

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**ГЕРМАШЕВ АНТОН ІГОРОВИЧ**

УДК 621.914

**ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ КІНЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ  
ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЕТАЛЕЙ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ  
СПЕЦІАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ**

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі технології машинобудування Запорізького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Внуков Юрій Миколайович,**  
Запорізький національний технічний університет,  
проректор з наукової роботи

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Клочко Олександр Олександрович,**  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів

доктор технічних наук, професор  
**Калафатова Людмила Павлівна,**  
Донецький національний технічний університет,  
професор кафедри гірничих машин і мехатронних систем  
машинобудування

Захист відбудеться «30» червня 2016 р. о \_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.12 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Багалія, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Багалія, 21.

Автореферат розісланий «\_\_\_» травня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої  
вченої ради



Зубкова Н.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У авіакосмічній галузі широко застосовуються деталі, що мають тонкостінні елементи, які отримують шляхом фрезерування на сучасних верстатах з ЧПУ, наприклад, лопатки осьових і відцентрових моноколів газотурбінного двигуна (ГТД). При обробці таких деталей виникають вібрації, які погіршують шорсткість обробленої поверхні та призводять до зниження розмірної точності.

Досягнення низької шорсткості поверхні дуже важливо для деталей, обтічних потоком рідини або газу. Збільшення шорсткості призводить до швидшого переходу ламінарного прикордонного шару в турбулентний, що збільшує сумарну силу опору тертя. У зв'язку з цим підвищення якості обробленої поверхні лопаток моноколів ГТД сприяє підвищенню ККД двигуна, збільшенню втомної міцності і опору утворення тріщин відповідальних деталей, що працюють при високих динамічних навантаженнях, а підвищення розмірної точності тонкостінних деталей сприяє більш збалансованій роботі двигуна, збільшенню його ресурсу і міжремонтних інтервалів.

Поява вібрацій при обробці деталей не тільки знижує стійкість інструменту, але і веде до передчасного зношування шпиндельного вузла верстата. Також через пружну деформацію деталі встановлений припуск знімається не повністю, призводячи до відхилень форми і розташування номінального профілю.

Одним з ефективних технологічних прийомів зменшення вібрацій і поліпшення розмірної точності під час фінішної обробки є застосування спеціальних технологічних середовищ, якими заповнюють міжлопатковий простір моноколів. В цьому напрямку застосовують різноманітні матеріали середовищ, та на даний момент доцільно узагальнити властивості технологічного середовища, які найкращим чином відповідали б вимогам виробництва.

Таким чином, визначення основних закономірностей впливу спеціальних технологічних середовищ на зміну властивостей пружної системи тонкостінної деталі для підвищення її вібростійкості і якості обробки, а також розробка технології ефективного їх застосування у виробництві є актуальною науково – практичною задачею, яка визначила напрям дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі технології машинобудування Запорізького національного технічного університету в рамках державної НДР МОН України: «Комплексна розробка інтегрованих технологій підвищення якості виготовлення деталей відповідального призначення шляхом зменшення вібрацій при різних видах обробки» (№ д. р: 0112U005941) та господарчих договорів «Дослідження і вибір міжлопаткових сумішей, що застосовуються для фрезерування лопаток моноколів ГТД» (замовник: АТ «МОТОР СІЧ», м. Запоріжжя, № д. р: 0113U007519), «Розробка рекомендацій щодо вдосконалення технології підготовки і нанесення в'язкопружних демпфуючих середовищ на моноколеса ГТД для фінішного фрезерування лопаток» (замовник: АТ «МОТОР СІЧ», м. Запоріжжя, № д. р: 0114U005620), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** *Мета дослідження* – визначити основні закономірності впливу спеціальних середовищ на зміну властивостей пружної

системи тонкостінної деталі для підвищення вібростійкості, точності і якості обробки, а також розробити технологію ефективного застосування середовищ у виробництві.

Для досягнення зазначеної мети поставлені завдання:

1. Розробити вимірювальний стенд і методику кількісного оцінювання коливального руху тонкостінної деталі при кінцевому фрезеруванні.
2. Створити пристрій для дослідження властивостей технологічних середовищ при застосуванні їх в умовах подібних фрезеруванню лопаток моноколів ГТД.
3. Розробити пристрій і методику для вимірювання ефективності видалення припуску при фрезеруванні тонкостінної деталі з визначенням точності і якості обробленої поверхні.
4. Експериментально дослідити вплив властивостей пружної системи тонкостінної деталі на особливості збудження коливань, ефективність видалення припуску, точність та якість обробки в умовах кінцевого фрезерування.
5. Провести порівняльні дослідження властивостей спеціальних технологічних середовищ, що застосовуються при кінцевому фрезеруванні лопаток моноколів ГТД.
6. Розробити перспективну технологію використання застосовуваного на підприємстві АТ «МОТОР СІЧ» середовища, що поліпшує заводські показники за якістю обробки лопаток моноколів ГТД.

*Об'єкт дослідження* – механічна обробка тонкостінних елементів деталей типу лопаток моноколів ГТД при застосуванні спеціальних технологічних середовищ.

*Предмет дослідження* – закономірності впливу на умови фрезерування зміни статичних і динамічних характеристик пружної системи тонкостінного елемента деталі в спеціальних технологічних середовищах.

**Методи дослідження.** В основу дисертаційної роботи покладені методи експериментальних досліджень, що проведені на стенді для дослідження коливань при фрезеруванні тонкостінних деталей (пат. UA 94974), на стенді для вибору спеціальних технологічних середовищ, що застосовуються при фрезеруванні моноколів ГТД (пат. UA 88682, пат. UA 88683) і на стенді для діагностики коливань при кінцевому фрезеруванні тонкостінних деталей (пат. UA 94382). Закон коливального руху деталі під час обробки записували безконтактним датчиком переміщення (мод. XS1 M12AP120 торгової марки Osiprox®). Умови контактування (входу і виходу) зуба фрези з оброблюваною деталлю вимірювали за допомогою розробленої системи (пат. UA 103031). Запис двох сигналів (коливань елемента деталі та його контакту з інструментом) відбувався одночасно через АЦП Lcard E14-140. Визначення фактичного об'єму видаленого припуску і профілю обробленої поверхні зразка проводили оптично-вимірювальним методом.

Обробку експериментальних даних проводили за розробленою методикою оцінки коливань при фрезеруванні тонкостінних деталей методом статистичного та кореляційного аналізу.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у тому, що:

– вперше розроблено систему критеріїв для оцінювання умов коливального руху тонкостінного елемента деталі (ТЕД) під час фрезерування за десятьма параметрами базового фрагмента осцилограми. (Прийнято рішення в УКРПАТЕНТ про видачу патенту за заявкою u201511268).

– вперше експериментально встановлено, що вібростійкість і ефективність

зняття припуску при фрезеруванні ТЕД істотно залежать не тільки від статичних і динамічних властивостей пружної системи (ПС) ТЕД, а й від швидкості обертання інструменту і напрямку подачі (зустрічний чи попутний). Зі збільшенням швидкості змінюються умови збудження вібрацій і збільшується ефективність видалення припуску.

– вперше експериментально показано, що при застосуванні спеціальних технологічних середовищ спостерігається явище порушення цілісності контакту між середовищем і ТЕД в процесі його фрезерування. Поява нещільності контакту змінює частоту власних коливань оброблюваного елемента, що знаходиться в технологічному середовищі. Відзначена залежність покладена в методику оцінки ефективності застосування середовищ і технології їх заповнення (пат. UA 94382).

– отримало подальший розвиток уявлення про можливості вдосконалення технології ефективного застосування спеціальних технологічних середовищ у виробництві шляхом зміни умов їх заповнення та розміщення.

**Практичне значення отриманих результатів** для машинобудування полягає в розробці перспективної технології використання спеціальних технологічних середовищ у виробництві, яка дозволяє підвищити якість та точність виготовлення лопаток моноколів ГТД, запроваджені спеціального інструменту для фрезерування деталей, які знаходяться у спеціальних середовищах, технологічної оснастки для заливки моноколів ГТД, пристрою для порівняння і вибору технологічних середовищ та методики оцінки коливального руху тонкостінного елемента деталі під час фрезерної обробки. Рекомендації по впровадженню розробленої технології передано на АТ «МОТОР СІЧ» і підтверджено актами їх використання. Результати роботи впроваджено в навчальний процес на кафедрі технології машинобудування ЗНТУ в лекційних курсах і лабораторних роботах з дисциплін «Теоретичні основи технології машинобудування» і «Теорія різання».

**Особистий внесок здобувача.** Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: проведення експериментальних досліджень, виготовлення стенду для дослідження технологічних середовищ і зразків, виготовлення пристрою для вимірювання фактичного об'єму зрізаного припуску, розробка методики дослідження коливань при фрезеруванні тонкостінних деталей та програм обробки результатів експериментів. Здобувач брав безпосередню участь у впровадженні результатів досліджень, складав плани проведення випробувань розробок в умовах виробництва, аналізував результати, визначав перелік необхідних змін у технологічному процесі виготовлення моноколів, технологічній оснастці та зміні конструкції інструменту для впровадження результатів у виробництво.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертації доповідалися на: XII - XV Всеукраїнських молодіжних науково-технічних конференціях «Машинобудування України очима молодих» (Київ, 2012; Кременчук, 2013; Суми, 2014; Житомир, 2015), 63 Студентській науково - технічній конференції Університета машинобудування МАМІ (Москва, Росія, 2013), XXII та XXIII Міжнародних науково-технічних семінарах «Інтерпартнер» (Одеса, 2014 та 2015), Міжнародній науково - технічній конференції «Теоретичні та прикладні проблеми

створення авіаційних двигунів і енергетичних установок» (Запоріжжя, 2014), KUL-TMMA International days (Бельгія, 2016).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 36 наукових публікаціях, з них: 10 статей – у наукових фахових виданнях України (3 – у наукометричних базах даних), 4 статті – у закордонних виданнях (2 – у періодичних фахових виданнях), 7 патентів України, 14 – у матеріалах конференцій.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 199 сторінок; з них 94 рисунки по тексту; 3 таблиці по тексту, 1 таблиця на окремій 1 сторінці, списку використаних джерел з 252 найменувань на 26 сторінках, 2 додатки на 2 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дано загальну характеристику роботи, обґрунтовано її актуальність, сформульовані цілі та завдання дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено інформацію про апробацію та публікації основних результатів роботи.

