

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЖИТОМИРСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Глембоцька Лариса Євгеніївна**



УДК 621.914.22

**ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ОБРОБЛЕННЯ  
ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ З ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ  
МАТЕРІАЛІВ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ТОРЦЕВИХ ФРЕЗ  
ІЗ СТУПІНЧАСТИМ РОЗТАШУВАННЯМ НОЖІВ**

Спеціальність 05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Житомир – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі галузевого машинобудування Житомирського державного технологічного університету Міністерства освіти і науки України, м. Житомир

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук  
**Балицька Наталія Олександрівна,**  
Житомирський державний технологічний університет  
Міністерства освіти і науки України, м. Житомир  
доцент кафедри прикладної механіки та  
комп'ютерно-інтегрованих технологій

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**Васильченко Яна Василівна**  
Донбаська державна машинобудівна академія Міністерства  
освіти і науки України, м. Краматорськ  
завідувач кафедри комп'ютеризованих мехатронних  
систем, інструментів і технологій


кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
**Копейкіна Марина Юріївна,**  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля  
Національної академії наук України, м. Київ  
старший науковий співробітник відділу технологічного  
управління якістю обробки поверхні виробів машино- та  
приладобудування

Захист відбудеться “ 4 ” травня 2018 р. об “ 13<sup>00</sup> ” годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К14.052.02 у Житомирському державному технологічному університеті за адресою: 10005, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103, ауд. 248.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Житомирського державного технологічного університету за адресою: 10005, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103, або за веб-адресою: <https://ztu.edu.ua>.

Автореферат розісланий “ 3 ” квітня 2018 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої  
ради К14.052.02  
канд. техн. наук, доц.

 О. А. Громовий

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В сучасному машинобудуванні часто застосовуються деталі з важкооброблюваних матеріалів, яким властиві особливі фізико-механічні характеристики. Процес різання таких матеріалів супроводжується значними силовими напруженнями, високою температурою в зоні різання та підвищеним зношуванням різального інструменту, що негативно позначається на продуктивності оброблення, показниках якості утвореної поверхні тощо. Це особливо важливо при обробленні плоских точних протяжних поверхонь, зокрема торцевим фрезеруванням, що можуть бути спряженими, і до яких висуваються високі вимоги щодо шорсткості.

Незважаючи на значні успіхи вітчизняних та зарубіжних авторів залишається недостатньо дослідженим процес торцевого фрезерування плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів.

Таким чином, підвищення продуктивності торцевого фрезерування та забезпечення при цьому необхідної якості утворених плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів за рахунок розробки та застосування прогресивних конструкцій торцевих фрез, які розраховані на умови роботи зі збільшеними подачами і характеризуються покращеною динамічною стабільністю, є актуальною науково-технічною задачею для сучасного машинобудування.

**Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі галузевого машинобудування Житомирського державного технологічного університету у рамках науково-дослідних робіт за напрямком: «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі» та пов'язана з НДР Житомирського державного технологічного університету і є складовою державної програми досліджень на тему: «Теоретичні основи високопродуктивної технології чистової лезової обробки плоских поверхонь деталей композитним інструментом» (державний реєстраційний номер 0106U010633, обліковий номер 0209U005340, 2006-2008 рр.) та «Синтез способів формоутворення плоских поверхонь деталей реалізацією концепцій нестационарних процесів та урівноваження складових сил різання» (державний реєстраційний номер 0115U002547, обліковий номер 0218U000335, 2015–2017 рр.) згідно тематичного плану науково-дослідних робіт Житомирського державного технологічного університету, що фінансуються за рахунок коштів державного бюджету Міністерством освіти і науки України, при реалізації яких здобувач була виконавцем.

**Метою роботи** є наукове обґрунтування підходів до підвищення продуктивності оброблення плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів за рахунок розробки нових конструкцій торцевих фрез зі ступінчастим розташуванням ножів з циліндричною передньою поверхнею.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні **основні задачі наукового дослідження**:

– здійснити аналіз теоретичних передумов розробки нових конструкцій торцевих фрез для оброблення плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних

матеріалів та виділити головні фактори, які визначають продуктивність процесу фрезерування;

- розробити нові ступінчасті схеми різання торцевих фрез для різних умов оброблення;

- розробити нову конструкцію експериментальної регульованої торцевої фрези для реалізації різних ступінчастих схем різання;

- розробити математичну модель завантаженості різальних кромок запропонованої ступінчастої торцевої фрези для розрахунку та дослідження зміни величин елементів зрізу кожного ножа в залежності від конструктивних параметрів та величини подачі на всій дузі контакту інструмента із заготовкою;

- на основі математичної моделі завантаженості різальних кромок розробленої торцевої фрези сформулювати рекомендації по призначенню раціональних конструктивних параметрів інструмента для конкретного значення глибини різання;

- провести фізичне та комп'ютерне моделювання процесу торцевого фрезерування для виявлення найбільш раціональної форми передньої поверхні різальних елементів, яка забезпечує зменшення динамічного навантаження на ніж при врізанні в заготовку, а також в процесі різання;

- виконати експериментальні та виробничі дослідження процесу оброблення плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів торцевими фрезами розробленої та стандартної конструкції;

- розробити рекомендації щодо режимів експлуатації розробленої торцевої фрези, використання яких забезпечить підвищення продуктивності оброблення плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів.

**Об'єкт дослідження** – процес оброблення плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів торцевими фрезами.

**Предмет дослідження** – визначення раціональних конструктивних параметрів ступінчастих торцевих фрез та режимів експлуатації, які забезпечують підвищення продуктивності оброблення плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів.

**Методи дослідження.** При виконанні дисертаційної роботи були використані сучасні методи модельних та натурних досліджень, які виконано на основі положень теорії різання, теорії аналітичної геометрії, теорії математичного планування експериментів. Для статистичної обробки експериментальних даних використані регресійний та дисперсійний аналізи, адекватність отриманих результатів перевірена критеріями Кохрена, Фішера та Стьюдента. Комп'ютерне моделювання досліджуваних процесів здійснено в середовищі Solidworks, Maple, Deform 3D. Експериментальні дослідження динамічної стабільності процесу торцевого фрезерування виконано з використанням контактного методу реєстрації вібросигналу за допомогою п'єзоелектричних датчиків. Оцінювання параметрів якості обробленої поверхні проводилось кількісним методом, оснований на вимірюванні мікрогеометрії поверхні за допомогою профілометра–профілографа. Запропоновані в дисертаційній роботі математичні моделі, результати і висновки підтверджені чисельними моделюючими та експериментальними дослідженнями.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Дістало подальший розвиток науково-теоретичне обґрунтування підходу до

проектування ступінчастих торцевих фрез, що стало основою розроблення нової конструкції торцевої фрези і дозволило забезпечити підвищення продуктивності оброблення плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів при покращенні шорсткості обробленої поверхні за рахунок розміщення по спіралі Ферма різальних елементів з циліндричною передньою поверхнею.

2. Вперше на основі розробленої математичної моделі завантаженості різальних кромки ножів ступінчастої торцевої фрези визначено елементи зрізу, проаналізовано їх зміну в залежності від величини подачі, конструктивних параметрів інструменту і положення ножа на дузі контакту, що дало можливість встановити їх оптимальний рівень та розробити науково-обґрунтовані рекомендації щодо визначення раціональних конструктивних параметрів торцевих фрез для конкретних умов оброблення.

3. Набули подальшого розвитку аналітичні залежності на основі фізичного моделювання щодо визначення тангенціальної складової сили різання для торцевого фрезерування в залежності від режимів оброблення, в результаті чого встановлено, що ножі з циліндричною передньою поверхнею забезпечують зниження в межах 2,88–3 рази тангенціальної складової сили різання в порівнянні з круглими ножами з плоскою передньою поверхнею за рахунок зменшення площі контакту стружки з передньою поверхнею ножів і мінімізації ступеня пластичної деформації в зоні різання, що підтверджено комп'ютерним моделюванням.

4. Вперше на основі комп'ютерного моделювання процесу торцевого фрезерування досліджено вплив форми передньої поверхні ножів на складову  $P_z$  сили різання при врізанні ножів в заготовку, що дозволило виявити можливість зменшення ударних навантажень на ніж за рахунок його виконання з циліндричною передньою поверхнею близько 2 разів.

