

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

**СЕРЕДЕНКО БОГДАН МИКОЛАЙОВИЧ**

**УДК 621.914.22 : 004.942**

**3-D моделювання процесу фрезерування сферичними кінцевими  
фрезами**

Спеціальність 8.05050302 – інструментальне виробництво

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
магістр**

**Київ – 2014**

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування імені П.Р. Родіна Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор  
**Равська Наталія Сергіївна**  
Національний технічний університет України «КПІ»,  
м. Київ, професор кафедри інтегрованих технологій  
машинобудування імені П.Р. Родіна

**Рецензент** доктор технічних наук, професор  
**Стругинський Василь Борисович**  
Національний технічний університет України «КПІ»,  
м. Київ, завідувач кафедри конструювання верстатів  
та машин

**Консультант з  
економічних питань**

**Консультант з  
охорони праці та  
техніки безпеки** кандидат технічних наук, доцент  
**Фоменко Ігор Олександрович**  
Національний технічний університет України «КПІ»,  
м. Київ, доцент кафедри охорони праці, промислової  
та цивільної безпеки

Захист відбудеться „\_\_\_” червня 20\_\_ року об \_\_\_ годині на засіданні ДЕК кафедри інтегрованих технологій машинобудування імені П.Р. Родіна НТУУ «КПІ» за адресою, 03056, м. Київ, вул. Борщагівська 115, к.615-22

З дисертацією можна ознайомитись на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування імені П.Р. Родіна НТУУ «КПІ» за адресою, 03056, м. Київ, вул. Борщагівська 115, к.611

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність досліджень** Однією з актуальних тем в сучасному машинобудуванні є підвищення продуктивності процесу різання, зокрема максимальне використання ресурсу, закладеного в різальний інструмент. Особливо важливим це питання є при обробці загартованих сталей, що мають високі фізико-механічні властивості і відносяться до складнооброблюваних матеріалів.

З розвитком технологій, лідируючі позиції в одиничній та дрібносерійній обробці складнопрофільних поверхонь займає фрезерування на верстатах з ЧПК сферичними кінцевими фрезами (обробка матриць, пресформ і т.д.). Зокрема в умовах високошвидкісної обробки, цей процес є дуже ефективним. Сьогодні вдосконалення процесу високошвидкісного фрезерування є актуальними питаннями.

Одним із перспективних напрямків є 3D моделювання цього процесу. Моделюванню процесу фрезерування присвячені декілька робіт, проте питання високошвидкісної обробки в цих роботах не розглянуто.

Тому питання визначення можливості прогнозування працездатності сферичних кінцевих фрез при високошвидкісній обробці загартованих сталей з використанням 3D моделювання є актуальною проблемою і має велике практичне значення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Магістерська дисертація виконана на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування в Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут" і є частиною досліджень проведених кафедрою.

### **Мета і задачі дослідження.**

Метою дослідження є визначення можливостей прогнозування працездатності сферичних кінцевих фрез на основі 3D моделювання процесу різання МСЕ.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі задачі:

1. Аналіз методів прогнозування працездатності різального інструменту.
2. Обґрунтування вибору програмного продукту, що забезпечує процес моделювання.
3. Розробка моделі геометричної взаємодії сферичної кінцевої фрези та оброблюваної заготовки.
4. Розробка моделі розрахунку сили різання і напружено-деформованого стану.
5. Перевірка моделі шляхом порівняння з експериментальними даними.
6. Дослідження зміни сил різання в залежності від умов обробки і напружено-деформований стан фрези.

**Об'єкт дослідження** – процес моделювання фрезерування сферичними кінцевими фрезами.

**Предмет дослідження** – напружено-деформований стан сферичної кінцевої фрези при обробці загартованих сталей.

**Методи дослідження.** Виконані дослідження базуються на методах теорії проектування різальних інструментів, теорії різання матеріалів, математичного моделювання та моделювання за допомогою методу скінченних елементів.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

Показана можливість часткової заміни експериментальних досліджень на процес 3D моделювання методом скінченних елементів.

