Міністерство освіти і науки України

Житомирський державний технологічний університет

На правах рукопису

Штегін Олексій Олександрович

УДК 621.914.1

ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ

ФРЕЗЕРУВАННЯ ПРОСТОРОВО-СКЛАДНИХ ПОВЕРХОНЬ

ДЕТАЛЕЙ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ

ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОБРОБЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник

Полонський Леонід Григорович,

доктор технічних наук,

професор

Житомир – 2017

2

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ......................................... 5

ВСТУП ......................................................................................................................... 7

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ ПІДВИЩЕННЯ

ПРОДУКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ПРОСТОРОВО-СКЛАДНИХ

ПОВЕРХОНЬ............................................................................................................. 13

1.1. ЗВ'ЯЗОК МІЖ ПРОДУКТИВНІСТЮ ОБРОБКИ ТА ПОКАЗНИКАМИ ТОЧНОСТІ

ФОРМИ ОБРОБЛЕНИХ ПРОСТОРОВО-СКЛАДНИХ ПОВЕРХОНЬ ....................................... 13

1.2. ШЛЯХИ ДОСЯГНЕННЯ ЗАДАНИХ ПОКАЗНИКІВ ТОЧНОСТІ ФОРМИ

ПРОСТОРОВО-СКЛАДНИХ ПОВЕРХОНЬ ......................................................................... 19

1.3. ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ З ДОСЯГНЕННЯМ ЗАДАНИХ

ПОКАЗНИКІВ ТОЧНОСТІ ФОРМИ ПРОСТОРОВО-СКЛАДНИХ ПОВЕРХОНЬ ПРИ

ОБ’ЄМНОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ......................................................................................... 24

1.4. ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 1.................................................................................... 39

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ РЕЄСТРАЦІЇ ТА АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ

ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОБРОБЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ......................................... 43

2.1. МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМИХ СКЛАДОВИХ СИЛИ РІЗАННЯ ПРИ ОБРОБЦІ

КІНЦЕВИМИ СФЕРИЧНИМИ ФРЕЗАМИ........................................................................... 43

2.1.1. Опис факторів, що впливають на питомі складові сили різання ............... 43

2.1.2. Методика проведення аналізу осцилограми та розрахунку питомих

складових сили різання............................................................................................. 47

2.2. МОДАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОБРОБЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ.................... 50

2.2.1. Моди вібрацій технологічної оброблювальної системи ............................. 50

2.2.2. Методика проведення модального аналізу технологічної

оброблювальної системи .......................................................................................... 51

2.3. МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙНОГО СИГНАЛУ ПРИ ОБРОБЦІ РІЗАННЯМ............... 57

2.3.1. Методи аналізу сигналів у частотній області............................................... 59

2.3.2. Методи аналізу сигналів у частотно-часовій області.................................. 61

2.3.3. Методика аналізу низькочастотних складових вібросигналу .................... 64

2.4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ АНАЛІЗУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ................................................................................................. 67

3

2.5. ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 2.................................................................................... 68

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЬ ВІБРАЦІЙ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОБРОБЛЮВАЛЬНОЇ

СИСТЕМИ ПРИ ОБРОБЦІ ПРОСТОРОВО-СКЛАДНИХ ПОВЕРХОНЬ

КІНЦЕВИМИ СФЕРИЧНИМИ ФРЕЗАМИ........................................................... 71

3.1. ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОБРОБЛЮВАЛЬНОЇ

СИСТЕМИ...................................................................................................................... 71

3.1.1. Перетворення Лапласа.................................................................................... 71

3.1.2. Передавальна функція технологічної оброблювальної системи................ 74

3.2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОЛИВАНЬ ПРИ ОБРОБЦІ ПРОСТОРОВО-СКЛАДНИХ

ПОВЕРХОНЬ КІНЦЕВИМИ ФРЕЗАМИ .............................................................................. 79

3.3. ГЕОМЕТРІЯ ШАРУ, ЩО ЗРІЗУЄТЬСЯ, ПРИ ОБРОБЦІ ПРОСТОРОВО-СКЛАДНИХ

ПОВЕРХОНЬ КІНЦЕВИМИ СФЕРИЧНИМИ ФРЕЗАМИ ....................................................... 82

3.3.1. Зміна миттєвого січення шару, що зрізується, при обробці

просторово-складних поверхонь кінцевими сферичними фрезами..................... 82