5. Набули подальшого розвитку дослідження динамічних характеристик процесу оброблення торцевими фрезами розробленої та стандартної конструкції плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів, які підтвердили покращення динамічної стабільності процесу різання розробленою ступінчастою торцевою фрезою та стали передумовою інтенсифікації подачі, що забезпечило підвищення продуктивності оброблення.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

– Розроблена ступінчата торцева фреза та керівні матеріали щодо раціональної експлуатації інструмента передані для впровадження у виробництво на ТОВ «Завод «Металіст» (м. Житомир) для оброблення плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів. При цьому досягнуто підвищення продуктивності в 1,28 рази (акт впровадження від 16.01.2018 р.);

– Результати роботи впроваджені у навчальному процесі при викладанні дисциплін «Теорія різання», «Різальний інструмент» та «Проектування спеціального різального інструменту» на кафедрі прикладної механіки і комп'ютерно-інтегрованих технологій Житомирського державного технологічного університету (довідка №44-45/1723 від 04.12.2017 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Теоретичні та експериментальні результати досліджень, математичні моделі, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. Здобувачем особисто сформульовані наукові положення та технічні

рішення, використання яких дозволяє підвищити продуктивність оброблення плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів. Результати досліджень, виконаних у співавторстві, отримані при безпосередній участі здобувача на всіх етапах роботи. Постановка задач, аналіз отриманих результатів і формулювання висновків виконані у співпраці з науковим керівником.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертації доповідались та обговорювались на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях серед них: перша Міжнародна науково-технічна конференція "Машинобудування та металообробка – 2003" (м. Кіровоград, 2003); XIII Міжнародний науковий семінар "Высокие технологии в машиностроении" – "INTERPARTNER-2003" (Харків–Крим, 2003); IV Міжнародна науково-технічна конференція "Машинобудування та металообробка – 2005" (м. Житомир, 2005); науково-технічні конференції ЖДТУ (м. Житомир, 2005, 2006, 2009, 2010, 2013, 2014, 2016); V Міжнародна науково-технічна конференція «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2007); науково-технічна конференція ТДТУ (м. Тернопіль, 2008); IX міжнародна науково-практична конференція «21 century: Fundamental and applied sciences today» (North Charleston, USA, 2016); 17-ий Міжнародний науково-технічний семінар «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте» (м. Свалява, 2017); Всеукраїнська науково-практична конференція «Обладнання і технології сучасного машинобудування» (м. Тернопіль, 2017); Міжнародна науково-практична конференція "Сучасні технології промислового комплексу" (м. Херсон, 2017).

**Публікації.** За результатами дисертації опубліковано 19 наукових праць, з них 10 статей у наукових фахових виданнях України, затверджених переліком ДАК України (одноосібних – 2; таких, що опубліковані у виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах – 4, з них 1 стаття – у виданні, що індексується наукометричною базою Scopus), 8 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій, 1 патент на винахід – одноосібно.

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 118 найменувань і додатків. Повний обсяг роботи складає 172 сторінки машинописного тексту з додатками, у тому числі 56 рисунків та 11 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі досліджень, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, вказані наукова новизна, практичне значення одержаних результатів, виділено особистий внесок здобувача, наведено дані щодо публікації основних результатів дисертаційної роботи у наукових виданнях та її апробації.

У **першому розділі** наведено аналіз теоретичних передумов розробки нових конструкцій торцевих фрез для оброблення плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів: класифікація важкооброблюваних матеріалів та специфіка процесу їх фрезерування, аналіз конструкцій існуючих торцевих фрез, особливості роботи торцевих фрез із ступінчастими схемами різання. Встановлено, що основним фактором, який стримує підвищення продуктивності оброблення плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів є фізико-механічні властивості цих матеріалів, які призводять до зниження показників оброблюваності різанням. Питанням проблем фрезерування виробів з важкооброблюваних матеріалів присвячені роботи Бердникова Л.М., Виговського Г.М., Громового О.А., Гуревича Я.Л., Залози В.О., Марчука В.І., Петрухи П.Г., Подпоркіна В.Г., Подураєва В.М., Töllner K., Icks G., Philip P.K., König W. та ін. Найбільш застосовуваним інструментальним матеріалом для торцевого фрезерування є твердий сплав, проте в такому випадку підвищення продуктивності оброблення за рахунок збільшення швидкості різання обмежується теплостійкістю цього матеріалу. Тому для підвищення продуктивності процесу торцевого фрезерування виявляється доцільною розробка нових конструкцій фрез, оснащених твердим сплавом, які розраховані на умови оброблення зі збільшеними подачами.

Аналіз конструктивних параметрів існуючих торцевих фрез та схем різання ними показав необхідність в розробці інструменту із ступінчастими схемами різання з розподілом зрізу за товщиною та глибиною, однаковим вильотом ножів відносно корпусу фрези, більш рівномірним розподілом навантаження на кожен ніж та круглими різальними елементами.

Отже, підвищення продуктивності оброблення плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів торцевими фрезами, оснащеними твердими сплавами, можливе за рахунок збільшення подачі при умові розробки інструментів із спеціальною конструкцією та з раціональною формою ножів, які характеризуються кращою динамічною стабільністю процесу оброблення, що є на сьогоднішній день актуальною науково-технічною задачею.

Для вирішення вказаної задачі сформульована мета та виконана постановка задач наукового дослідження.

У **другому розділі** викладено обґрунтування принципу побудови нової конструкції торцевої фрези, на основі якого здійснено: розробку форми корпусу інструменту, запропоновано ступінчасті схеми різання; вибір виду спіралі, за якою розташовуються ножі фрези; вибір форми різальної кромки ножів для умов косокутного різання; аналітичне та графічне профілювання різальної частини ножа фрези.

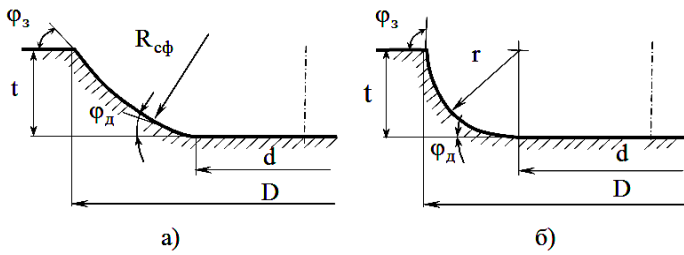


Рис. 1. Поверхні різання і визначальні кути в плані при різанні ножами з круглими кромками, розташованими на сферичному (а) та тороїдальному корпусках (б):  $\varphi_з$  – кут в плані між поверхнею заготовки та дотичною до поверхні різання,  $\varphi_д$  – кут в плані між обробленою поверхнею та дотичною до поверхні різання,  $d$  – ширина обробленої поверхні,  $D$  – діаметр фрези

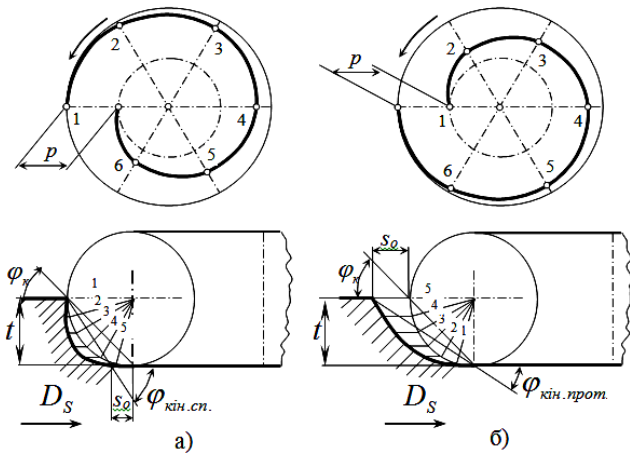


Рис. 2. Вплив співпадання (а) чи протилежності (б) напрямків проекції спіралі з ножами та траєкторії результуючого руху на форму загальної поверхні різання

Тороїдальна форма корпусу забезпечує плавну зміну кутів в плані між поверхнею заготовки  $\varphi_з$  та обробленою поверхнею  $\varphi_д$  (рис. 1) та можливість розташування ножів з однаковим вильотом. Використання ножів з круглими різальними кромками та розташуванням на одній або декількох спіралях, дозволить виконати рівномірний поділ зрізу на широкі смуги, що обумовить зменшення питомих сил різання та більш рівномірне навантаження ножів.

Досліджено взаємний вплив напрямку проекції спіралей (рис. 2), за якими розташовано ножі на корпусі торцевої фрези, та траєкторії результуючого руху при різанні (співпадіння та протилежність). Для отримання «відкритої» форми загальної поверхні різання (рис. 2, б) при обробленні торцевою фрезою з тороїдальним корпусом обрано напрямком спіралі протилежний напрямку траєкторії результуючого руху, що забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження на ножі всіх ступеней та зменшує навантаження на чорнові ножі.

Для зменшення товщини і ширини зрізу чорнових ножів запропоновано для їх розташування використовувати спіралі Ферма, ( $\rho = a \cdot \sqrt{\varphi}$ , де  $\rho$  – полярний радіус;  $a$  – коефіцієнт;  $\varphi$  – полярний кут), в яких радіальний крок витків у напрямку від центру зменшується. Зменшення, в першу чергу, ширини зрізу чорновими ножами дасть змогу отримати плавність зростання площ зрізу від чистових ножів до чорнових.

Розроблено ступінчасті схеми різання із розташуванням ножів з однаковим вильотом відносно тороїдального корпусу за напрямком спіралі, протилежним напрямку траєкторії результуючого руху, деякі з них представлено на рис. 3.

Всі розглянуті схеми різання характеризуються плавністю зростання площ зрізу від чистових ножів до чорнових, практично 100% участю в роботі ножів ТФ (при максимальній глибині різання), що забезпечить отримання підвищеної стійкості ножів та продуктивності оброблення, високої якості поверхневого шару та загального підвищення ефективності обробки.