У **першому розділі** обґрунтовано доцільність застосування тонкостінних деталей в авіакосмічній та інших галузях, відображено необхідність в покращенні їх шорсткості та розмірної точності, систематизовані способи вибору режимів різання, які використовуються на виробництві, наведено огляд методів підвищення точності і якості при кінцевому фрезеруванні тонкостінних деталей.

На підставі аналізу наукових робіт Дроздова В.А., Каширіна О.І., Кучми Л.К., Ельясберга М.Є., Кудінова В.О., Ташлицького Н.І., Жаркова І. Г., Кедрова С.С., Петракова Ю.В., Залози В.О., Клименка С.А., Струтинського В.Б., Калафатової Л.П., Мироненка Е.В., Равської Н.С., Панчука В.Г., Васіна С.О., Свинина В.М., Оргіяна О.А., Ларшина В.П., Tlusty J., Altintas Y., Budak E., Seguy S., Izamshah R. та інших показано сучасні уявлення про виникнення коливань під час механічної обробки і методи зниження їх інтенсивності. До таких методів можна віднести: використання покрової обробки з почерговим зняттям припуску з кожного боку тонкої деталі; здійснення останнього проходу без задання припуску; прогнозування умов обробки методом пелюсткових діаграм (діаграм стабільності); застосування інструментів зі змінною геометрією; застосування модуляції швидкості головного руху; підвищення жорсткості тонкостінних елементів деталей шляхом використання спеціальних технологічних середовищ, якими заповнюють міжлопатковий простір моноколес ГТД та ін. Аналіз патентів показав, що в теперішній час використання спеціальних технологічних середовищ активно впроваджується на провідних авіадвигунобудівних підприємствах України, Росії, Китаю, Великобританії, США та ін. Показано переваги у виготовленні і експлуатації монолітних деталей з тонкостінними елементами, якими є моноколеса ГТД. Аналіз робіт Kaufeld M., Болотова М.А., Капшунова В.В., Andre P. дозволив зробити висновок про те, що при чорновому кінцевому фрезеруванні тонкостінних деталей на першому плані стоять питання продуктивності обробки та рівномірності припуску під остаточну обробку. При чистовому фрезеруванні, коли припуски мінімальні, лімітуючим фактором стає

шорсткість і точність обробленої поверхні, яка погіршується через виникнення коливань ТЕД. На базі проведеного аналізу сформульовано цілі і завдання дослідження.

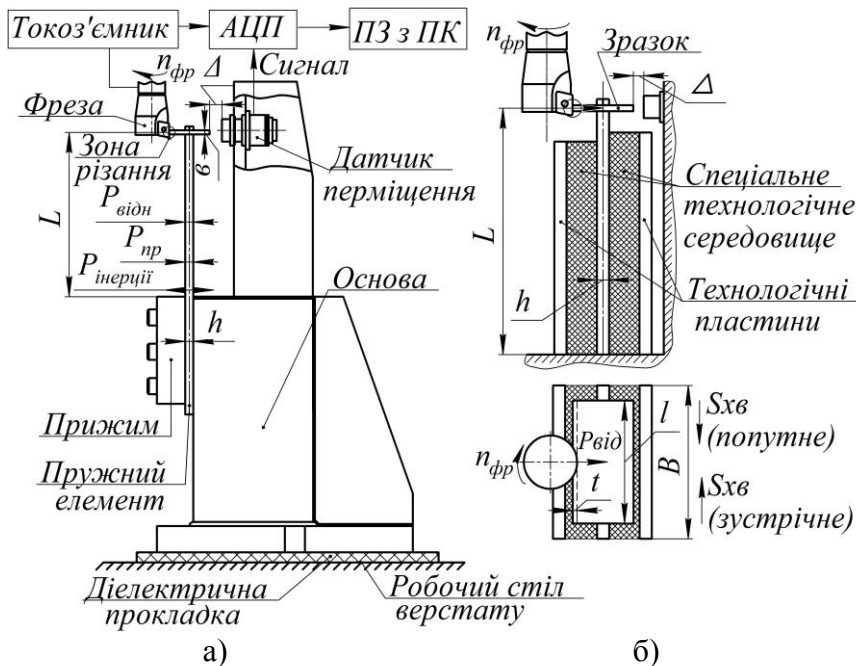


Рисунок 1 – Принципові схеми пристроїв для дослідження коливань ТЕД: а – стенд для дослідження коливань при фрезеруванні ТЕД; б – межлопатковий осередок для дослідження спеціальних технологічних середовищ, що застосовуються при фрезеруванні моноколів ГТД.

верхні і розмірну точність обробки. Сформульовано поняття базового фрагменту осцилограми (БФО) відхилення ТЕД та визначено 10 параметрів (рис. 2), які можуть повністю характеризувати умови його коливального руху при фрезерній обробці (заявка на патент u201511268).

Траєкторією руху зуба фрези є подовжена чи скорочена циклоїда з кроком для однозубої фрези рівним подачі на зуб  $s_z$  (рис. 2). При зустрічному фрезеруванні зуб фрези врізається в припуск в точці  $A$  і виходить з нього в точці  $D$ . Рух зуба від точки  $D$  (під час холостого ходу) відбувається у повітрі, не торкаючись деталі, і в точці  $C$  зуб знову врізається в припуск. На обробленій поверхні залишається частина поверхні різання  $AC$ , отримана в результаті попереднього проходу зуба. Таким чином, частина поверхні різання, що залишилася від попереднього проходу зуба, формує рельєф обробленої поверхні і є ділянкою профілювання. Наведена експериментальна методика дозволяє аналізувати умови формування цієї ділянки при порушенні автоколивань з розмахом  $R_2$ , що впливають на величину шорсткості  $R_a$ .

На рис. 3 показано послідовність визначення величини розмаху автоколивань  $R_2$  на основі аналізу БФО коливань ТЕД в процесі його фрезерування. Визначення параметра  $R_2$  складається з 3-х етапів.

На першому етапі визначається час різання –  $\tau_{різ}$  зубом фрези, шляхом суміщення осцилограми коливань ТЕД і наявності контакту зуба фрези з деталлю. Далі визначають час профілювання –  $\tau_{проф}$ , який становить половину від часу різання –  $\tau_{різ}$ .

У другому розділі описані методи і умови проведення експериментів.

Експерименти проводили на створеному стенді для дослідження коливань при фрезеруванні ТЕД (рис. 1а) і на «міжлопатковому осередку» для дослідження спеціальних технологічних середовищ, що застосовуються для фрезерування моноколів ГТД (рис. 1б). Стенд оснащений вимірювальною системою для визначення умов контактування зуба фрези з оброблюваною деталлю та дозволяє роздільно визначати вплив режимів різання і характеристик ПС ТЕД на параметри коливань, шорсткість обробленої по-

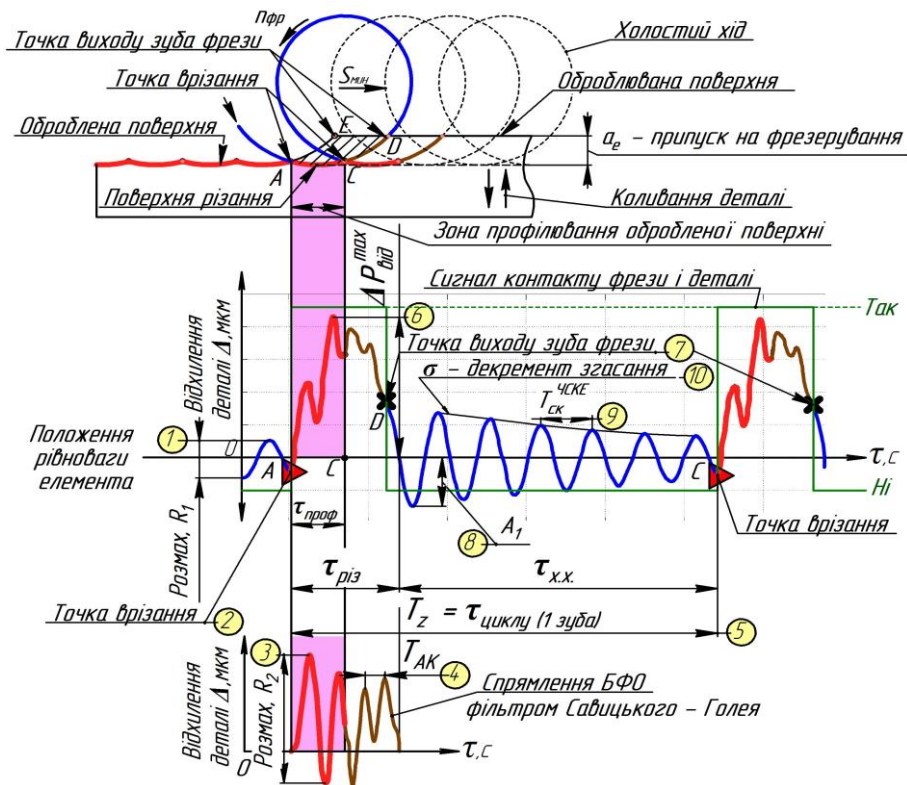


Рисунок 2 – Методика вимірювання 10 основних параметрів коливань на БФО при фрезеруванні ТЕД:

1 – розмах вільних згасаючих коливань перед врізанням зуба фрези в припуск –  $R_1$ . 2 – точка врізання зуба фрези в деталь. 3 – розмах автоколивань в зоні профілювання –  $R_2$ . 4 – частота автоколивань в процесі зрізання припуску зубом фрези  $f_{ak} = 1 / T_{ak}$ . 5 – зубцова частота  $f_z = 1 / T_z$ . 6 – максимальне відхилення деталі в результаті впливу змушуючої сили віджиму –  $\Delta P_{від}^{max}$ . 7 – точка виходу зуба фрези. 8 – амплітуда першої хвилі вільних згасаючих коливань  $A_1$ . 9 – частота вільних згасаючих коливань деталі  $f_{ck} = 1 / T_{ck}$ . 10 – логарифмічний декремент вільних згасаючих коливань деталі  $\sigma$ .

