001.031-72 і залежно від розмірів, класу з'єднання по ГОСТ 1759-70 [13, 14], для шостого різального елемента переміщення кромок в осьовому напрямку становлять: 0,00053 мм; 0,00059 мм; 0,00098 мм; 0,0012 мм. Деформація корпусу фрези становить: 0,00087 мм; 0,00097 мм; 0,0015 мм; 0,0019 мм. Аналізуючи отримані значення, можна дійти висновку, що значний вплив моменту затягування на відтиск різальних елементів в осьовому та радіальному напрямку виникає внаслідок фіксації державки різця, де в зоні контакту з клином відбувається деформація, яка діє на об'єкт у цілому, оскільки затягування з'єднань має на увазі створення в усіх деталях, а саме кріпильних і з'єднуючих, деяких напруг. При цьому в пружно-напружених тілах проявляються деякі механізми деформації.

У процесі обробки деталей виникають сили різання (тангенціальні –  $P_z$ ; осьові –  $P_x$ ; радіальні –  $P_y$ ), які викликають додаткову деформацію корпусу фрези з різальними елементами. Схема сил різання представлена на рисунку 5, а їх значення наведені у таблиці 1.

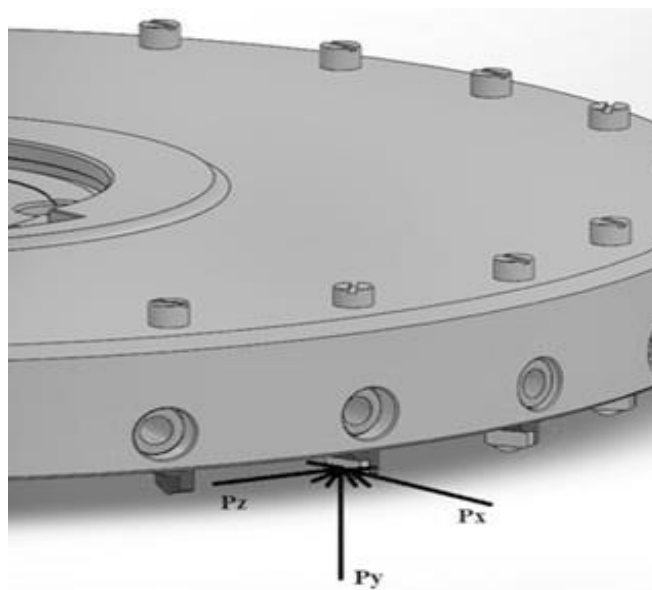


Рис. 5. Напрямок дії сил різання на різальні елементи

Під дією сил різання з одночасним впливом зусиллям затягування різальних елементів клино-гвинтовими механізмами збільшуються сумарні деформації фрези. Деформування фрези призводить до зміни навантаження окремих різальних елементів, що веде: для чорнових різальних елементів (1–5) до зміни параметрів зрізаного шару  $i$ , як наслідок, до нерівномірного зносу; для чистового різального елемента 6 – до зміни його положення у напрямі перпендикулярному до обробленої поверхні ( $Y$ ), що погіршує макро– та мікрогеометрію обробленого шару. Результати розрахунків переміщень різальних елементів під дією сил різання та зусиль затягування клино-гвинтових механізмів представлені на рисунку 6.