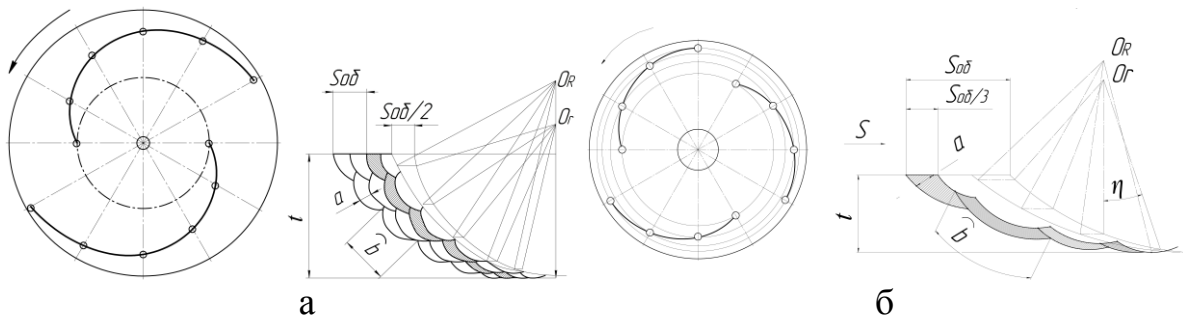


Рис. 3. Розташування ножів та схеми різання для:  
а) чорнового оброблення; б) чистового оброблення

Враховуючи вищенаведені принципи розроблено та запатентовано конструкцію торцевої фрези із ступінчастим розташуванням ножів із круглими різальними кромками, що розташовані за ділянками спіралі Ферма на тороїдальному корпусі, що наведено на рис. 4 (патент № 78120, МПК(2007) В23С5/02, В23С5/16 / Різальний інструмент / Л. Є. Глембоцька. - № а 200504170, заявл. 29.04.2005; надр. 15.02.2007, БЮЛ. №2).

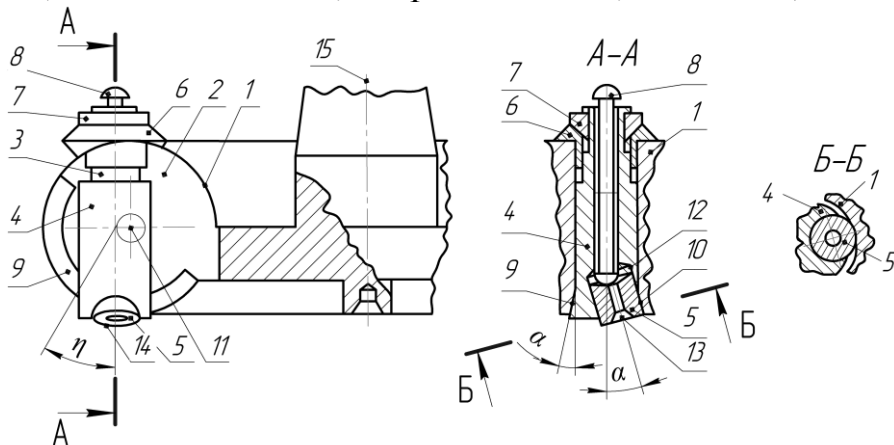


Рис. 4. Конструкція розробленої торцевої фрези

- 1 – тороїдальний корпус, 2 – осьовий паз, 3 – різцевий вузол, 4 – державка, 5 – круглий ніж, 6 – шайба, 7 – гайка, 8 – регулюючий гвинт, 9, 10 – фаски, 11 – колова вісь, 12 – циліндричний отвір під ніж, 13 – вісь ножа, 14 – торцева кромка ножа, 15 – вісь торцевої фрези  
( $D = 200$  мм,  $z = 12$ ,  $d_{\text{ножа}} = 11$  мм):

Для торцевої фрези розробленої конструкції здійснено графічне та аналітичне профілювання різальної частини ножа, що дозволило отримати залежність для визначення кута нахилу різальних кромки  $\lambda$  на всіх ступенях:

$$\sin \lambda_B = (\cos \mu \cdot \operatorname{tg} \theta - \sin \mu \cdot \cos \alpha_N) \cdot \cos \theta ; \quad (1)$$

$$\cos \mu = 1 - \frac{\delta_{ti}}{r_n \cdot \sin \alpha_N} ; \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{[\operatorname{tg} \lambda_B \cdot (\sin \mu \cdot \cos \eta_i + (1 - \cos \mu) \cdot \sin \alpha_N \cdot \sin \eta_i) - (1 - \cos \mu) \cdot \cos \alpha_N]}{(\sin \mu \cdot \cos \eta_i + (1 - \cos \mu) \cdot \sin \alpha_N \cdot \sin \eta_i) + (1 - \cos \mu) \cdot \cos \alpha_N \cdot \operatorname{tg} \lambda_B + R_B / r_n \cdot \cos \lambda_B} ; \quad (3)$$

де  $\alpha_N$  – задній кут;  $\mu$  – кут контакту активної ділянки різальної кромки ножа;  $\delta_{ti}$  – глибина різання кожним ножом на відповідній ступені;  $\theta$  – проекція кута

контакту активної ділянки різальної на площину різання;  $R_B$  – радіусна відстань точки перетину проєкцій суміжних різальних кромки;  $r_H$  – радіус ножа, що дозволить визначити ступінь ускладненості зрізання припуску ножами фрези.

**В третьому розділі** представлено моделювання процесу торцевого фрезерування, а саме: математичне моделювання завантаженості різальних кромки ножів; фізичне моделювання для дослідження впливу форми передньої поверхні на тангенціальну складову сили різання; комп'ютерне моделювання силових характеристик для дослідження впливу форми передньої поверхні ножів на величину ударного навантаження в момент врізання в заготовку.

Для математичного моделювання завантаженості круглих різальних кромки ножів було введено початкові дані (рис. 5): радіус фрези –  $R$ , мм; радіус тора –  $r_{tor}$ , мм; радіус ножа –  $r_{ins}$ , мм; задній кут –  $\alpha_N$ , град; величина зміщення осі різального вузла –  $\delta$ , мм; кількість ножів –  $k$ , кількість спіралей –  $N$ , подача на хвилину –  $s_{хв}$ , мм/хв; частота обертання –  $n$ , хв<sup>-1</sup>; величина вильоту центра плоскої задньої поверхні ножа –  $\Delta r$ , мм; кут нахилу осі різального вузла відносно осі тороїдального корпусу фрези –  $\eta_i$ , град.

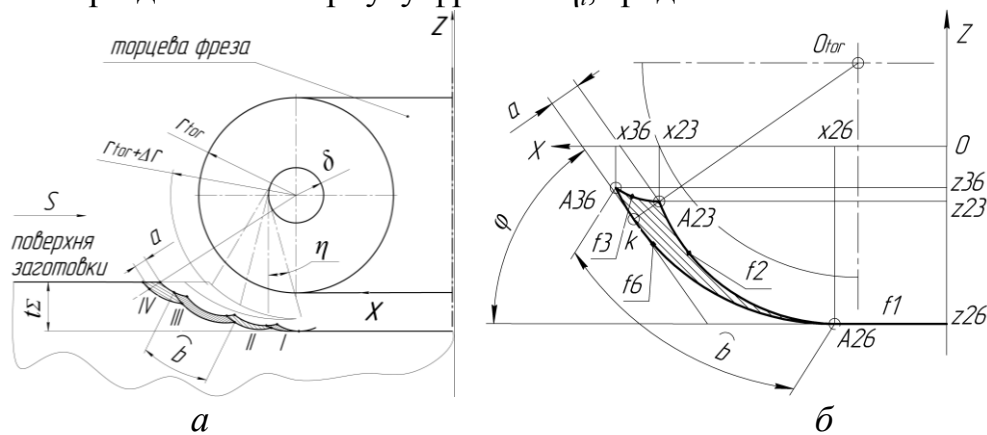


Рис. 5. Елементи зрізу: а – схема різання; б – переріз зрізу ножа першого ступеню

Розробка математичної моделі завантаженості круглих різальних кромки ножів ступінчастої торцевої фрези проводилася в наступній послідовності.

1) Визначення початкового і кінцевого радіуса, на якому розташовуються ножі торцевої фрези;

2) Визначення координат центрів задньої плоскої поверхні циліндричних ножів на площині XOZ;

3) Визначення канонічного рівняння еліпса (проєкції задньої поверхні ножа на основну площину);

4) Визначення загальних рівнянь проєкцій ножів (еліпсів) на основну площину;

5) Знаходження координат точок перетину еліпсів A26, A23, A36 (рис. 5, б);

6) Визначення максимальної товщини  $a$ , ширини зрізу  $b$ , максимального головного кута в плані  $\varphi$ , глибини різання  $t$  та площі зрізу  $S$  для ножів всіх ступеней (рис. 5, б):

– визначається рівняння прямої, що проходить через центр тора  $O_{tor}$  і точку перетину A23;

– знаходяться координати перетину прямої  $O_{tor}A23$  і еліпса рішенням системи рівнянь;

– товщина зрізу:  $a_i = \sqrt{(x_k - x_{ij})^2 + (z_k - z_{ij})^2}$ , (4)

де  $x_k, z_k$  – координати точки перетину прямої і еліпса;  $x_{ij}, z_{ij}$  – координати точки перетину A23 відповідних еліпсів;

– максимальний головний кут в плані  $\varphi$  в досліджуваній точці різальної кромки  $x_{ij}, z_{ij}$ :  $\varphi_i = \arcsin((a_i \cdot n \cdot N) / s_{x_{ij}})$ ; (5)

– глибина різання ножем кожної ступені:  $t_i = z_{36} - z_{26}$ , (6)

де  $z_{36}$  та  $z_{26}$  – координати точок перетину еліпсів A36 і A26, що формують відповідний зріз (рис. 6, б);

– ширина зрізу:  $b_i = \int_{x_{36}}^{x_{26}} \sqrt{1 + (f(x)')^2}$ , (7)

де  $x_{36}, x_{26}$  – граничні координати точок дуги (ширини зрізу);  $f(x)$  – рівняння відповідного еліпсу, що визначає ширину зрізу;

– площа зрізу  $S$  ножів на всіх ступенях:

$$S_{ij} = \int_{x_{26}}^{x_{23}} (f_2(x) - f_6(x)) dx + \int_{x_{26}}^{x_{36}} (f_3(x) - f_6(x)) dx, \quad (8)$$

де  $x_{23}, x_{26}, x_{36}$  – границі інтегрування – координати точок перетину еліпсів, що формують відповідний зріз.