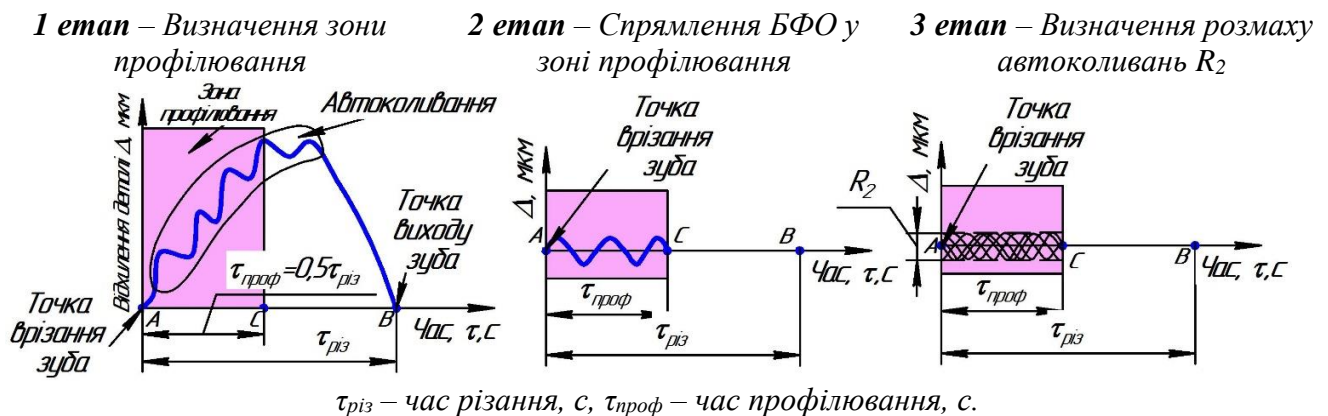


Рисунок 3 – Послідовність визначення по БФО розмаху автоколивань в зоні профілювання –  $R_2$  (фрезерування зустрічне)

Вимірювання фактичного об'єму видаленого припуску і профілю обробленої поверхні зразка проведено на спеціально розробленому пристрої, який показаний на рис. 5. Оцінку точності проводять за двома критеріями (рис. 6) по ГОСТ 24642-81:

При зустрічному фрезеруванні ділянка профілювання примикає до точки входу зуба фрези в припуск, а при попутному до точки виходу зуба із зони різання.

На другому етапі частину осцилограми коливань ТЕД, що відноситься до зони профілювання, спрямляють, застосовуючи фільтр Савицького-Голея.

На третьому етапі після накладення коливань в зоні профілювання від великого ( $n > 100$ ) числа послідовних зрізів можна визначити величину розмаху автоколивань деталі –  $R_2$ . На рис. 4 показано тісний кореляційний зв'язок між параметрами  $R_2$  і шорсткістю обробленої поверхні  $R_a$ .

відхилення від прямолінійності в площині  $EFL$  і відхилення форми заданого профілю  $ECL$ , а ефективність обробки оцінюють за величиною реального об'єму видаленого припуску.

Особливістю фінішного кінцевого фрезерування є наявність холостого ходу, коли попередній зуб вийшов із зачеплення з припуском, а наступний ще не увійшов.

У досліджуваній коливальній системі інструмент (діаметром  $D$  з кількістю зубів

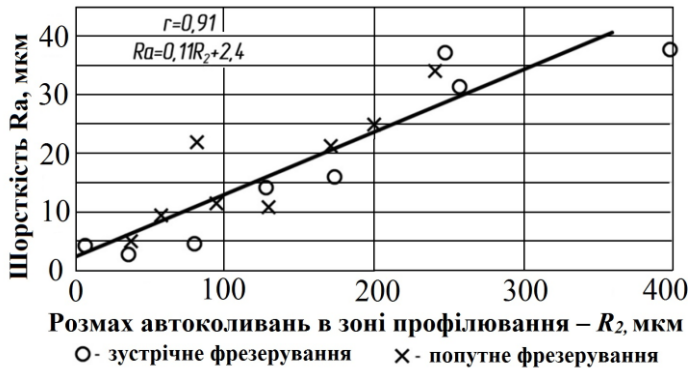


Рисунок 4 – Залежність впливу розмаху автоколивань в зоні профілювання  $R_2$  на шорсткість обробленої поверхні  $R_a$  для різних напрямків подачі

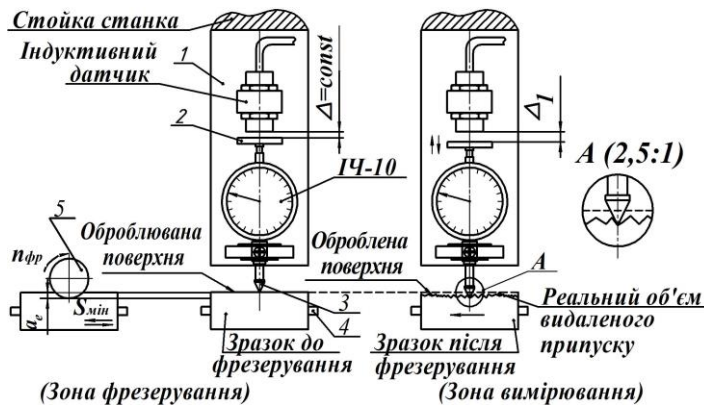


Рисунок 5 – Схема пристрою для вимірювання видаленого припуску і профілю обробленої поверхні: 1 – основа; 2 – п'ята; 3 – вимірюючий наконечник; 4 – ПС ТЕД; 5 – фреза.

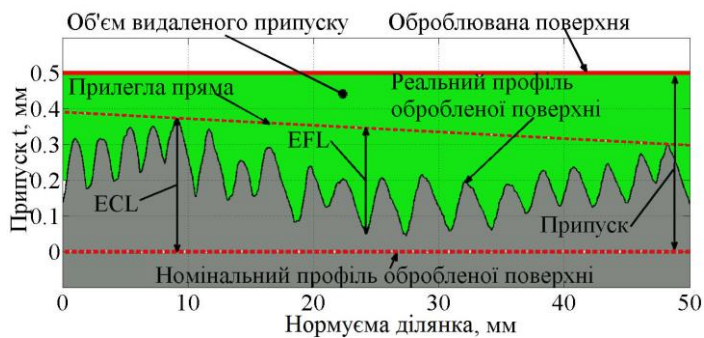


Рисунок 6 – Вимірювання обсягу видаленого припуску і профілю обробленої поверхні для розрахунку розмірної точності по ГОСТ 24642-81

$z$ ) вважається абсолютно жорстким. Деталь являє собою консольно зацімлену тонкостіну пластину. Так як ширина пластини  $B$  значно перевищує її товщину  $h$ , то домінуючий внесок в форму коливань деталі вносять коливання по першій згинальній формі в напрямку осі  $x$ . З огляду на те, що сукупність видів коливань, які присутні в даній системі, змінюється в залежності від частоти обертання шпинделя  $n_{фр}$ , час різання  $\tau_{різ}$  є не постійним параметром через змінні умови коливального руху деталі. Це особливо проявляється при високошвидкісному фрезеруванні. Існують принципові відмінності умов збудження коливань при попутному і зустрічному фрезеруванні. В певному швидкісному діапазоні на вимушені коливання накладаються додатково автоколивання. Тому для визначення впливу характеристик ПС ТЕД на параметри її коливання запропоновано прийняти спрощену схему збудження коливань. Для цього зуб фрези замінено виступаючою кульовою поверхнею, яка забезпечує контакт з деталлю без зняття припуску і виникнення автоколивань. Відхилення деталі -  $\Delta$ , збуджене кулачком, є постійною характеристикою ПС деталі та дає можливість вимірювати появу інерційної сили. Навіть при істотному спрощенні умов збудження коливань деталі, замінюючи зуб фрези на кульову поверхню кулачка, закон її руху складається з послідовної

зміни вільних згасаючих коливань і вимушених. Тому вплив технологічних середовищ на зміну статичних та динамічних властивостей ТЕД досліджений експериментально на спеціально розробленому стенді для діагностики коливань при збудженні тонкостінних деталей кулачком (пат. UA 94382), який показаний на рис. 7. Даний стенд дозволяє прикладати змінне циклічне навантаження, яке імітує імпульсний вплив на деталь і технологічне середовище, що прикладається фрезою при обробці. Досліджуваними параметрами обрані: відхилення деталі при взаємодії з кулачком -  $\Delta_1$  і частота власних коливань (ЧВК) деталі, оточеної технологічним середовищем -  $f_{ск}$ . Конструктивно розроблений спосіб оцінки порушення цілісності контакту технологічного середовища з поверхнею деталі за зміною ЧВК системи  $f_{ск}$  (рис. 7). Зменшення ЧВК ПС тонкостінної деталі при силовому збудженні кулачком свідчить про порушення суцільності контакту середовища з поверхнею деталі. Це явище негативно впливає на вібростійкість процесу обробки і, відповідно, на якість обробленої поверхні.