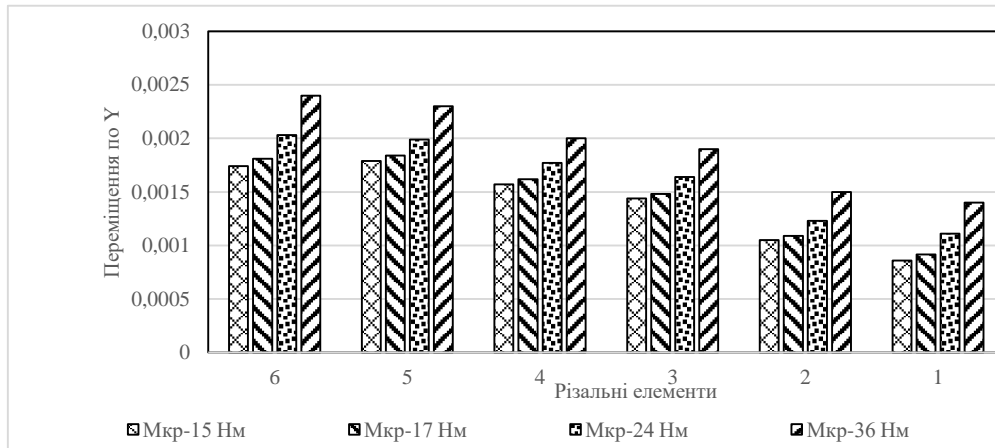


Рис. 6. Переміщення різальних елементів в осьовому  $Y$  напрямі

Сумарний вплив моменту затягування і складових сил різання на відтиск шостого різального елемента, що є чистовим, складає 0,0017–0,0024 мм. Отримані значення показують, що при чистовій обробці, де шорсткість обробки у ряді випадків не має перевищувати значень  $R_a = 0, 2-0,4$  мкм та відхилення від площинності не повинні перевищувати значень 0,02 мм, необхідно врахувати реальні значення переміщень різальних елементів для подальшого їх врахування та введення необхідної корекції положень фрези для досягнення необхідних якісних характеристик оброблених поверхонь.

**Висновки.** Проведено нелінійний розрахунок торцевої спірально-ступінчастої фрези, оснащеної НТМ, у результаті якого було визначено, як впливає момент затягування клино-гвинтового механізму на переміщення різальних кромок та фрези у цілому з врахуванням сил різання. Отримані результати розрахунків показують, що на відтиск різальних елементів та корпусу від оброблюваної поверхні значною мірою впливають моменти затягування клино-гвинтових механізмів, що може вести до збільшення переміщень різальних елементів. Визначено, що незважаючи на відносно невеликі сили різання 10–40 Н, вони викликають деформацію фрези та переміщення 0,0017–0,024 мм різальних елементів, які формують оброблену поверхню, що може негативно впливати на якісні характеристики поверхневого шару. Застосовані методи та алгоритми розрахунків, які використані при дослідженні напружено-деформованого стану торцевої фрези, можуть бути застосовані для аналізу інших конструкцій торцевих фрез та прогнозування вихідних характеристик оброблених поверхонь.

#### Список використаної літератури:

1. Сенькин Е.Н. Конструкции и эксплуатация фрез, оснащенных композитами / Е.Н. Сенькин, Г.В. Филиппов, А.В. Колядин // Библиотека фрезеровщика. – Л. : Машиностроение, 1988. – 63 с.
2. Жедь В.П. Режущие инструменты, оснащенные СТМ, и их применение / В.П. Жедь. – М. : Наука, 1986. – 256 с.
3. Выговський Г.М. Підвищення працездатності торцевих фрез для чистової обробки плоских поверхонь / Г.М. Выговський, О.А. Громовий, В.В. Серов // Вісник ЖІТІ. Технічна наука. – 2001. – С. 23–26.
4. Эффективное применение режущего инструмента, оснащенного синтетическими сверхтвердыми материалами и керамикой, в машиностроении / Д.И. Семенченко, Г.В. Боровский, С.У. Молодых и др. – М. : ВНИИТЭМР, 1986. – 136 с.
5. Свиринский Р.М. Фрезерование чугуновых деталей инструментом, оснащенный СТМ, взамен шлифования / Р.М. Свиринский // Станки и инструмент. – 1980. – № 9. – С. 25–26.
6. Выговський Г.М. Підвищення працездатності торцевих фрез для чистової обробки плоских поверхонь : автореф. дис. канд. техн. наук / Г.М. Выговський. – Київ : НТУУ «КПІ», 2000. – 16 с.
7. А.с. СССР, МПК В 23 С 5/06 Торцевая ступенчатая фреза / Г.Н. Выговский. – № 1036475 ; заявл. 24.05.82, опуб. ; 23.08.83, Бюл. № 31.
8. Безвершинне косокутне фрезерування. Зношення та стійкість / Г.М. Выговський, О.А. Громовий, П.П. Мельничук, В.С. Ольшевський // Вісник ЧІТІ. – 2000. – № 4. – 5 с.