Площі зрізу ножів кожної ступені фрези в довільній точці дуги контакту визначаються за формулою:

$$S_i = S_{ic} \cdot \cos \psi_i = S_{ic} \cdot \cos \left( \frac{B/2 \pm \varepsilon}{R_i} \right), \quad (9)$$

де  $S_{ic}$  – це площа зрізу ножа відповідної ступені в основній площині, що проходить через вісь фрези і напрямок подачі.

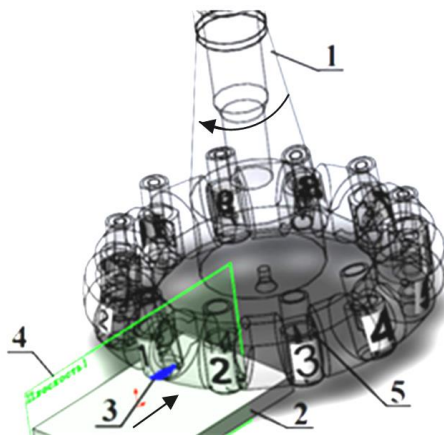


Рис. 6. Ескіз комп'ютерної моделі в контексті збірки:

1 – фреза; 2 – заготовка; 3 – ескіз з проєкцій різальних кромки; 4 – допоміжна площина; 5 – ніж фрези з індивідуальним номером

Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі було проведено імітаційне моделювання завантаженості різальних кромки ножів розробленої торцевої фрези в середовищі SolidWorks Motion шляхом графічного моделювання руху фрези та заготовки.

Для виконання імітаційного моделювання створена твердотіла збірна модель фрези та заготовки (рис. 6).

В моменти часу дослідження, коли центри задніх поверхонь ножа фрези почергово співпадали з базовою площиною (основна площина, що проходить через вісь фрези і напрямок подачі), створювалися проєкції різальних кромки на цю площину.

Оскільки, відносна похибка визначення площі зрізів математичним та імітаційним моделюванням

знаходиться в межах від 1,8% до 5,7%, то достовірність отриманої математичної моделі можна вважати підтвердженою. На основі розробленої математичної моделі було проведено розрахунки в середовищі Maple, що дозволили визначити величину елементів зрізу (товщину, ширину, площу зрізу) кожного ножа торцевої фрези в довільній точці дуги контакту. Результати моделювання впливу величини подачі  $s_{хв}$ , переднього кута  $\gamma_N$  та кута нахилу різальних вузлів  $\eta$  на ширину та площу зрізу кожного ножа торцевої фрези представлені на рис. 7–9 (де  $\blacklozenge$  – перша ступінь,  $\blacksquare$  – друга ступінь,  $\blacktriangle$  – третя ступінь,  $\blacklozenge$  – четверта ступінь).

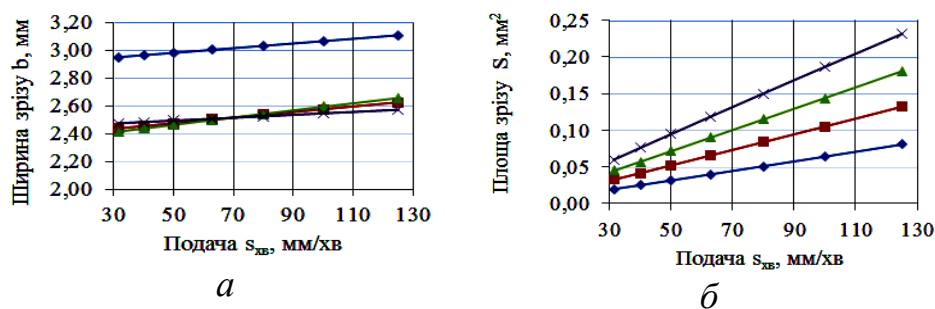


Рис. 7. Вплив подачі  $s_{хв}$  на елементи зрізу ножів торцевої фрези: *a* – на ширину зрізу; *б* – на площу зрізу, ( $\gamma_N = -16^\circ, \eta = -6, 0, 6, 12^\circ$ )

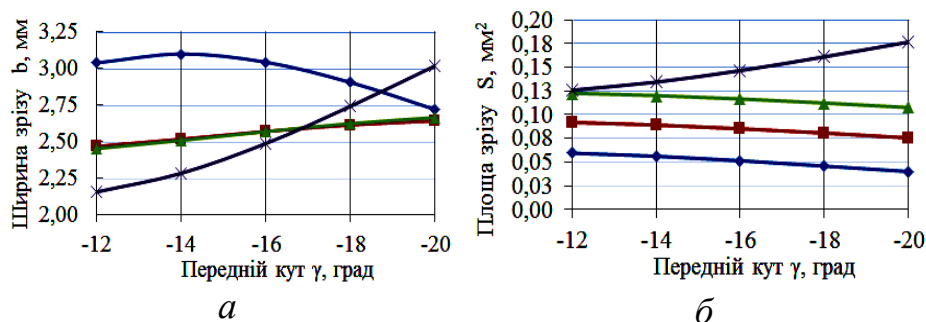


Рис. 8. Вплив переднього кута  $\gamma_N$  на елементи зрізу ножів торцевої фрези: *a* – на ширину зрізу; *б* – на площу зрізу ( $s_{хв} = 80$  мм/хв,  $\eta = -6, 0, 6, 12^\circ$ )

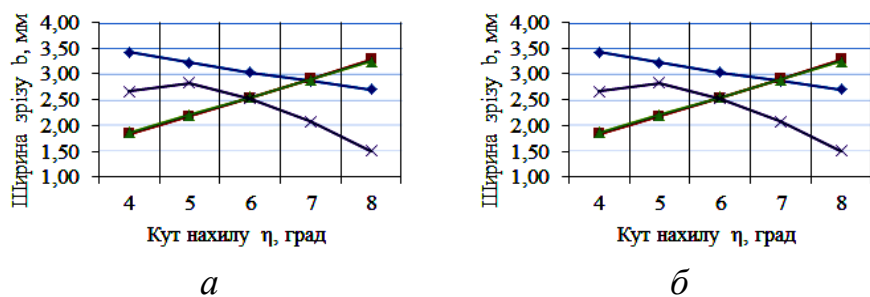


Рис. 9. Вплив кутів  $\eta$  нахилу різальних вузлів на елементи зрізу ножів торцевої фрези: *a* – на ширину зрізу; *б* – на площу зрізу ( $s_{хв} = 80$  мм/хв,  $\gamma_N = -16^\circ$ )

Встановлено, що збільшення величини подачі викликає лінійне зростання товщини, ширини зрізу та глибини різання на ножах всіх ступіней. При цьому ширина зрізу ножів першої ступені виявляється найбільшою, що обумовлює покращення якості обробленої поверхні, яка формується послідовними положеннями різальних кромek ножів саме першої ступені. Також варто відмітити, що співвідношення ширини зрізів змінюється при досягненні величини подачі 70 мм/хв. Зміна величин всіх зазначених елементів зрізу призводить до поступового лінійного зростання площі зрізу на ножах всіх ступіней торцевої фрези (див. рис. 7). Таким чином, у всьому діапазоні зміни величини подачі найбільш навантаженими виявляються ножі четвертої ступені фрези (чорнові) і найменш навантаженими – ножі першої ступені (чистові).

Зростання переднього кута викликає поступове зменшення товщини зрізу, глибини різання та головного кута в плані для ножів всіх ступіней торцевої фрези, крім четвертої. При значеннях заднього кута  $\gamma_N < -16^\circ$  ширина зрізу зростатиме від чорнових ножів до чистових, а при  $\gamma_N > -16^\circ$  – такий порядок порушується, що не є раціональним. Такі взаємозв'язки між переднім кутом і елементами зрізу обумовлюють поступове зменшення площі зрізу ножами всіх ступіней, окрім четвертої (див. рис. 8, б) при зростанні  $\gamma_N$ . Отже, виходячи із вищезазначеного, можна зробити висновок про доцільність призначення для торцевої фрези запропонованої конструкції переднього кута у розмірі  $-16^\circ$ , оскільки саме в такому випадку площа зрізу ножами різних ступіней буде рівномірно зростати від першої ступені до четвертої.