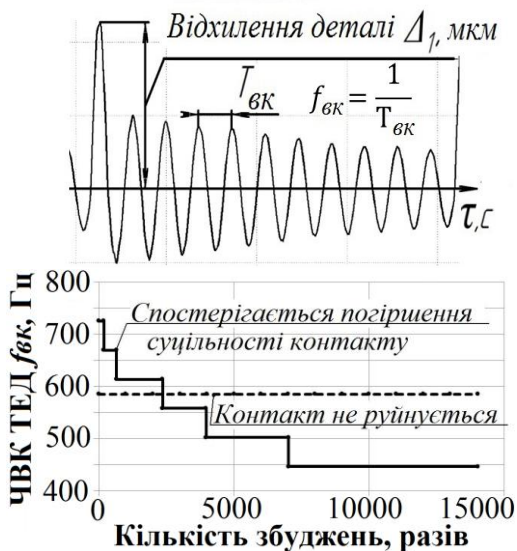
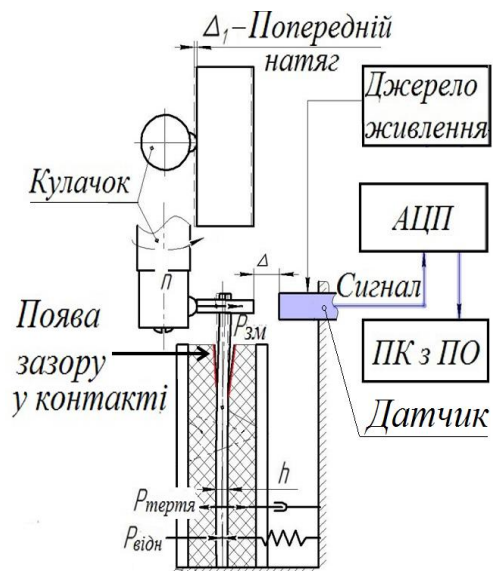
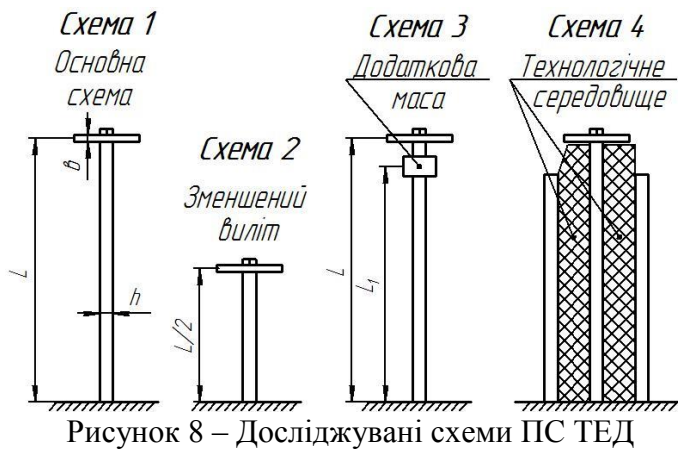


Рисунок 7 – Стенд для дослідження коливань при збудженні ТЕД кулачком і спосіб оцінки порушення цілісності контакту середовища з деталлю за зміною ЧВК ТЕД  $f_{ск}$

У третьому розділі експериментально досліджено 4 схеми ПС ТЕД (рис. 8). Перша схема є базовою для порівняння і моделює лопатку моноколеса (або звичайну лопатку) під час обробки без застосування технологічних середовищ. Друга і третя схеми дозволяють показати, яким чином зміни геометрії і маси пружної пластини змінюють статичні і динамічні характеристики ТЕД і можуть впливати на зміну умов його обробки. Зміна характеристик на схемі 2 здійснюється за рахунок зменшення вильоту пластини в два рази, а на схемі 3 – за рахунок приєднання додаткової маси у верхній частині пружної пластини. На схемі 4 ПС деталі поміщена в технологічне середовище.

Режим обробки задається зміною числа обертів шпинделя  $n$  (від 224 до 1800 об/хв) і напрямком (зустрічне чи попутне) подачі  $S_{хв}$ . Величина радіальної глибини різання  $a_e = 0,5$  мм і подачі на зуб  $s_z = 0,05$  мм/зуб постійні.

Параметри коливань під час зустрічного і попутного фрезерування і розмірна точність обробленої поверхні для різних схем ПС ТЕД наведені на рис. 9. Результати проведених експериментів свідчать, що підвищення жорсткості системи деталі (схема 2 і 4) сприяє підвищенню точності (зниженню параметра  $ECL$  і  $EFL$ ) та ефективності обробки, зменшенню відхилення деталі при різанні, зниженню розмаху автоколивань. Також результати досліджень показують, що при збільшенні швидкості різання підвищується об'єм зрізаного припуску.



№ Схеми	Жорсткість $j$ , Н/м	ЧВК $f$ , Гц	Логарифмічний декремент згасання коливань, $\sigma$
1	228	264	0,014
2	1285	742	0,008
3	234	195	0,008
4	372	467	0,073

У певному швидкісному діапазоні можна спостерігати появу регенеративних автоколивань, що сприяє істотному погіршенню параметра  $EFL$ . Розмах автоколивань для всіх розглянутих схем при попутному фрезеруванні до двох і більше разів нижче, ніж при зустрічному, що робить його більш вигідним в таких умовах роботи.

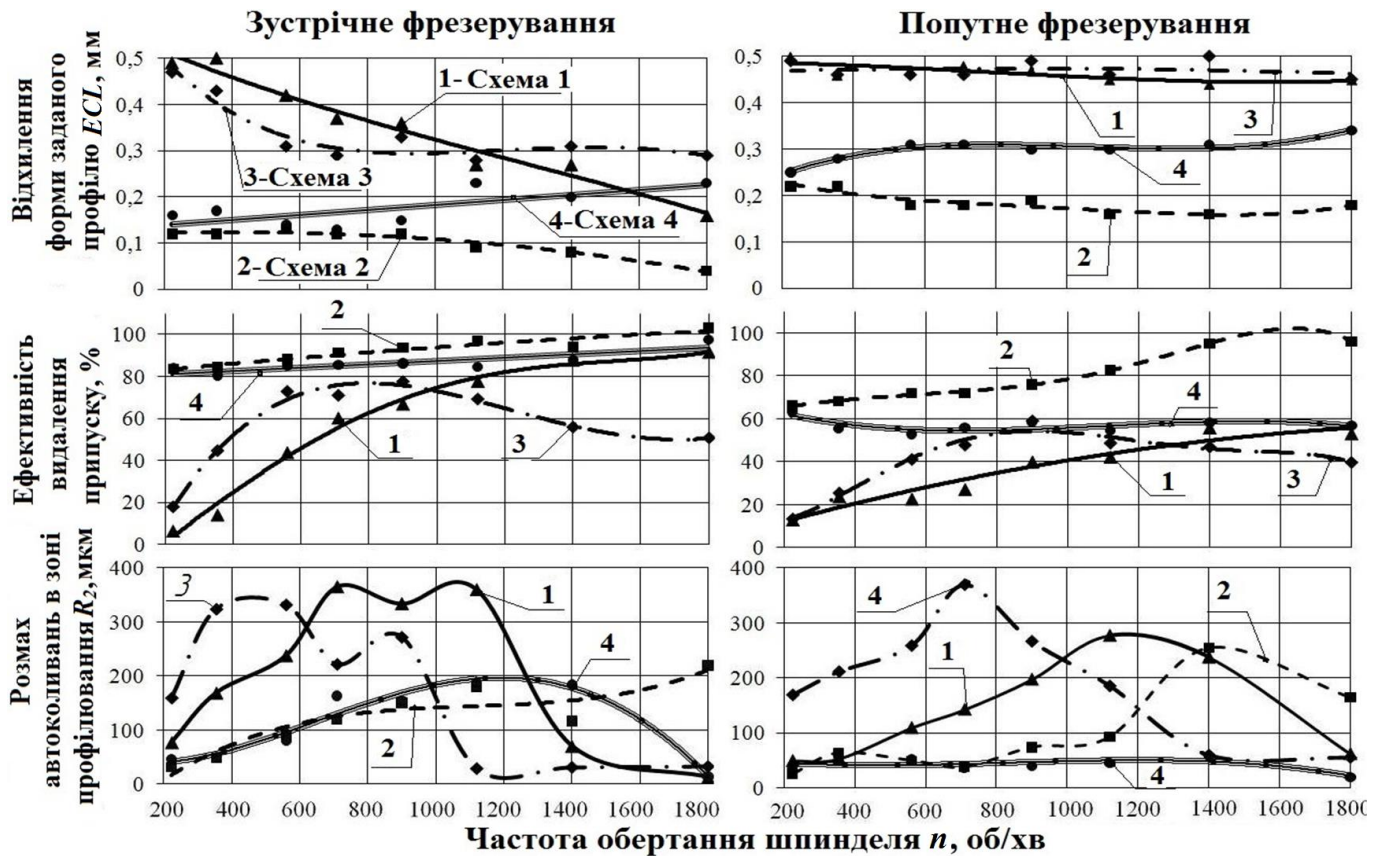


Рисунок 9 – Розмірна точність, ефективність обробки і параметри коливань під час фрезерування

Порівняння значень параметра шорсткості  $Ra$  для різних умов фрезерування показує, що в зоні інтенсивних автоколивань при зустрічному фрезеруванні шорсткість вище, ніж при попутному. Це пов'язано з тим, що розмах автоколивань при зустрічному фрезеруванні вище до двох разів і більше, ніж при попутному. Зі збільшенням швидкості обертання шпинделя процес обробки при зустрічному фрезеруванні раніше виходить з зони автоколивань, і тому параметр шорсткості  $Ra$

обробленої поверхні при зустрічному фрезеруванні на більш високих швидкостях нижче, ніж для попутного.

Проведені експериментальні дослідження показали, що застосування спеціальних технологічних середовищ сприяє підвищенню жорсткості (для розглянутої ПС деталі в 1,6 рази), підвищенню ЧВК (в 1,8 рази) і логарифмічного декременту згасання коливань (в 5 разів). Така зміна статичних і динамічних характеристик сприяє підвищенню вібростійкості процесу обробки, а саме: зниженню автоколивань (до 1,8 і більше разів при зустрічному фрезеруванні і до 5 разів при попутному), зниженню параметра відхилення деталі при різанні (від 10% до 2 разів) і повному гасінню вільних згасаючих коливань під час холостого ходу. Отримане поліпшення умов обробки дозволило зменшити відхилення форми заданого профілю (в 1,5 і більше разів), відхилення від прямолінійності в площині (в 1,5 і більше разів), підвищити ефективність обробки (від 10% на високих швидкостях і до 3 разів на низьких), а також поліпшити параметр шорсткості  $Ra$  до двох і більше разів.