3.3.2. Визначення кутів контакту зуба фрези та шару, що зрізується, при

обробці просторово-складних поверхонь кінцевими сферичними фрезами ...... 85

3.4. ПОБУДОВА ДІАГРАМ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ДЛЯ ВИПАДКУ ОБРОБКИ

ПРОСТОРОВО-СКЛАДНИХ ПОВЕРХОНЬ КІНЦЕВИМИ СФЕРИЧНИМИ ФРЕЗАМИ .............. 97

3.5. ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 3.................................................................................. 105

РОЗДІЛ 4. ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ВТРАТИ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ

ТА ВИНИКНЕННЯ ВІБРАЦІЙ ПРИ ЗМІНІ ПАРАМЕТРІВ ОБРОБКИ ДЛЯ

ЗБІЛЬШЕННЯ ЇЇ ПРОДУКТИВНОСТІ................................................................ 108

4.1. ОБҐРУНТУВАННЯ ПОЧАТКОВИХ ПАРАМЕТРІВ ДОСЛІДЖУВАНОЇ

ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОБРОБЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ........................................................... 108

4.2. СКЛАДОВІ СИЛИ РІЗАННЯ ПРИ ОБРОБЦІ ПРОСТОРОВО-СКЛАДНИХ ПОВЕРХОНЬ

КІНЦЕВИМИ СФЕРИЧНИМИ ФРЕЗАМИ......................................................................... 112

4.3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРАЦІЙ ПРИ ОБРОБЦІ ПРОСТОРОВО-СКЛАДНИХ ПОВЕРХОНЬ

КІНЦЕВИМИ СФЕРИЧНИМИ ФРЕЗАМИ......................................................................... 118

4.4. ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ПРОСТОРОВОСКЛАДНИХ ПОВЕРХОНЬ КІНЦЕВИМИ СФЕРИЧНИМИ ФРЕЗАМИ................................... 133

4

4.5. ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 4.................................................................................. 138

ВИСНОВКИ............................................................................................................. 140

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ............................................................... 143

ДОДАТКИ................................................................................................................ 154

ДОДАТОК А. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕРСТАТНОГО ОБЛАДНАННЯ,

ЗАДІЯНОГО У ПРОВЕДЕНІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ...... 155

ДОДАТОК Б. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОПОМІЖНОГО ОБЛАДНАННЯ,

ЗАДІЯНОГО У ПРОВЕДЕНІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ...... 160

ДОДАТОК В. ПРОТОКОЛИ ВИМІРЮВАНЬ ШОРСТКОСТІ

ОБРОБЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ КОНТРОЛЬНИХ ЗРАЗКІВ................................ 164

ДОДАТОК Г. ТЕКСТ ПРОГРАМИ ДЛЯ ПОБУДОВИ ДІАГРАМ

ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ЗА ЗАПРОПОНОВАНИМ АЛГОРИТМОМ В

СЕРЕДОВИЩІ MATLAB 2013B........................................................................... 168

ДОДАТОК Д. АКТ І ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ................................................................ 169

ДОДАТОК E. ДОВІДКА ПРО ВИКОНАННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО

ДОСЛІДЖЕННЯ В РАМКАХ БЮДЖЕТНОЇ ПРОГРАМИ............................... 171

ДОДАТОК Є. СПЕКТРИ ДЕЯКИХ ВІБРОСИГНАЛІВ В ЧАСТОТНІЙ

ОБЛАСТІ.................................................................................................................. 172

ДОДАТОК Ж. ФОТОЗНІМКИ ПОВЕРХОНЬ, ОБРОБЛЕНИХ З МАЛИМИ

ЗНАЧЕННЯМИ КУТА УПЕРЕДЖЕННЯ (ДО 22˚30ˈ)....................................... 175

ДОДАТОК З. СПЕКТРИ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ У ЧАСТОТНОЧАСОВІЙ ОБЛАСТІ............................................................................................... 179

ДОДАТОК І. СКЛАДОВІ СИЛИ РІЗАННЯ ДЛЯ РІЗНИХ УМОВ

ОБРОБКИ................................................................................................................. 190