Графічні залежності (див. рис. 9) свідчать про перевантаженість ножів четвертої ступені при зменшенні кутів  $\eta$  нахилу різальних вузлів до  $4-5^\circ$ . Разом з тим, збільшення цих кутів до  $7-8^\circ$  викликає перенесення максимального завантаження на ножі третьої або другої ступіней, що не є доцільним (рис. 9, б). Тому для досліджуваної фрези при умові обробки загальною глибиною різання 3 мм можна рекомендувати призначення кутів нахилу різальних вузлів в розмірі  $6^\circ$ , так як в цьому випадку площа зрізу ножами різних ступіней буде пропорційно зростати від першої ступені до четвертої. У випадку оброблення з більшими глибинами різання величини кутів нахилу різальних вузлів варто збільшувати, при менших глибинах різання – зменшувати.

Проведене дослідження дало змогу запропонувати раціональні значення основних конструктивних параметрів торцевої фрези залежно від необхідної глибини різання (табл. 1).

Таблиця 1

Рекомендовані значення конструктивних параметрів торцевої фрези  
в залежності від глибини різання

Конструктивні параметри торцевої фрези	Глибина різання, мм				
	2	2,5	3	3,5	4
Кути нахилу різальних вузлів $\eta_i$ , град	4	5	6	7	8
Передній кут $\gamma_N$ , град	-12	-14	-16	-18	-20

За допомогою фізичного моделювання процесу торцевого фрезерування проведено дослідження впливу форми передньої поверхні ножа на тангенціальну складову сили різання  $P_Z$ . Експерименти проводились при обробленні свинцевої заготовки розмірами  $320 \times 120 \times 80$  мм на вертикально-фрезерному верстаті моделі 6P12 при змінних режимах різання. Використовувались чотири різних форми ножів: призматичний, циліндричний з плоскою передньою поверхнею, циліндричний з циліндричною передньою поверхнею та ніж з конічною передньою поверхнею. Був проведений повний трифакторний експеримент з варіюванням факторів на двох рівнях (швидкість різання: 55 та 69 м/хв, подача: 25 та 31,5 мм/хв, глибина різання: 2 та 2,5 мм).

Отримано наступні залежності для тангенціальної складової сили різання при обробленні:

– призматичним ножем:

$$P_z = 1234,4 \cdot \frac{s^{0,03} \cdot t^{0,15} \cdot (vt)^{0,09} \cdot (sv)^{0,01}}{v^{0,06} \cdot (st)^{0,01} \cdot (svt)^{0,03}}, \quad (10)$$

– ножем з плоскою передньою та циліндричною задньою поверхнею:

$$P_z = 1791 \cdot \frac{v^{0,02} \cdot t^{0,1} \cdot (st)^{0,08} (vt)^{0,02} (sv)^{0,005}}{s^{0,02} \cdot (svt)^{0,014}}, \quad (11)$$

– ножем з циліндричною передньою поверхнею:

$$P_z = 818,5 \cdot \frac{s^{0,035} \cdot v^{0,012} \cdot t^{0,056}}{(sv)^{0,008}}, \quad (12)$$

– ножем з конічною передньою поверхнею

$$P_z = 318,3 \cdot \frac{(sv)^{0,013}}{s^{0,54} \cdot v^{0,05}}. \quad (13)$$

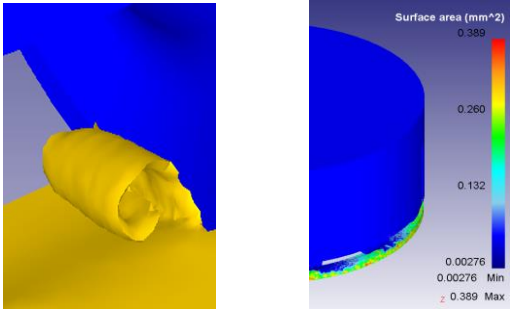
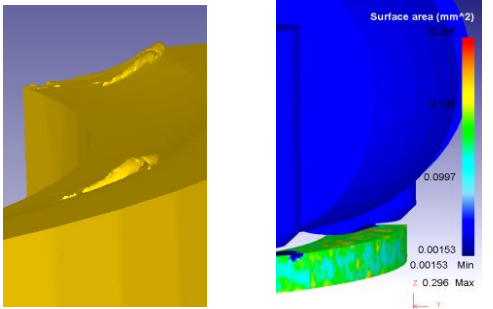
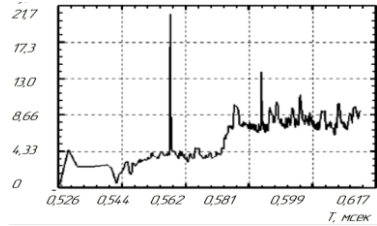
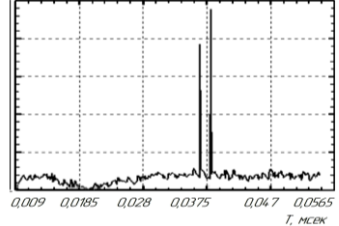
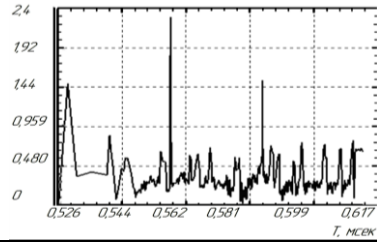
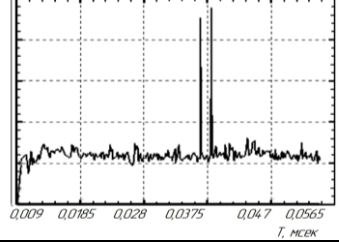
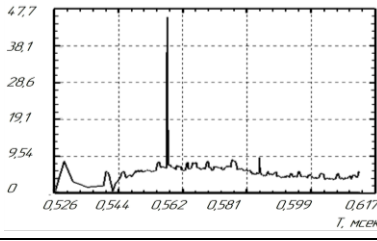
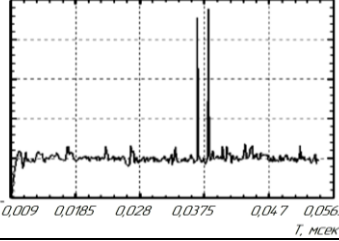
Фізичне моделювання дозволило встановити, що при максимальних значеннях режимів різання ( $s = 31,5$  мм/хв,  $v = 69$  м/хв,  $t = 2,5$  мм) значення тангенціальної складової сили різання при обробленні ножем з циліндричною передньою поверхнею в 1,61 рази менше, ніж при обробленні призматичним ножем, та в 3 рази менше, ніж при обробленні ножем з плоскою передньою та циліндричною задньою поверхнями. Це можна пояснити зменшенням площі контакту стружки з передньою поверхнею ножів та мінімізацією пластичної деформації в зоні різання. Адекватність отриманих результатів перевірена критеріями Кохрена, Фішера та Стьюдента.

Визначення ударних навантажень в момент врізання ножа в заготовку при дослідженні сил різання на верстаті є неможливим через інерційність самого процесу різання. З огляду на це, було проведене комп'ютерне моделювання процесу торцевого фрезерування методом скінчених елементів в спеціалізованому інженерному програмному комплексі DEFORM 3d, який призначений для аналізу різних процесів оброблення, в тому числі механічного оброблення.

Скінчено-елементна сітка заготовки була сформована тетраедричними елементами другого порядку. Характерний розмір елементів був нерівномірний за об'ємом заготовки і в області стружкоутворення обирався таким, щоб за товщиною стружки було не менше трьох елементів. Скінчено-елементна сітка періодично перебудовувалася для зменшення викривлення елементів при деформуванні. Механічна поведінка оброблюваного матеріалу описувалася рівнянням Джонсона-Кука.

Моделювання силових залежностей процесу торцевого фрезерування дало змогу дослідити вплив форми передньої поверхні ножів на величину ударного навантаження в момент врізання в заготовку при обробленні стандартною торцевою фрезою з плоскою передньою поверхнею ножів та торцевою фрезою з циліндричною передньою поверхнею ножів. Моделювання проводилось для наступних умов:  $n = 200$  хв<sup>-1</sup>,  $s = 80$  мм/хв,  $t = 1$  мм, інструментальний матеріал ВК8, оброблюваний матеріал – аналог високоміцної сталі 38ХС, діаметр фрез  $D = 200$  мм, кількість ножів  $z = 12$ , ширина обробленої поверхні  $B = 80$ , схема різання – генераторна,  $\gamma = -8^\circ$ ,  $d_{\text{ножа}} = 12,7$  мм (табл. 2).

Результати моделювання  
силового навантаження фрез в середовищі Deform 3d

	Стандартна торцева фреза з круглими пластинами	Торцева фреза з циліндричною передньою поверхнею ножів
Схід стружки та площа контакту стружки		
Сила різання $P_x$		
Сила різання $P_y$		
Сила різання $P_z$		

Таким чином, отримані результати підтверджують, що при різанні ножом з циліндричною передньою поверхнею стружка сходить у напрямку зростання кута нахилу різальної кромки.

Встановлено, що для зазначених умов оброблення максимальна площа контакту стружки з передньою поверхнею для фрези з різальним елементом з циліндричною передньою поверхнею на 31,42% менше, ніж для фрези з круглим різальним елементом з плоскою передньою поверхнею.