У **четвертому розділі** наведено результати порівняння технологічних середовищ, які використовуються на заводах: АТ «МОТОР СІЧ», ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес» (м. Запоріжжя) і суміш «Rigidax», яку застосовує компанія «Rolls Roys» для фрезерування лопаток. Дослідження середовищ проведено за схемою 4 (рис. 8). В якості порівняння в даному розділі представлено результати, отримані за схемою 1. Характеристики ПС ТЕД, оточених різними технологічними середовищами, наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристики ПС деталі при використанні різних технологічних середовищ

Характеристика ПС деталі	Спеціальні технологічні середовища		
	ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес»	АТ «МОТОР СІЧ»	RIGIDAX
Жорсткість $j$ , Н/м	372	458	581
ЧВК $f_{вк}$ , Гц	467	469-312	1708-439
Логарифмічний декремент згасання коливань, $\sigma$	0,073	0,143	0,018
Умови контактування технологічного середовища з поверхнею деталі	Контакт не руйнується	Порушення суцільності контакту	Порушення суцільності контакту

Відзначено, що спеціальні технологічні середовища сприяють підвищенню вібростійкості процесу обробки, розмірної точності і якості обробленої поверхні (рис. 10). Введення в ПС деталі технологічних середовищ АТ «МОТОР СІЧ» і Rigidax показали близькі результати (отримані значення параметрів обробки мають різницю менше 14%). Застосування даних середовищ є доцільним на більш високих швидкостях і при зустрічному напрямку подачі. При таких умовах роботи вони сприяють зниженню параметра  $ECL$  (до 2 разів),  $EFL$  (до 2,5 разів), в порівнянні з середою «Івченко Прогрес». Застосування середовища «Прогрес» є вигідним на низьких швидкостях і при попутному фрезеруванні. При цьому значно збільшується ефективність обробки (до 3 разів) і зменшується відхилення форми заданого профілю (до 2 разів). При фрезеруванні в умовах появи регенеративних автоколивань

застосування всіх розглянутих технологічних середовищ сприяє практично повному гасінню автоколивань при попутному фрезеруванні (до 5 разів, в порівнянні зі схемою 1). При зустрічному напрямку подачі вигідним є використання середовища «Івченко Прогрес», що сприяє зниженню розмаху автоколивань (в середньому на 25%, в порівнянні з іншими технологічними середовищами).

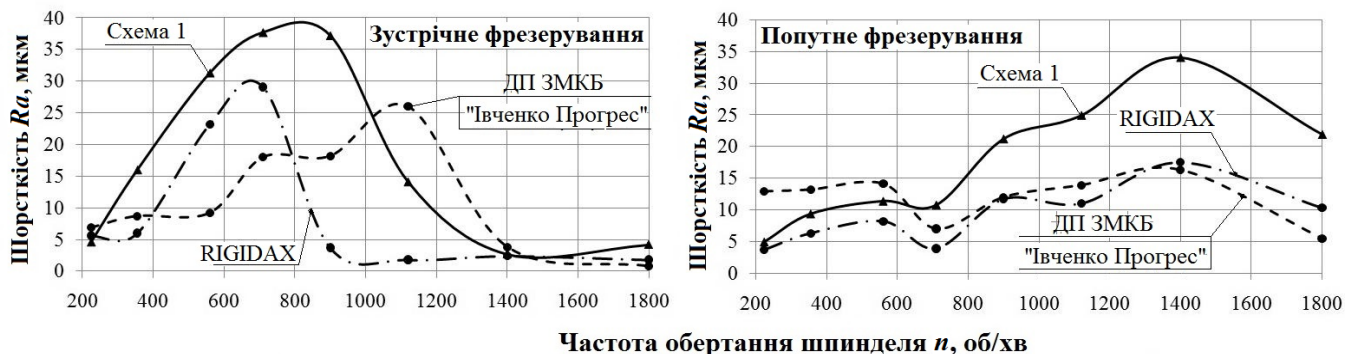


Рисунок 10 – Вплив напрямку подачі і матеріалу технологічного середовища, в якому знаходиться деталь, на шорсткість обробленої поверхні

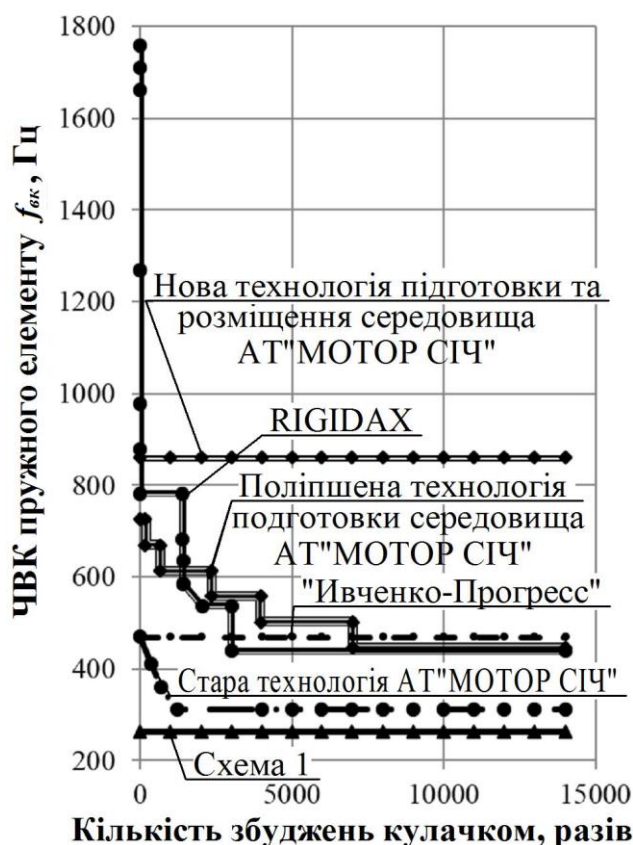


Рисунок 11 – Дослідження порушення суцільності контакту технологічного середовища і деталі

середовища з деталлю. Таким чином, з ряду розглянутих технологічних середовищ можливо пропонувати до застосування лише середовище «Івченко Прогрес». Дане технологічне середовище найбільш вдало підходить для дослідного виробництва.

У п'ятому розділі наведено етапи розробки перспективної технології використання середовища АТ «МОТОР СІЧ», які дозволяють максимально

Результати дослідження порушення цілісності контакту між матеріалом середовища і поверхнею ТЕД (рис. 11) показали зниження ЧВК ПС тонкостінної деталі при використанні всіх середовищ, крім середовища ДП ЗМКБ «Івченко Прогрес». Встановлено, що під час процесу обробки ефективність використання технологічного середовища зменшується з кожним актом прикладання навантаження. Результати проведеного порівняння не виявили технологічного середовища, яке мало б істотні переваги, проте був виявлений недолік, який не дозволяє розкрити весь потенціал застосування середовищ АТ «МОТОР СІЧ» і Rigidax це порушення суцільності контакту середовища з деталлю. Такі технологічні середовища не можуть забезпечити стабільні умови в ході обробки всієї деталі. Однак визначено шляхи поліпшення ефективності їх використання, це мінімізація або усунення погіршення цілісності контакту

ефективно використовувати його переваги і звести до мінімуму недоліки. В якості порівняння наведено заводський спосіб застосування даного середовища. Характеристики досліджених ПС деталі, оточених технологічними середовищами, наведено в табл. 2.

Передумовою для розробки технології стало порушення суцільності контакту між матеріалом технологічного середовища і поверхнею деталі, яке суттєво обмежувало ефективність її застосування. Розробка технології використання середовища здійснювалася в два етапи: на першому встановили оптимальний спосіб підготовки технологічного середовища (дослідження структури матеріалу середовища), а на другому - найбільш вдалий спосіб заповнення міжлопаткового каналу (дослідження взаємного розташування технологічного середовища і деталі). Результатом дослідження щодо першого етапу є - поліпшена технологія підготовки середовища, по другому - нова технологія підготовки та розташування середовища - технологія заливки

Таблиця 2 - Характеристики ПС деталі при використанні різних технологій заповнення середовища АТ «МОТОР СІЧ»

Характеристика ТЕД у технологічному середовищі	Схема 4а Заводська технологія заповнення в'язкими фрагментами вручну	1 етап - Схема 4б Поліпшена технологія заливки середовища в форму з розділенням її лопатками	2 етап - Схема 5 Перспективна технологія заливки середовища без розділення її лопатками
Жорсткість $j$ , Н/м	458	821	1297
ЧВК $f$ , Гц	469-312	725-473	895
Логарифмічний декремент згасання коливань, $\sigma$	0,14	0,035	0,03
Умови контактування середовища з деталлю	Порушення контакту	Порушення контакту	Контакт не руйнується

При заводському варіанті підготовка середовища здійснюється його нагріванням до пластичного стану і подальше заповнення фрагментами міжлопаткового каналу вручну. Структура технологічного середовища при такому способі підготовки має несцільності та схильна до руйнування при прикладенні циклічного навантаження (рис. 12а). Зміна способу підготовки середовища АТ «МОТОР СІЧ» дозволило підвищити жорсткість пружної системи деталі, ЧВК і знизити явище погіршення суцільності контакту при обробці (табл. 2). Покращена технологія підготовки полягає в розплавленні середовища до рідкого стану з наступною його заливкою в міжлопатковий простір, що сприяє утворенню монолітної нерозривної структури в матеріалі середовища після процесу його твердіння. Однак при цьому, аналогічно, як і в заводській технології, матеріал середовища був розділений лопатками моноколеса ГТД (рис. 12б). Тому що технологічне середовище АТ «МОТОР СІЧ» має низьку адгезію до матеріалу лопатки, явище порушення контакту не вдалося виключити.