Створена модель фрезерування сферичною кінцевою фрезою загартованої сталі з твердістю 55HRC<sub>э</sub>.

Проаналізовано напружено-деформований стан фрези, та показано залежність сил різання від твердості оброблюваного матеріалу.

**Практичне значення отриманих результатів.**

Освоєна методика моделювання процесу фрезерування сферичними кінцевими фрезами та визначення напружено-деформованого стану інструменту. На основі напружено-деформованого стану можливо визначати найбільш навантажені ділянки та підвищити працездатність за рахунок підбору оптимальних умов різання.

**Публікації.** По темі магістерської дисертації 1 стаття подана до друку, 2 тез на студентській конференції.

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 43 найменувань на 4 стор., 4 додатків. Основний текст дисертації викладено на 90 стор. Повний обсяг становить 112 стор.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність вибраної теми, сформульовано мету, об'єкт, предмет дослідження і задачі, які були розглянуті у роботі.

У **першому розділі** проаналізовано область застосування сферичних кінцевих фрез, зокрема при обробці формоутворюючої оснастки з загартованих сталей. В сучасному машинобудуванні для обробки оснастки використовується швидкісна обробка, особливостями якої є малий перетин зрізаного шару, в поєднанні з високою швидкістю різання та мінімальна подача на зуб, з глибиною різання не більше 10% діаметра.

Розглянуто основні методи дослідження працездатності різального інструменту, та встановлено, що процес 3D моделювання є досить перспективним. Тому було виконано аналіз програмних продуктів, що забезпечують моделювання МСЕ.

У **другому розділі** розроблена методика та 3-D модель моделювання процесу фрезерування на базі МСЕ з використанням вирішувача *LS-Dyna*. Визначений напружено-деформований стан сферичної кінцевої фрези при обробці сталі різної твердості (рис. 1), а сили різання при моделюванні.

Моделювання напруженого стану інструменту не показало значних концентрацій напружень в зоні виходу стружкової канавки. Найбільші

напруження виникали безпосередньо в зоні різання, зокрема на різальній кромці. Проаналізувавши напружено-деформований стан, було відмічено, що максимальні напруження при обробці сталі з твердістю 40 HRC<sub>э</sub> вищі, ніж при обробці сталі з твердістю в 55 HRC<sub>э</sub>. Це явище пов'язане з процесом крихкого руйнування, оскільки при збільшенні твердості оброблюваного матеріалу, його крихкість також підвищується. Це призводить до зміни типу стружки, перехід від пластичного до крихкого руйнування, і як наслідок, до зниження сил різання.