Комп'ютерне моделювання показало, що для зазначених умов моделювання торцева фреза з циліндричною передньою поверхнею ножів при ударі на вході в заготовку забезпечила зменшення складових сили різання  $P_x$  та  $P_z$  в 2,4 та 2,07 рази відповідно, при цьому сила  $P_y$  збільшилася в 2,17 рази. Разом з тим, ножі з циліндричною передньою поверхнею обумовлюють зменшення середніх значень складової  $P_z$  сили різання у 2 рази, та збільшення в 9,6 та 1,8 рази відповідно  $P_x$  та  $P_y$ , що узгоджується з результатами фізичного моделювання.



Таким чином, використання ножів з циліндричною передньою поверхнею в конструкції торцевих фрез, призводить до зменшення площі контакту стружки з передньою поверхнею ножа та покращення умов стружковідведення, в результаті чого, забезпечується зменшення силового навантаження на ножі, як в момент врізання в заготовку, так і під час різання.

Отже виникає необхідність дослідження взаємного впливу ступінчастої схеми різання та циліндричної передньої поверхні ножів фрези на процес оброблення плоских поверхонь деталей з ВМ.

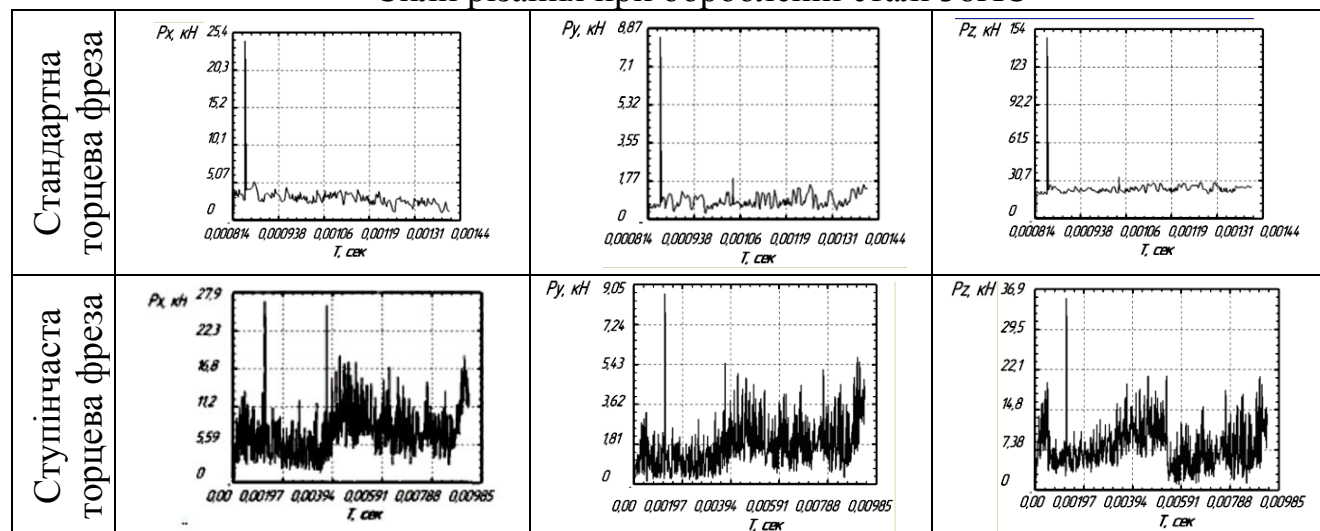
**В четвертому розділі** викладено матеріали експериментальних та виробничих досліджень процесу оброблення плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів торцевими фрезами розробленої та стандартної конструкцій.

Конструктивні параметри розробленої торцевої фрези були налагоджені відповідно до результатів отриманих в розділі 3 для умов роботи з глибиною різання 3 мм (див. табл. 1), схема різання наведена на рис. 3, б.

За допомогою комп'ютерного моделювання процесу фрезерування плоских поверхонь деталей з високоміцної сталі 38ХС, загартованої до твердості 40–45 HRC в середовищі Deform 3d визначено сили різання (табл. 3) для однакових режимів різання ( $D = 200$  мм,  $z = 12$ ,  $B = 80$  мм,  $t = 3$  мм,  $s = 80$  мм/хв,  $n = 200$  хв<sup>-1</sup>) розробленою ступінчастою торцевою фрезою з циліндричною передньою поверхнею ножів ( $\gamma = 16^\circ$ ,  $\alpha = 16^\circ$ ,  $d = 11$  мм) та стандартною торцевою фрезою з круглими пластинами ( $\gamma = -8^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $\lambda = 8^\circ$ ,  $d = 12,7$  мм).

Таблиця 3

Сили різання при обробленні сталі 38ХС



Отримані результати показують, що розроблена фреза при зазначених режимах різання забезпечує зменшення ударних навантажень під час врізання ножа в 4,17 рази для сили  $P_z$  при обробленні високоміцної сталі. Аналогічні дослідження проводились для умов оброблення титанового сплаву, отримано зменшення значень сили  $P_z$  – в 1,1 раз та збільшення  $P_y$  – в 1,09 рази.

Силіві характеристики процесу оброблення без врахування ударів при обробленні високоміцної сталі розробленою фрезою свідчать про зменшення середніх значень складової  $P_z$  сили різання в 1,5 рази, збільшення  $P_x$  – в 2,8 рази



та  $P_Y$  – в 2,7 рази. Аналогічні дослідження при обробленні титанового сплаву показали: зменшення сили  $P_Z$  в 1,41 рази, збільшення сили  $P_X$  – в 2,6 рази та  $P_Y$  – в 1,09 раз при обробленні розробленою торцевою фрезою.

Для порівняльної оцінки впливу стандартної та розробленої конструкції торцевої фрези на динамічні характеристики процесу різання проведено дослідження вібрацій, згідно ISO 7626–1–1994, при обробленні високоміцної сталі 38ХС та титанового сплаву ВТ1-0.

Для зчитування, обробки та запису даних використовувався аналого-цифровий перетворювач Е14-440 виробництва L-Card та п'єзоелектричний віброперетворювач ДН-3-М1, встановлений за напрямком складової  $P_Z$  сили різання, спеціалізоване програмне забезпечення LGraph та персональний комп'ютер. При цьому отримано наступні результати (рис. 10) для оброблення високоміцної сталі 38ХС: при роботі ступінчастою фрезою розмах амплітуди часового сигналу – 1,2 В, при роботі стандартною торцевою фрезою – 1,4 В. Аналогічні дослідження було проведено при обробленні титанового сплаву ВТ1-0 – 1,8 В та 2,0 В відповідно.

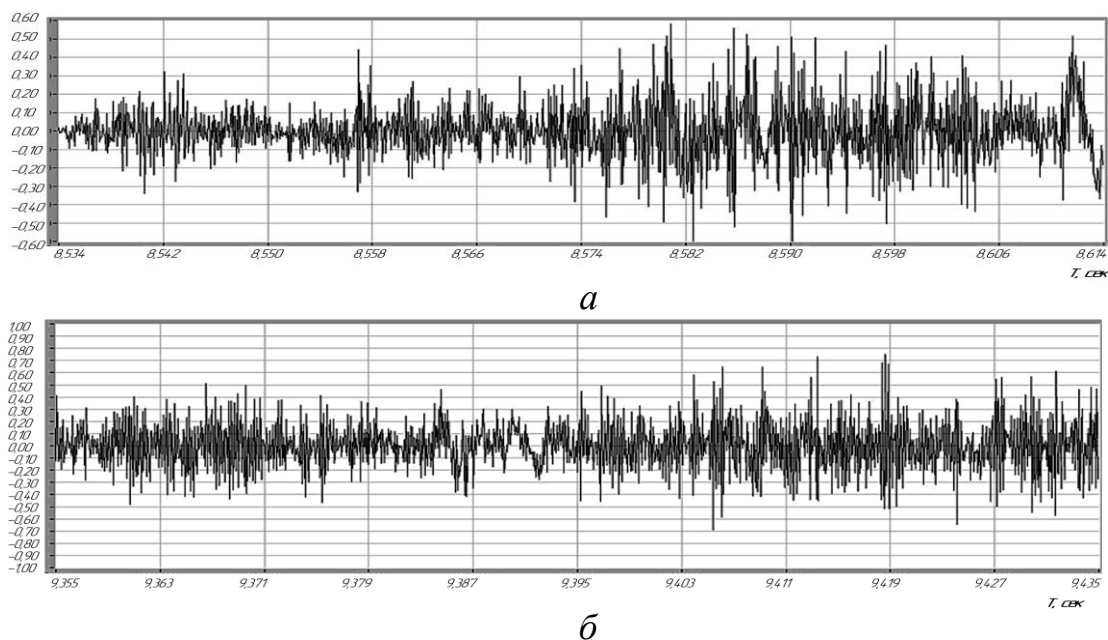


Рис. 10. Вібраційний сигнал при обробленні торцевими фрезами:  
 а – розробленої конструкції; б – стандартної конструкції  
 ( $n = 250$  об/хв,  $s = 80$  мм/хв,  $t = 3$  мм, інструментальний матеріал – ВК8,  
 оброблюваний матеріал – високоміцна сталь 38ХС)

Встановлено, що при зазначених режимах різання при обробленні високоміцної сталі розробленою торцевою фрезою забезпечується інтенсивність вібрацій в 1,17 рази менша, ніж при роботі стандартною фрезою, а при обробленні титанового сплаву – в 1,11 рази менша.