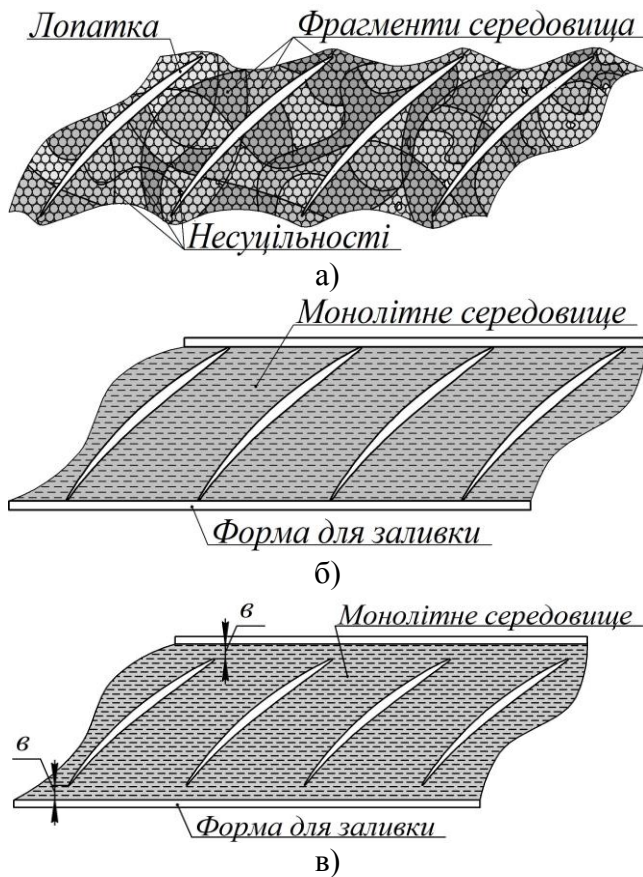


Рисунок 12 – Схема заповнення міжлопаткового простору технологічним середовищем: а - заповнення пластичних фрагментів вручну; б - заповнення в'язкотекучим середовищем в форму; в - технологія заливки з розширенням межі заповнення

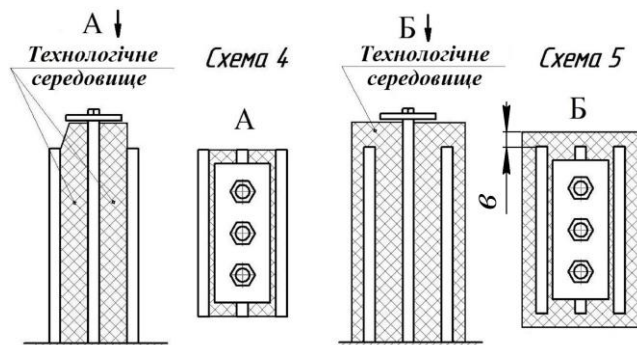


Рисунок 13 – Схема заповнення міжлопаткового каналу за класичною технологією (схема 4) і розробленою технологією заливки (схема 5)

Запропонована технологія підготовки та розміщення середовища АТ «МОТОР СІЧ» (технологія заливки) дозволяє виключити порушення суцільності контакту середовища і деталі (див. рис 11). Суть даної технології полягає в розміщенні технологічного середовища з збільшеними межами його заповнення щодо габаритних розмірів деталі. У цьому випадку весь матеріал технологічного середовища утворює єдиний підпирний каркас, який оточує все моноколесо ГТД (рис. 12в). Такий підхід змінює принцип роботи технологічного середовища у порівнянні зі схемою 4 (рис. 13), де середовище використовується в якості демпфуючої прокладки. За схемою 5 (рис. 13) технологічне середовище жорстко фіксує кожну лопатку з усіх сторін до того моменту, доки вона не буде оброблена. Технологія заливки середовища АТ «МОТОР СІЧ» апробована при моделюванні всього циклу обробки моноколеса з використанням стратегії фрезерування лопаток «одна за одною». Показано поліпшення вібростійкості процесу фрезерування і якості обробленої поверхні в порівнянні з заводським варіантом використання технологічного середовища і стратегією обробки лопаток «через одну». Встановлено зниження розмаху автоколивань в зоні профілювання  $R_2$  до 5 разів (рис. 14), відхилення форми заданого профілю до 5,5 разів, відхилення від прямолінійності в площині до 6,5 разів, максимального відхилення деталі при різанні до 4 разів, а також збільшення ефективності обробки на 60% при малих частотах обертання шпинделя.

У шостому розділі наведено результати практичного застосування технології заливки середовища АТ «МОТОР СІЧ», яка поліпшує показники точності і якості обробленої поверхні в порівнянні із заводською технологією і рекомендації щодо впровадження розробленої технології у виробництво.

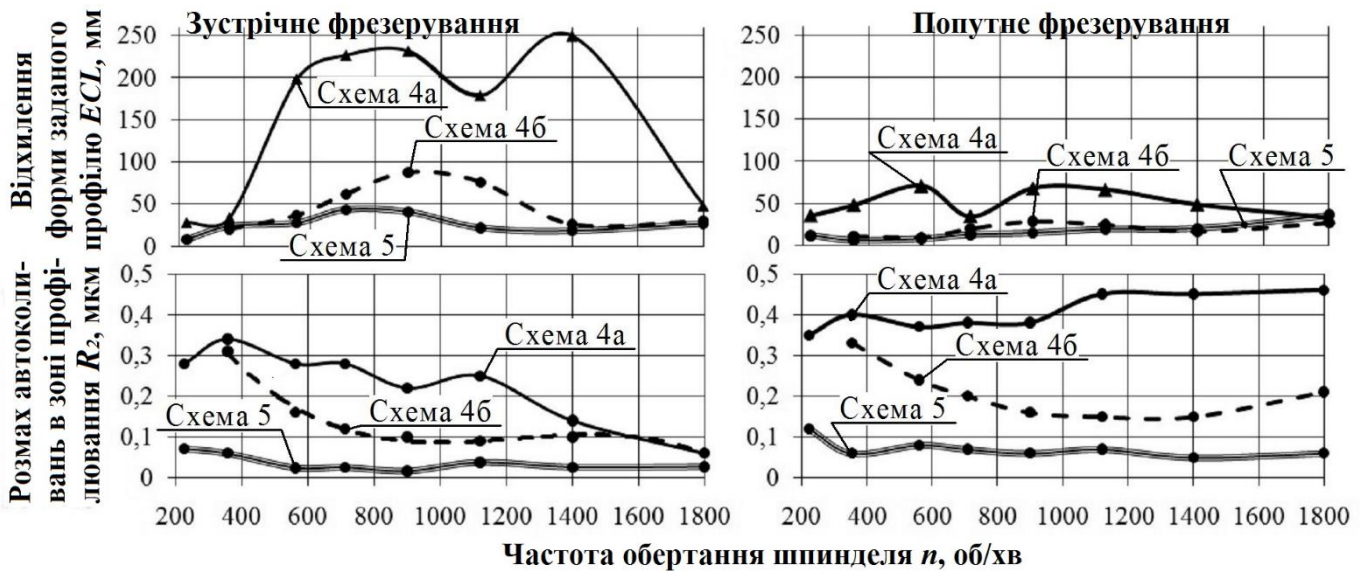


Рисунок 14 – Розмірна точність обробленої поверхні і параметри автоколивань під час фрезерування при різних технологіях розміщення середовища АТ «МОТОР СІЧ»

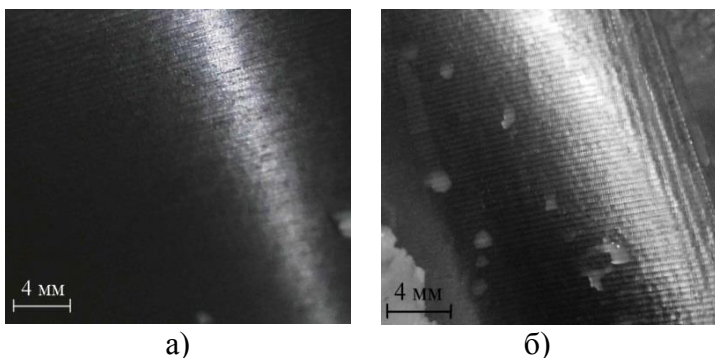


Рисунок 15 – Обробка першого рівня пера лопатки моноколеса ГТД при заповненні міжлопаткового каналу за перспективною технологією

Після проведення досліджень на експериментальному стенді запропонована технологія була апробована у виробничих умовах АТ «МОТОР СІЧ» при фрезеруванні пера лопатки колеса вентилятора першого ступеня двоконтурного ГТД АІ-222-25. Для проведення дослідження один сектор моноколеса був заповнений за технологією заливки середовища, а інший - за традиційною технологією заповнення вручну, яка застосовується на «МОТОР СІЧ» (рис. 15).

Використання технології заливки середовища призвело до значного поліпшення якості обробленої поверхні. Обробка велася на максимальному вильоті лопатки, де її жорсткість найменша. Зовнішній вигляд обробленої поверхні (рис. 16а) свідчить про різання без вібрацій. Оброблена поверхня, отримана після фрезерування з використанням заводської технології, має хвилястий характер, що підтверджує присутність вібрацій (рис. 16б).

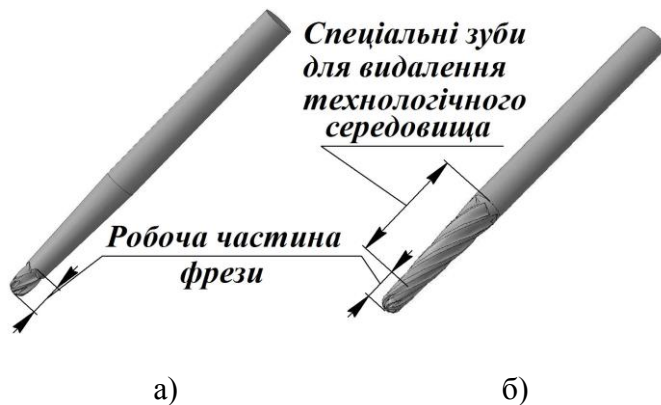
Результати випробувань свідчать про перспективність використання технології заливки середовища АТ «МОТОР СІЧ» для фрезерування лопаток моноколес ГТД. Реалізація запропонованої технології дозволить збільшити ефективність обробки на північних операціях шляхом коригування режимів різання і стратегії фрезерування, а також поліпшити якість і



а) б)

Рисунок 16 – Зовнішній вигляд обробленої поверхні при використанні: а – перспективної технології заливки технологічного середовища; б – заводської технології

розмірну точність обробленої поверхні на чистових операціях шляхом підвищення вібростійкості процесу фрезерування. Однак на шляху впровадження було вирішено ряд завдань: виготовлення спеціальної конструкції ріжучого інструменту (рис. 17б) зі збільшеною довжиною спеціальних зубів для видалення надлишків матеріалу середовища, які перешкоджають проходженню інструменту за заданою траєкторією руху, а також проектування форм для заливки моноколів ГТД, які забезпечать виконання даної операції поза робочою зоною верстата і скорочення підготовчого часу. Здійснення такого комплексу заходів дозволяє забезпечити високу ефективність впровадження розробленої технології.