ВИСНОВКИ

Удисертаціїпредставленоновевирішенняактуальноїпроблеми

підвищенняпродуктивностіпроцесуобробкипросторовоскладних

поверхоньдеталейкінцевимисферичнимифрезамишляхомзабезпечення

динамічноїстійкостітехнологічноїоброблювальноїсистемиЗа

результатамироботизробленонаступнівисновки

Аналізсучасногостанупитанняпідвищенняпродуктивності

обробкипросторовоскладнихповерхоньзалітературнимиджерелами

показавщодананауковотехнічназадачанеєостаточновирішеноюза

рахунокможливостізабезпеченнядинамічноїстійкостіТОСпри

використаннівякостіоброблювальнихінструментівкінцевихсферичних

фрез

АналізвпливудинамічнихпараметрівТОСірежиміврізанняна

продуктивністьобробкипризабезпеченніосновноготехнологічного

параметра—точностіформи—показавщонайбільшоюміроюнаце

впливаємодальнажорсткістьТОСнасампереднайбільшпіддатливихїї

елементівтомущовнаслідоквтратидинамічноїстійкостіТОСчерез

виникненнявібраційнаповерхніутворюєтьсявібраційнийслідякий

унеможливлюєподальшуефективнуобробкукінцевимисферичними

фрезами

Дослідженнязониконтактурізальноїкромкизізрізуванимшаром

приобробціпросторовоскладнихповерхонькінцевимисферичними

фрезамитавизначеннямоментівпочаткутазавершеннязрізування

частиниабовсьогоприпускузубомфрезиікутаконтактуміжзубомфрези

тазрізуванимшаромдовелищовнаслідокдіїсилирізанняуТОСпри

входізубаузаготовкувиникаютьїївимушеніколиванняапіслявиходу

зубафрезиідомоментуврізаннянаступногозубамаютьмісцевільні

коливанняТОСЦеозначаєщокутконтактуєоднимізфакторівщо



призводятьдозмінудинаміціпроцесуобробкиідлязабезпечення

динамічноїстійкостіТОСйогонеобхідновизначатианалітично

Дослідженняхарактерузмінискладовихсилирізанняпризміні

кутаупередженняпідчасобробкипросторовоскладнихповерхонь

кінцевимисферичнимифрезамидовелощотангенціальнаскладовасили

різаннябезпосередньозалежитьвідшвидкостірізанняа

опосередковано—відкутаупередженнярадіальнатаосьоваскладові

силирізанняперерозподіляютьсявзалежностівідвеличиникута

упередженняКоливаннякінцевоїсферичноїфрезиякнайбільш

піддатливогоелементуТОСщомаєзначноменшужорсткістьв

радіальномунапрямкуаніжвосьовомусамепризбільшеннірадіальної

складовоїсилирізанняматимутьнезатухаючийхарактерпризбільшенні

амплітудищопрямосвідчитьпровтратудинамічноїстійкостіТОС

Розробленаматематичнамодельвібраційдляаналітичного

дослідженнядинамічноїстійкостіТОСщовраховуєнелінійнузміну

складовихсилирізанняприрізнихзначенняхкутаупередженнятаописує

ТОСяксистемуздекількомаступенямивільностівраховуючиефект

запізненнясилирізаннядаєможливістьвизначатимежідинамічно

стійкогостануТОСшляхоманалізуїїпередавальноїфункції

Розробленийалгоритмпобудовидіаграмдинамічноїстійкостідля

випадкуобробкипросторовоскладнихповерхонькінцевимисферичними

фрезамивраховуючивпливзміникутаконтактуфрезитазаготовкипри

змініглибинирізаннякутаупередженняташиринирізаннянавідмінувід

класичногоалгоритмутадаєзмогувизначитизони

динамічностійкогорізання

Експериментальнопідтвердженаадекватністьрозробленої

математичноїмоделікоректномувизначеннюумовдинамічностійкого

різанняутомучислідлявипадкунизькочастотнихвібраційдляобробки

заготовокізконструкційнихсталейрізнихмароктвердосплавними

фрезами—якмонолітнимитакізізміннимипластинамиРозроблені



математичнамодельтаалгоритмпобудовинаїїосновідіаграмдинамічної

стійкостідозволяютьінтенсифікуватирежимирізанняглибинуташирину

різаннячастотуобертанняфрезидлязабезпеченнязбільшення

продуктивностіобробки

Наданірекомендаціїзпослідовностівиборурежиміврізанняна

етапіпроектуваннятехнологічнихпроцесівобробкипросторовоскладних

поверхонькінцевимисферичнимифрезамивказуютьнадоцільність

використаннязмінногоприпускунаділянкахоброблювальноїповерхніз

різнимизначеннямикутаупередженнящодозволяєпідвищити

продуктивністьчереззменшеннякількостіпроходівзабезпечуючи

динамічнустійкістьТОСприфрезеруванніусіхділянокпросторовоскладноїповерхні