Це означає, що оброблення ступінчастою фрезою плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів, як високоміцних, так і в'язких, призводить до динамічної стабілізації процесу різання. Для оцінки її впливу на шорсткість обробленої поверхні було проведено дослідження профілю поверхні на профілографі-профілометрі мод. Калібр 170311, що оснащений

комп'ютерною вимірювальною системою. Для умов оброблення інструментом з ВК8 високоміцної сталі 38ХС отримані наступні профілограми (рис. 11, а, б).

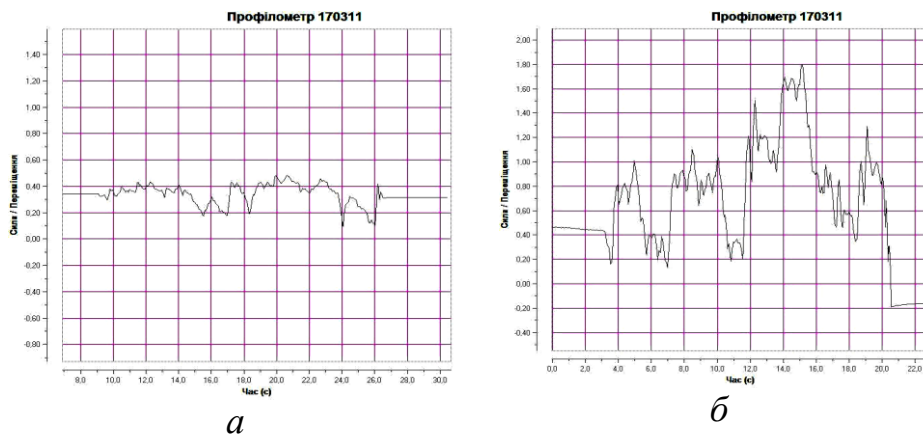


Рис. 11. Профілограма обробленої поверхні:  
 а – ступінчастою торцевою фрезою ( $Ra\ 0,42$ );  
 б – стандартною торцевою фрезою ( $Ra\ 0,82$ )  
 ( $n = 250$  об/хв,  
 $s = 80$  мм/хв,  $t = 3$  мм)

Отже, при обробленні високоміцної сталі 38ХС, загартованої до твердості 40-45 HRC, ступінчаста торцева фрези забезпечує меншу шорсткість обробленої поверхні ніж торцева фреза стандартної конструкції ( $Ra\ 0,42$  та  $Ra\ 0,82$  відповідно) при однакових режимах різання (див. рис. 11).

Таким чином, при застосуванні розробленої ступінчастої торцевої фрези забезпечено підвищення продуктивності оброблення плоских поверхонь з важкооброблюваних матеріалів в 1,27 рази та необхідна якість обробленої поверхні за рахунок збільшення подачі в порівнянні із застосуванням стандартною торцевою фрезою.

## ВИСНОВКИ

У дисертації представлено вирішення актуальної науково-технічної задачі підвищення продуктивності оброблення плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів шляхом застосування торцевих фрез із ступінчастим розташуванням ножів. А саме:

1. Виконано аналіз умов торцевого фрезерування плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів, в результаті чого встановлено, що підвищення продуктивності оброблення можна забезпечити збільшенням подачі, при умові підвищення динамічної стабільності процесу різання за рахунок застосування торцевих фрез прогресивних конструкцій із ступінчастими схемами різання і циліндричною передньою поверхнею ножів.

2. Розроблено нові схеми різання для торцевого фрезерування плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів для умов чорнового, чистового та напівчистового різання, які забезпечують плавність зростання площ зрізу, рівномірність зростання навантаження від чистових ножів до чорнових, практично 100% участю в роботі ножів ТФ (при максимальній глибині різання).

3. Розроблено нову конструкцію експериментальної торцевої фрези діаметром 200 мм із 12 ножами з циліндричною передньою поверхнею, що розташовані на корпусі тороїдальної форми за спіраллю Ферма, яка забезпечує можливість реалізації різних ступінчастих схем різання.

4. На основі розробленої математичної моделі завантаженості круглих різальних кромки торцевої фрези із ступінчастим розташуванням ножів

розраховано та проаналізовано зміну величин елементів зрізу кожного ножа розробленої торцевої фрези на всій дузі контакту інструмента із заготовкою. Досліджено вплив величини подачі, конструктивних параметрів фрези і положення ножа на дузі контакту на товщину, ширину, площу зрізу, в результаті чого визначено їх оптимальні значення та надано рекомендації по вибору раціональних значень конструктивних параметрів торцевої фрези, які забезпечують плавне зростання навантаження на ножі різних ступеней фрези. Так, при глибині фрезерування 3 мм доцільно прийняти кут нахилу різальних вузлів –  $6^\circ$  та задній кут –  $16^\circ$ .

5. В результаті фізичного та комп'ютерного моделювання процесу торцевого фрезерування обґрунтовано доцільність застосування циліндричної передньої поверхні ножів. За допомогою фізичного моделювання встановлено, що тангенціальна складова сили різання при обробленні ножами з циліндричною передньою поверхнею в 1,88–2,00 рази менше, ніж при обробленні круглими пластинами з плоскою передньою поверхнею. За допомогою комп'ютерного моделювання в середовищі Deform 3d, встановлено, що сила удару при врізанні в заготовку для ножа з циліндричною передньою поверхнею ножа близько 2 разів менша, ніж для ножа з плоскою передньою поверхнею.

6. У результаті проведених експериментальних та виробничих досліджень процесу торцевого фрезерування оброблення плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів фрезами розробленої та стандартної конструкції встановлено, що при обробленні високоміцної сталі 38ХС, загартованої до твердості 40 – 45 HRC, ступінчастою фрезою забезпечується зменшення складової  $P_z$  сили різання в 1,5 рази, а при обробленні титанового сплаву – в 1,41 рази. При цьому при зазначених режимах різання при обробленні високоміцної сталі розробленою торцевою фрезою інтенсивність вібрацій в 1,17 рази менша, ніж при роботі стандартною фрезою, а при обробленні титанового сплаву – в 1,11 рази. Разом з тим, встановлено, що ступінчаста ТФ забезпечує зменшення шорсткості поверхні при зазначених режимах різання приблизно до 1,95 разів для високоміцної сталі.

7. Розроблено рекомендації щодо режиму експлуатації ступінчастої торцевої фрези конструкції, реалізація яких забезпечила підвищення продуктивності оброблення плоских поверхонь з важкооброблюваних матеріалів в межах 1,27 рази порівняно з обробленням стандартною торцевою фрезою за рахунок збільшення подачі (з 63 до 80 мм/хв), при цьому шорсткість обробленої поверхні –  $Ra0,42$ .

8. Розроблена ступінчаста торцева фреза та керівні матеріали щодо раціональної експлуатації інструмента передані для впровадження у виробництво на ТОВ «Завод «Металіст» (м. Житомир) для оброблення плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів. При цьому було досягнуто підвищення продуктивності в 1,28 рази з очікуваним річним економічним ефектом 24107 грн.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у наукових фахових виданнях*

1. Глембоцька, Л. Є. Аналіз умов стабільної роботи торцевих фрез [Текст] / Л.Є. Глембоцька, П.П. Мельничук // Вестник НТУ "ХПИ", м. Харків, 2003. – № 1, т.8. – С. 55–68. *Здобувачем запропоновано конструктивне рішення складових елементів інструментальних блоків (фреза, допоміжний інструмент, шпindel) та з'єднань для забезпечення стабільної роботи торцевих фрез.*

2. Глембоцька, Л. Є. Проектування різальної частини ножа торцевої фрези [Текст] / Л.Є. Глембоцька // *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*. Житомирський державний технологічний університет, 2005 – вип. 2 – С. 184–196.

3. Глембоцька, Л. Є. Схеми різання при обробці торцевими фрезами плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів [Текст] / Л.Є. Глембоцька, П.П. Мельничук // *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. 2006. – №3(38) – С. 3–10. *Здобувачем проведено аналіз існуючих схем різання торцевими фрезами, розроблено нові ступінчасті схеми різання.*

4. Глембоцька, Л. Є. Особливості конструкції торцевої фрези для обробки плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів [Текст] / Л.Є. Глембоцька, П.П. Мельничук // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*. м. Краматорськ, 2007. – вип. 21. – С. 58-68. *Здобувачем запропоновано нову конструкцію торцевої фрези для обробки плоских поверхонь деталей з ВОР.*

5. Мельничук П.П. Моделювання силових залежностей при торцевому фрезеруванні [Текст] / П.П. Мельничук, Л.Є. Глембоцька // *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. м. Тернопіль, 2008. – №3 – С. 78–87. *Здобувачем проведені експерименти, виконано узагальнення експериментальних результатів.*

6. Глембоцька, Л. Є. Оптимізація режимів різання при торцевому фрезеруванні плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів [Текст] / Л.Є. Глембоцька, П.П. Мельничук, В.О. Черпицький // *Вісник ЖДТУ*. м. Житомир, 2009. – №1(48) / Технічні науки – С. 34–40. *Здобувачем виконано дослідження впливу режимів різання на якісні показники обробки плоских поверхонь деталей, проаналізовано результати експериментів та підготовлено статтю.*

### *Статті, що входять до міжнародних наукометричних баз*

7. Глембоцька, Л. Є. Вдосконалення процесу торцевого фрезерування загартованих сталей: проблеми, пропозиції, обґрунтування [Текст] / Л.Є. Глембоцька, П.П. Мельничук // *Вісник ЖДТУ*. м. Житомир, 2010. – №2(53) – том I / Технічні науки – С. 3–15. *Здобувачем науково-теоретичне обґрунтування підходу до проектування торцевих ступінчастих фрез.*

8. Глембоцька, Л. Є. Обґрунтування актуальності обробки плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів [Текст] / Л.Є. Глембоцька // *Вісник ЖДТУ*. – 2014. – №4(71), – С. 22-25.