9. Мельничук П.П. Чистове торцеве фрезерування широких плоских поверхонь. Аналіз утворення похыбок і попередні рекомендації щодо їх мінімізації / П.П. Мельничук, В.Ю. Лосєв // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2008. – № 4 (47).
10. Алямовский А.А. SolidWorks/COSMOSWorks 2006–2007. Инженерный анализ методом конечных элементов / А.А. Алямовский. – Москва : ДМК, 2007. – 784 с.
11. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А.А. Алямовский. – Москва : ДМК Пресс, 2015. – 464 с.
12. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович и др. – Петербург : СПб.: БХВ-Петербург.
13. Затягування різьбових з'єднувачив. Норми затягування : ОСТ 37.001.050-73. – Москва, 1983. – 3 с.
14. Болты, винты, шпильки и гайки. Технические требования : ГОСТ 1759-70. – [Чинний від 1989–01–01]. – М. : Государственный комитет СРСР по стандартам, 1970.

#### References:

1. Senkin, E.N., Filippov, G.V. and Kolyadin, A.V. (1988), «Constructions and operation of mills equipped with composites», *Milling Machine Library*, Mashinostroenie, L., 63 p.
2. Zhed, V.P. (1986), *Cutting tools equipped with STM, and their application*, Science, M., 256 p.
3. Vyhovskiy, H.M., Gromov, O.A. and Serov, V.V. (2001), «Improving the efficiency of face mills for the finishing of flat surfaces», *Visnyk ZhITI. Technical sciences*, pp. 23–26.
4. Semenchenko, D.I., Borovskij, G.V., Molodyk, S.U. and other (1986), *Jeftektivnoe primenenie rezhushhego instrumenta, osnashhennogo sinteticheskimi sverhtverdymi materialami i keramikoju, v mashinostroenii*, VNIITJeMR, M., 136 p.
5. Svirinskij, R.M. (1980), «Frezerovanie chugunnych detalej instrumentom, osnashhenym STM, vzamen shlifovanija», *Stanki i instrument*, Vol. 9, pp. 25–26.
6. Vygovskij, G.M. (2000), «Pidvishhennja pracezdatnosti torcevih frez dlja chistovoї obrobki ploskih poverhon'», Abstract of kand. tehn. nauk, NTUU «KPI», Kiiv, 16 p.
7. Vygovskij, G.N. (1983), *Torcovaja stupenchataja freza* [Face milled cutter], opubl. vid 23 serpnja, A. s. 1036475, Bjul. No 31.
8. Vygovskij, G.M., Gromovij, O.A., Mel'nychuk, P.P. and Ol'shevs'kij, V.S. (2000), «Bezvershynne kosokutne frezeruvannja. Znoshennja ta stijkist'», *Visnyk ChITI*, Vol. 4, 5 p.
9. Mel'nychuk, P.P. and Lojev, V.Ju. (2008), «Chystove torceve frezeruvannja shyrokyh ploskyh poverhon'. Analiz utvorennja pohybok i poperedni rekomendacii' shhodo i'h minimizacii'», *Visnyk ZhDTU. Tehnichni nauky*, Vol. 4 (47).
10. Aljamovskij, A.A. (2007), *SolidWorks/COSMOSWorks 2006–2007. Ynzhenernyj analiz metodom konechnyh elementov*, DМК, Moskva, 784 p.
11. Aljamovskij, A.A. (2015), *Ynzhenernye raschetny v SolidWorks Simulation*, DМК Press, Moskva, 464 p.
12. Aljamovskij, A.A., Sobachkyn, A.A., Odyncov, E.V., Harytonovych, (2008), *SolidWorks 2007/2008. Komp'juternoe modelirovanje v ynzhenernoj praktyke*, SPb.: BHV-Peterburg, Peterburg.
13. Derzhavnyj komitet SRSR po standartam (1983), OST 37.001.050-73, *Zatjaguvannja riz'bovyh zjednuvachyv. Normy zatjaguvannja* [Tightening of threaded joints. Tightening rules], Moskva, 3 p.
14. Derzhavnyj komitet SRSR po standartam (1970), GOST 1759-70, *Bolty, vinty, shpyl'ky i gajky. Tehnichni vymogy* [Bolts, wires, studs and nuts. Technical requirements], Moskva.

**Виговський** Георгій Миколайович – кандидат технічних наук, професор Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проектування різальних інструментів.

**Плисак** Микола Миколайович – аспірант Житомирського державного технологічного університету

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проектування різальних інструментів.

Стаття надійшла до редакції 05.04.2019.