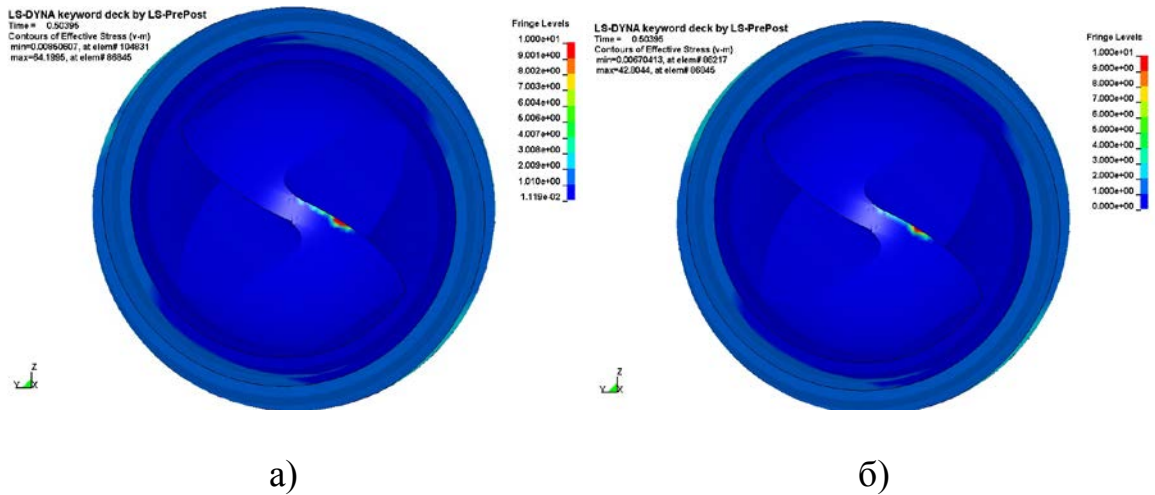


Рисунок 2.16 Напруження фрези при обробці сталі 5ХНМ

а) 40 HRC<sub>э</sub> б) 55 HRC<sub>э</sub>

У **третьому розділі** проведено теоретичне дослідження зусиль різання, що виникають при фрезеруванні сферичними фрезами. Було проведено визначення сил різання на диференціально малій ділянці кромки. Також визначено величину зрізуваного шару в звичайних умовах фрезерування та з урахуванням кута випередження фрези.

У **четвертому розділі** було проведено ряд натурних експериментів для підтвердження результатів моделювання. Визначені зусилля різання при фрезеруванні сталей різної твердості. За результатами експерименту встановлено, що для однакових режимів різання, але різної твердості оброблюваного матеріалу значення складових сили різання відрізняються.

Аналізуючи дані табл.1, найбільша похибка, що виникає при визначенні сил різання не перевищує 25%, що є добрим результатом. Важливим результатом є те, що як і при аналізі напружено деформованого стану, сили різання при обробці сталі з більшою твердістю виявилися меншими, ніж при обробці сталі з твердістю 40 HRC<sub>э</sub>.

Таблиця 1

## Порівняння результатів експерименту і моделювання

	55 HRC					40 HRC				
	P <sub>x</sub>	P <sub>y</sub>	P <sub>z</sub>	P <sub>рез</sub>	δ, %	P <sub>x</sub>	P <sub>y</sub>	P <sub>z</sub>	P <sub>рез</sub>	δ, %
Експеримент	57	48	38	84	-	22	37	91	100	-
Аналітичний	59,2	47,4	41,2	88,3	4,8	24,6	32,8	112,6	119,8	16,5
Моделювання	51	44	46	81	3,5	27,3	43,9	109	120,6	17,1

У п'ятому розділі приведений аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, діючих при роботі в робочому приміщенні розглянуті загальні вимоги щодо використання комп'ютерів в приміщеннях. Розроблені рекомендації для збереження здоров'я оператора ПК, а також заходи щодо зниження можливої дії шкідливих і усуненню небезпечних чинників при роботі за ПК. Розглянуті норми щодо організації робочого місця, його освітлення, мікроклімату, тощо.

## ВИСНОВКИ

В результаті проведення дослідження процесу фрезерування сферичною кінцевою фрезою з ВК8 загартованої сталі 5ХНМ з твердістю 40 і 55 HRC отримані наступні результати:

1. Проаналізовано шляхи підвищення працездатності сферичних кінцевих фрез та відмічено перспективність використання методу 3D моделювання.
2. Обґрунтовано вибір програмного продукту, що забезпечує можливість 3D моделювання процесу фрезерування МСЕ.
3. Розроблена 3D модель процесу фрезерування. Виконано вимірювання сил різання та аналіз напружено-деформованого стану.
4. Запропонована методика експериментальних досліджень.
5. Виконано перевірку результатів моделювання шляхом порівняння з експериментальними даними. Похибка вимірювання сил різання не перевищила 25%.
6. При моделюванні процесу фрезерування заготовок різної твердості відмічено, що при обробці сталі з твердістю 55 HRC результуюча складова сил різання нижча, ніж при обробці сталі з твердістю 40 HRC.
7. Аналіз напружено деформованого стану показав концентрацію напружень безпосередньо в зоні різання на різальній кромці. Також відмічено незначні концентрації напружень в зоні виходу стружкової канавки.