9. Балицька Н. О. Шляхи удосконалення конструкції торцевих фрез для чистового різання [Текст] / Н. О. Балицька, Л. Є. Глембоцька // *Вісник Хмельницького національного університету*. 2016. – № 4 / Технічні науки – С. 31–39.

*Здобувачем проаналізовано основні недоліки існуючих конструкцій торцевих фрез та запропоновано підхід до удосконалення конструкцій торцевих фрез.*

10. Hlembotska L. Modelling the loading of the nose-free cutting edges of face mill with a spiral-stepped arrangement of inserts / L. Hlembotska, P. Melnychuk, N. Balytska, O. Melnyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – №1/1(91)2018. – P. 46–54. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.121712. *Здобувачем розроблено математичну модель завантаженості різальних кромок циліндричних ножів розробленої торцевої ступінчастої фрези, та обґрунтовано результати моделювання.*

### **Патенти**

11. Патент № 78120, МПК(2007) B23C5/02, B23C5/16 / Різальний інструмент / Л. Є. Глембоцька; заявник та патентовласник Житомирський державний технологічний університет. - № а 200504170, заявл. 29.04.2005; надр. 15.02.2007, БЮЛ. № 2.

### **Опубліковані праці апробаційного характеру, серед них:**

12. Глембоцька, Л. Є. Конструктивне рішення торцевих фрез на основі диференційної схеми різання [Текст] /Л.Є. Глембоцька // Тези доповідей першої Міжнародної науково-технічної конференції "Машинобудування та металообробка-2003". – Кіровоград: КДТУ, 2003. – С. 56–58.

13. Глембоцька, Л. Є. Торцева фреза для обробки плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів [Текст] / Л.Є. Глембоцька // ХХХ наукова конференція, присвячена 45-ій річниці ЖДТУ 10-17 березня – Житомир: ЖДТУ, 2005 – С. 42.

14. Глембоцкая, Л. Е. Процесс чистового торцевого фрезерования: проблемы и предложения [Текст] / Л. Е. Глембоцкая, Н. А. Балицкая, А. Л. Мельник // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 17-го Международного научно-технического семинара, 20-24 февраля 2017г., Свалява. Киев: АТМ України, 2017. – С. 84-86.

15. Глембоцька, Л. Є. Визначення положення активної ділянки різальної кромки торцевої фрези з циліндричною передньою поверхнею ножів [Текст] / Л.Є. Глембоцька, П.П. Мельничук, Н.О. Балицька // Обладнання і технології сучасного машинобудування: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції присвяченої пам'яті заслуженого винахідника України, академіка АН вищої школи України, доктора технічних наук, професора Нагорняка С.Г., 11–12 травня 2017 р. м. Тернопіль. – С. 58.

16. Glembotska L. Underformed chip thickness for machining face milling cutters with cylindrical face and flat flank [Text] / L. Glembotska, P. Melnychuk, N. Balytska // "Сучасні технології промислового комплексу" – 2017, ХНТУ, Херсон, 2017. – р. 83–85.

### **Анотація**

*Глембоцька Л.Є. Підвищення продуктивності оброблення плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів шляхом застосування торцевих фрез із ступінчастим розташуванням ножів. – Рукопис.*

*Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти. –*

Житомирський державний технологічний університет, м. Житомир, 2018.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню продуктивності оброблення плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів за рахунок розробки та використання нових конструкцій торцевих фрез із ступінчастим розташуванням ножів з циліндричною передньою та плоскою задньою поверхнями за рахунок збільшення подачі, та які забезпечують кращу динамічну стабільність порівняно із стандартними торцевими фрезами. Здійснено аналіз теоретичних передумов розробки нових конструкцій торцевих фрез та виділено головні фактори, які визначають продуктивність процесу фрезерування. Розроблено конструкцію експериментальної регульованої торцевої фрези, яка забезпечує можливість реалізації різних ступінчастих схем різання. Розроблено математичну модель завантаженості різальних кромки ступінчастої торцевої фрези та сформульовано рекомендації по призначенню раціональних конструктивних параметрів інструмента для конкретного значення глибини різання. Виконано експериментальні та виробничі дослідження процесу оброблення плоских поверхонь деталей торцевими фрезами ступінчастої та стандартної конструкцій та розроблено рекомендації щодо режимів експлуатації ступінчастої торцевої фрези, використання яких забезпечує підвищення продуктивності оброблення плоских поверхонь деталей з важкооброблюваних матеріалів. Результати роботи пройшли виробничу апробацію.

**Ключові слова:** продуктивність оброблення, торцеве фрезерування, торцева фреза, ступінчасті схеми різання, важкооброблювані матеріали, циліндрична передня поверхня.

#### **Анотація**

**Глембоцкая Л.Е.** Повышение производительности обработки плоских поверхностей деталей из труднообрабатываемых материалов путем применения торцевых фрез со ступенчатым расположением ножей. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 – Процессы механической обработки, станки и инструменты. Житомирский государственный технологический университет, г. Житомир, 2018.

Диссертационная работа посвящена повышению производительности обработки плоских поверхностей деталей из труднообрабатываемых материалов за счет разработки и использования новых конструкций торцевых фрез со ступенчатым расположением ножей с цилиндрической передней и плоской задней поверхностями, которые обеспечивают лучшую динамическую стабильность по сравнению со стандартными торцевыми фрезами. Осуществлен анализ теоретических предпосылок разработки новых конструкций торцевых фрез для обработки плоских поверхностей деталей из труднообрабатываемых материалов и выделены главные факторы, определяющие производительность процесса фрезерования. Разработаны ступенчатые схемы резания торцевых фрез для различных условий обработки и новая конструкция экспериментальной регулируемой торцевой фрезы для реализации разных ступенчатых схем резания. Разработана математическая модель загруженности режущих кромок предложенной

ступенчатой торцевой фрезы для расчета и исследования изменения величин элементов среза ножей в зависимости от конструктивных параметров и величины подачи на всей дуге контакта инструмента с заготовкой. На основе математической модели сформулированы рекомендации по назначению рациональных конструктивных параметров инструмента для конкретного значения глубины резания. Выявлено наиболее рациональную форму передней поверхности режущих элементов, которая обеспечивает уменьшение динамической нагрузки на нож. Выполнены экспериментальные и производственные исследования процесса обработки плоских поверхностей деталей из труднообрабатываемых материалов торцевыми фрезами разработанной и стандартной конструкций. Разработаны рекомендации по режимам эксплуатации ступенчатой торцевой фрезы, использование которых обеспечит повышение производительности обработки плоских поверхностей деталей из труднообрабатываемых материалов. Результаты работы прошли производственную апробацию.

**Ключевые слова:** производительность обработки, торцовое фрезерование, торцовая фреза, ступенчатые схемы резания, труднообрабатываемые материалы, цилиндрическая передняя поверхность.

### Abstract

**Hlembotska L.Ye.** Productivity improvement of machining flat surfaces of parts from difficult-to-cut materials through the use of face mills with a stepped arrangement of inserts. - Qualification scientific work with the manuscript copyright.

The dissertation on reaching of a scientific degree of the candidate of engineering science on a specialty 05.03.01 – Machining processes, machines and cutting tools. – Zhytomyr State Technological University, Zhytomyr, 2018.

The dissertation is devoted to increase of process productivity of flat surfaces of parts from difficult-to-cut materials at the expense of development and use of new designs of face mills with a stepped arrangement of inserts with cylindrical front and flat rear surfaces, which provide better dynamic stability in comparison with standard face mills. The analysis of theoretical preconditions for the development of new designs of face mills is made and the main factors determining the productivity of the milling process are highlighted. The design of an experimental adjustable face mill cutter is developed, which ensures the possibility of implementing various step cutting schemes. The mathematical model of the loading of the cutting edges of the stepped end cutter is developed and the recommendations for designing rational structural parameters of the tool for the specific value of the cutting depth are formulated. Experimental and industrial researches of the process of processing of flat surfaces of parts by the end mills of step and standard constructions are executed, and recommendations concerning operating modes of the step-shaped cutter cutters are used, the use of which provides an increase in the productivity of the processing of flat surfaces of parts from hard-working materials. The results of work have passed industrial approbation.

**Key words:** process productivity, face milling, face mill, stepped cutting schemes, difficult- to-cut materials, cylindrical front surface.

---

Підписано до друку: 30.03.2018.  
Папір друк. Друк офсетний  
Тираж 100 прим.

Формат 60×90 1/16.  
Обсяг 0,9 ум.-друк. арк.  
Зам. № 26

---

Житомирський державний технологічний університет  
10005, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103. Тел.: +38(0412)24-14-22  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи  
ЖТ № 08 від 26.03.2004 р.