Варто зазначити, що розроблена технологія здатна лише частково зменшити величину коливань деталі при обробці і є тільки одним з важливих моментів при вирішенні питань отримання високої якості і технологічності виробництва ТВД ГТД. Комплексне рішення даної проблеми вимагає перегляду і аналізу всього технологічного процесу виготовлення кожної деталі з урахуванням сучасних підходів визначення безвібраційних режимів різання і знаходження *стабільних швидкісних діапазонів обробки*.

Рисунок 17 - Конструкція фрези: а – традиційна кінцева фреза; б - кінцева фреза зі спеціальними зубами, призначеними для видалення надлишків технологічного середовища при обробці і є тільки одним з важливих моментів при вирішенні питань отримання високої якості і технологічності виробництва ТВД ГТД. Комплексне рішення даної проблеми вимагає перегляду і аналізу всього технологічного процесу виготовлення кожної деталі з урахуванням сучасних підходів визначення безвібраційних режимів різання і знаходження *стабільних швидкісних діапазонів обробки*.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу визначення основних закономірностей впливу спеціальних середовищ на зміну властивостей ПС ТВД для підвищення вібростійкості, точності і якості обробки, а також розроблена технологія ефективного застосування середовищ у виробництві.

1. Розроблено стенд для експериментального дослідження механічних коливань по БФО, який дозволяє визначати закон руху (коливання) тонкостінної деталі під дією всіх видів сил, що виникають при кінцевому фрезеруванні. Запропоновано методику дослідження коливань тонкостінної деталі по БФО, яка дозволяє повністю характеризувати поведінку тонкостінної деталі під час кінцевого фрезерування.

2. Розроблено пристрій «міжлопатковий осередок», який дозволяє досліджувати вплив спеціальних технологічних середовищ на статичні і динамічні характеристики ПС тонкостінної деталі. Даний пристрій став основою для проведення порівняння різних технологічних середовищ і їх впливу на підвищення вібростійкості процесу фрезерування і якості обробленої поверхні.

3. Конструктивно розроблені пристрій для вимірювання величини видаленого припуску і умов формування профілю обробленої поверхні та пристрій для діагностики коливань при фрезеруванні тонкостінних деталей. За рахунок застосування цих пристроїв експериментально визначено вплив умов різання на продуктивність, точність та якість обробки та досліджено явище порушення цілісності контакту середовища з деталлю.

4. Експериментально визначено, що застосування спеціальних технологічних середовищ на розглянутій ПС деталі в залежності від матеріалу середовища сприяє підвищенню жорсткості (від 1,6 до 3,6 разів), підвищенню ЧВК (від 1,8 до 3,4 рази) і логарифмічного декремента згасання коливань (від 2 до 10 разів). Така зміна статичних і динамічних характеристик забезпечує підвищення вібростійкості процесу обробки, а саме: зниження автоколивань (до 1,8 і більше разів при зустрічному фрезеруванні і до 5 разів при попутному), зниження параметра відхилення деталі при різанні (від 10% до 2 разів) і повного гасіння вільних згасаючих коливань під час холостого ходу. Отримане поліпшення умов обробки дозволило зменшити відхилення форми заданого профілю (в 1,5 і більше разів), відхилення від прямолінійності в площині (в 1,5 і більше разів), підвищити ефективність обробки (від 10% на високих швидкостях і до 3 разів на низьких), а також поліпшити параметр шорсткості  $Ra$  до двох і більше разів у досліджуваному швидкісному діапазоні.

5. З ряду розглянутих технологічних середовищ можливо пропонувати до застосування матеріал «Івченко Прогрес», яке найбільш вдало підходить для дослідного виробництва. В ході проведення дослідження був виявлений недолік, який не дозволяє розкрити весь потенціал застосування середовищ АТ «МОТОР СІЧ» і Rigidax - це порушення суцільності контакту середовища з деталлю.

6. Визначення явища порушення цілісності контакту матеріалу технологічного середовища з поверхнею деталлю, а також використання знань, отриманих під час проведення порівняння технологічних середовищ, які використовуються на підприємствах України та зарубіжжя, дали можливість збільшити ефективність використання середовища АТ «МОТОР СІЧ» за допомогою розробки перспективної технології її підготовки та розміщення (технології заливки).

За всіх досліджуваних параметрах профілю поверхні, якості, розмірної точності, рівню вібрацій, що виникають в ПС тонкостінної деталі, виявлено перспективність застосування розробленої технології заливки середовища, застосовуваної АТ «МОТОР СІЧ» для фінішного фрезерування моноколіс ГТД. При цьому встановлено такі відмінності від заводської технології: зниження розмаху автоколивань в зоні профілювання  $R_2$  до 5 разів, відхилення форми заданого профілю до 5,5 раз, відхилення від прямолінійності в площині до 6,5 раз та максимального відхилення деталі при різанні до 4 разів.

7. Розроблено спеціальну конструкцію інструменту для фрезерування деталей, що знаходяться в технологічних середовищах, яка дозволяє видаляти надлишки технологічного середовища і сприяти безперешкодному проходженню інструменту за заданою траєкторією руху.

8. Апробація розробленої нової технології заливки при фрезеруванні колеса вентилятора 1ст. двигуна АІ - 222 показала позитивні результати її використання і дала можливість визначити шляхи впровадження у виробництво.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гермашев А.И. О характеристике жесткости для тонкостенной детали типа «зашемленной пластины» / Ю.Н. Внуков, В.А. Логоминов, В.А. Кришталь,

А.И. Гермашев// Високі технології в машинобудуванні: зб.наук.праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – С.211-217.

*Здобувачем запропоновано використувувати поняття «тонкостінна» для деталей типу «затиснених пластин».*

2. Гермашев А.И. Влияние демпфирующих сред на снижение вибраций упругой системы тонкостенной детали/ Ю.Н. Внуков, А.И. Гермашев, В.А. Логоминов, Э.В.Кондратюк, П.А. Каморкин // Сучасні технології в машинобудуванні: зб.наук.праць. –Харків : НТУ «ХПІ», 2013, вип. 8. – С. 85-100.

*Здобувачем експериментально досліджено вплив демпфуючих середовищ на зміну статичних та динамічних характеристик ПС ТЕД.*

3. Гермашев А.И. Влияние применения вязкоупругих демпфирующих сред на эффективность и качество концевое фрезерование тонкостенных деталей / Ю.Н. Внуков, А.И. Гермашев, Э.В. Кондратюк, В.Ф. Мозговой, К.Б. Балущок. // Вісник двигунобудування. – Запоріжжя : АО «Мотор Січ», 2014. – №1. С. – 82-90.

*Здобувачем проведено порівняльні дослідження демпфуючих середовищ і встановлено їх вплив на якість обробленої поверхні при фрезеруванні ТЕД.*

4. Гермашев А.И. Применение модуляции скорости главного движения фрезерного станка для гашения регенеративных автоколебаний при фрезеровании тонкостенных деталей / Ю.Н. Внуков, В.В. Натальчишин, А.И. Гермашев, М.В.Кучугуров, С.И.Дядя // Вісник НТУУ КПІ серії Машинобудування. – К. : НТУУ «КПІ», 2014. – №3(72). – С. 12-17.

*Здобувачем експериментально доведено можливість пригнічення автоколивань при фрезеруванні ТЕД шляхом застосування модуляції швидкості обертання шпинделя.*

5. Гермашев А.И. Особенности реализации возможностей управления приводами станковна базе стойки ЧПУ SIEMENS / М.В. Кучугуров, А.И. Гермашев, С.И. Дядя, А.В. Пирожок // Високі технології в машинобудуванні. –Харків : НТУ «ХПІ», 2015. - випуск 1 (25). – С. 80 – 88.

*Здобувачем розглянуто можливості модуляції швидкості головного руху програмним шляхом.*

6. Гермашев А.И. Методика определения условий контактирования инструмента с тонкостенной деталью при ее концевом фрезеровании / Ю.Н. Внуков, А.И. Гермашев, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2015. – Вып. 85. – С. 48 – 55.

*Здобувачем розроблено методику оцінки умов контактування фрези і ТЕД, а також знаходження параметрів при різанні, які характеризують процеси формоутворення обробленої поверхні.*

7. Гермашев А.И. Разработка методики оценки уровня автоколебаний тонкостенной детали при ее концевом фрезеровании / Ю.Н.Внуков, А.И. Гермашев, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, П.А. Каморкин // Сучасні технології в машинобудуванні. — Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – Вип. 10. С. 3-13.

*Здобувачем розроблено методику кількісної оцінки автоколивань ТЕД при фрезеруванні.*

8. Гермашев А.И. Опробование усовершенствованной технологии подготовки и нанесения демпфирующей среды на моноколеса ГТД при концевом фрезеровании / Ю.Н. Внуков, А.И. Гермашев, Э.В. Кондратюк, В.Ф. Мозговой, К.Б. Балущок // Вістник двигунобудування. – Запоріжжя : АО «Мотор Січ», 2015. – №1. – С. 128-130.

*Здобувачем проведено випробування нової технології застосування технологічного середовища в умовах виробництва АТ «МОТОР СІЧ»*

9. Гермашев А.И. Моделирование та експериментальний спосіб діагностики коливань при фрезеруванні тонкостінних деталей / Д.І. Анпілогов, Ю.М. Внуков, А.І. Гермашев // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – Житомир : Вид-во ЖДТУ, 2015. – Вип. 15. – С. 3-14.