## СПИСОК ДРУКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ДОПОВІДІ КОНФЕРЕНЦІЯХ

1. Визначення товщини зрізу при фрезеруванні сферичними фрезами / В.В. Вовк, Б.М. Середенко // загальноуніверситетська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки. – К., 2014 – С. 81-82.

2. Визначення напружено-деформованого стану твердосплавних сферичних фрез в умовах швидкісної обробки / Н.С. Равська, Б.М. Середенко // загальноуніверситетська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки. – К., 2014 – С. 83-84.

### АНОТАЦІЯ

#### **Середенко Б.М. 3D моделювання процесу фрезерування сферичними кінцевими фрезами**

Дисертація на здобуття наукового ступеня магістра за спеціальністю 8.05050302 – інструментальне виробництво. – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". – Київ, 2014

Проаналізувавши сучасні методи дослідження сферичних кінцевих фрез, порівнявши їх переваги та недоліки, для дослідження процесу фрезерування було обрано метод скінченних елементів. Даний метод дозволив визначити зусилля різання, провести аналіз напружено-деформованого стану фрези при обробці сталі різної твердості.

В дисертації приведено основи аналітичного розрахунку зусиль різання при фрезеруванні, а також детально описано методику створення 3D моделі процесу фрезерування в програмному середовищі LS-Dyna та приведені результати моделювання.

Проведено експериментальну перевірку результатів моделювання та встановлено, що метод скінченних елементів може частково замінити експериментальні дослідження, а також зменшити їх вартість та затрати часу на їх проведення.

**Ключові слова.** *Метод скінченних елементів, моделювання, сферична кінцева фреза, напружено-деформований стан, зусилля різання.*

### АННОТАЦІЯ

#### **Середенко Б.М. 3D моделирование процесса фрезерования сферическими концевыми фрезами**

Диссертация на соискание ученой степени магистра по специальности 8.05050302 – инструментальное производство. – Национальный технический университет Украины „Киевский политехнический институт. – Киев, 2014

Проанализировав современные методы исследования сферических концевых фрез, сравнив их преимущества и недостатки, для исследования процесса фрезерования был выбран метод конечных элементов. Данный метод позволил определить усилия резания, провести анализ напряженно-деформируемого состояние фрезы при обработке стали разной твердости.

В диссертации приведены основы аналитического расчета усилий резания при фрезеровании, а также детально описана методика создания 3D модели процесса фрезерования в программном обеспечении LS-Dyna и приведены результаты моделирования.

Проведена экспериментальная проверка результатов моделирования и установлено, что метод конечных элементов может частично заменить экспериментальные испытания, а также уменьшить их стоимость и затраты времени на их проведение.

**Ключевые слова.** *Метод конечных элементов, моделирование, сферическая концевая фреза, напряженно-деформированное состояние, усилия резания.*

## ABSTRACT

### **Bohdan Seredenko. 3D modeling of the milling process using spherical end mills**

MSc thesis by specialty 8.05050302 – Tool Production. – National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”. – Kyiv, 2014

Analyzing modern methods of research spherical end mills, comparing their advantages and disadvantages, to study the milling process was chosen finite element method. This method allowed to determine the cutting forces, to analyze the stress-strain state in mills of steel with different hardness.

In the dissertation basis of analytical calculation of the cutting forces in milling and describes in detail the methodology of creating a 3D model of the milling process in the software LS-Dyna and simulation results.

An experimental verification of the simulation results and found that the finite element method can partially replace experimental tests, as well as reduce their cost and time required for their implementation.

**Key words.** *Finite Elements Methods, Modeling, spherical end mills, Stress-Strain State, cutting force.*