*Здобувачем проведена апробація динамічної моделі збудження коливань шляхом порівняння експериментальних та розрахункових даних.*

10. Гермашев А.И. Влияние условий концевой финишной фрезерования на параметры колебаний тонкостенной детали / С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, А.И. Гермашев, А.А. Сердюк // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2015. – №1. – С.46-53.

*Здобувачем показано особливості зустрічного та попутного фрезерування ТЕД.*

11. Гермашев А.И. Особенности формирования шероховатости обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных деталей / Сборник работ СНТК Университета машиностроения МАМИ. – М. : МАМИ, 2013. – №63 – С. 287-296.

*Здобувачем висвітлено що параметр шорсткості Ra однієї поверхні може мати різноманітні значення у залежності від базової довжини*

12. Гермашев А.И. Влияние СОТС на снижение вибраций при обработке тонкостенных деталей / Э.Ш.Джемилов, А.И. Гермашев // Technologia I Automatyzacja Montazu. – Warsaw, Poland : SIGMA-NOT Sp. z o.o., 2014. – №4. – С. 38-41.

*Здобувачем експериментально доведено можливість зменшення сили відтиску при фрезеруванні ПС ТЄД за допомогою застосування у якості СОТС касторового масла.*

13. Гермашев А.И. Влияние свойств упругой системы тонкостенной детали на эффективность и качество обработки при концевом фрезеровании / Ю.Н. Внуков, А.И. Гермашев, С.И. Дядя // Вестник МГТУ «Станкин». – М. : МГТУ «Станкин», 2014. - № 3(30). - С.45-53.

*Здобувачем виявлено вплив статичних та динамічних характеристик ПС ТЕД на якість обробленої поверхні та ефективність з'йому припуску.*

14. Гермашев А.И. Методология экспериментального исследования закона движения (вибраций) тонкостенной детали при концевом фрезеровании / Ю.Н. Внуков, А.И. Гермашев, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, А.Е. Зубарев // Вестник МГТУ «Станкин». – М. : МГТУ «Станкин», 2015. – №3 (34). С. 15-23.

*Здобувачем розроблено методологію експериментального дослідження вібрацій при фрезеруванні ТЕД.*

15. Пат. 88682 Україна, МПК (2006) F16F15/00. Спосіб вибору в'язкопружних демпфуючих середовищ при фрезеруванні лопаток моноколес ГТД / Гермашев А. І., Логомінов В. О., Кондратюк Е. В., Мозговий В. Ф., Козлова О. Б.; заявник та власник

патенту Запорізький національний технічний університет. – у 201312748 заявл. 01.11.2013; опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6.

*Здобувачем розроблено спосіб дослідження і вибору спеціальних технологічних середовищ, які застосовуються для фрезерування лопаток моноколів ГТД.*

16. Пат. 88683 Україна, МПК (2006) F16F15/00; G01M7/02, Стенд для дослідження в'язкопружних демпфуючих середовищ, призначених для фінішного фрезерування лопаток моноколів ГТД / Гермашев А.І., Логомінов В.О., Кондратюк Е.В., Мозговий В.Ф. Козлова О.Б.; заявник та власник патенту Запорізький національний технічний університет. – у 201312754 заявл. 01.11.2013; опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6.

*Здобувачем розроблено стенд для дослідження спеціальних технологічних середовищ, які застосовуються для фрезерування лопаток моноколів ГТД*

17. Пат. 94382 Україна, МПК (2006) G01H 11/00 G01M 7/02, Стенд для діагностики коливань тонкостінної деталі типу лопаток моноколеса газотурбінного двигуна (ГТД) при кінцевому фрезеруванні / Гермашев А.І.; Логомінов В.О.; Анпілогов Д.І.; заявник та власник патенту Запорізький національний технічний університет. – у 201405982 заявл. 10.11.2014; опубл. 02.06.2014, Бюл. № 21.

*Здобувачем розроблено стенд для діагностики коливань ТЕД шляхом прикладання циклічного навантаження.*

18. Пат. 94974 Україна, МПК (2006) G01H11/00; G01M7/02, Стенд для дослідження коливань при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних елементів деталей / Логомінов В. О., Гермашев А. І., Дядя С.І., Козлова О.Б.; заявник та власник патенту Запорізький національний технічний університет. – у 201405981 заявл. 02.06.2014; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 23.

*Здобувачем розроблено стенд для дослідження коливань ТЕД при його кінцевому фрезеруванні.*

19. Пат. 103031 Україна, МПК (2006) G01H11/00; G01M7/02 Стенд для оцінки коливального процесу деталі при циліндричному фрезеруванні / Внуков Ю. М., Гермашев А. І., Кучугуров М.В., Дядя С. І., Козлова О. Б.; заявник та власник патенту Запорізький національний технічний університет. – у 201506355 заявл. 26.06.2015; опубл. 25.11.2015, Бюл. № 22.

*Здобувачем розроблено стенд для оцінки коливального процесу ТЕД шляхом аналізу умов контактування інструменту з деталлю.*

20. Заявка на Патент u201511270 Україна, Спосіб визначення умов фрезерування визначенням довжини фактичного контакту інструмента зі зразком при кінцевому фрезеруванні тонкостінних деталей / Внуков Ю.М., Логомінов В. О., Гермашев А. І., Дядя С.І., Козлова О.Б., Черновол Н.М.; заявник та власник патенту Запорізький національний технічний університет. – заявл. 16.11.2015.

*Здобувачем розроблено спосіб аналізу умов фрезеруванням визначенням довжини фактичного контакту і коливального руху ТЕД*

21. Заявка на Патент u201511268 Україна, Спосіб аналізу коливань при кінцевому фрезеруванні тонкостінних деталей / Внуков Ю. М., Логомінов В.О., Гермашев А. І., Дядя С.І., Козлова О.Б.; заявник та власник патенту Запорізький національний технічний університет. – заявл. 16.11.2015.

*Здобувачем розроблено критерії, які здатні охарактеризувати коливальний рух ТЕД під час обробки фрезеруванням.*

22. Гермашев А.И. Методология определения статических и динамических характеристик упругой системы тонкостенной детали/ А.И. Гермашев, В.А. Логоминов, Ю.Н. Внуков // Тиждень науки: тези доповідей науково-практичної конференції, 9–13 квітня 2012 р., м. Запоріжжя. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2012. – С.26-27

*Здобувачем розроблено методологію експериментального визначення статичних та динамічних характеристик пружної системи тонкостінного елементу деталі.*

23. Гермашев А.И. Устройство для исследования характеристик демпфирующих сред при фрезеровании тонкостенных деталей/ А.И. Гермашев, Ю.Н. Внуков, В.А. Логоминов// Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: тези доповідей XII Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції присвяченої пам'яті П.Р. Родіна, 22-25 жовтня 2012 р., м. Київ. Секція 1. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – С.42-43.

*Здобувачем розроблено пристосування «міжлопатковий осередок» для дослідження фрезерування тонкостінних елементів деталей, які знаходяться у демпфуючих середовищах.*

24. Гермашев А.И. Влияние демпфирующих сред на снижение вибраций упругой системы тонкостенной детали / А.И. Гермашев, В.А. Логоминов// Международные молодежные научно – технические чтения им. А.Ф. Можайского: тезисы докладов, 21-23 мая 2013г., г. Алушта. – Запорожье : АО «Мотор Сич», 2013. – С. 143-145.

*Здобувачем експериментально досліджено вплив демпфуючих середовищ на зміну характеристик ПС ТЕД для підвищення його вібростійкості.*

25. Гермашев А.И. О характеристиках жесткости и демпфирования в технологических системах, в которых применяют среды для фрезерования лопаток моноколес ГТД / А.И. Гермашев // Прогресивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок: тезисы докладов X Международной научно-технической конф., 23-28 сентября 2013г., г. Алушта. – Запорожье : АО «Мотор Сич», 2013. – С 54-56.

*Здобувачем запропоновано використовувати поняття в'язкопружних демпфуючих середовищ для спеціальних технологічних матеріалів, які застосовують для заповнення міжлопаткових каналів для фрезерування лопаток.*

26. Гермашев А.И. Влияние демпфирующих покрытий на изменение статических и динамических характеристик упругой системы тонкостенной детали/ А.И. Гермашев // Машинобудування України очима молодих: тези доповідей XII Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції, 30 жовтня – 1 листопада 2013 р., м. Кременчук. – 2013. – С. 85-87.

*Здобувачем експериментально встановлено можливість нанесення покриттів на лопатки ГТД для збільшення логарифмічного декременту загасання вільних коливань.*

27. Гермашев А. И. Дослідження деструкції демпфуючих середовищ, які застосовуються для фінішного фрезерування моноколес ГТД / А. И. Гермашев // Прогресивні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць III

Всеукраїнської науково-технічної конференції, 2-6 лютого 2015р., м. Львів – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. – С. 32.

*Здобувачем виявлено можливість порушення суцільності контакту матеріалу демпфуючого середовища та оброблюваної деталі.*

28. Гермашев А.И. Особенности исследования и выбора демпфирующих сред для финишного фрезерования лопаток моноколес ГТД / А.И. Гермашев // Теоретические и прикладные проблемы создания авиационных двигателей и энергетических установок: тезисы докладов. Международная научно – техническая конференция, 16-17 октября 2014 г., г.Запорожье, – Запорожье : АО «Мотор Сич», 2014. – С. 121-124.

*Здобувачем визначено, що у процесі фрезерування лопаток моноколес з застосуванням демпфуючих середовищ характеристики деталі змінюються впродовж всього циклу обробки моноколеса ГТД.*

29. Гермашев А.И. Применение cut-грамм для исследования вибраций при фрезеровании тонкостенных деталей / А.И. Гермашев, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, Ю.Н. Внуков // Теоретические и прикладные проблемы создания авиационных двигателей и энергетических установок: тезисы докладов. Международная научно – техническая конференция, 16-17 октября 2014 г., г.Запорожье. – Запорожье : АО «Мотор Сич», 2014. – С. 74-76.

*Здобувачем запропоновано використання ділянки коливального руху тонкостінної деталі між різанням двох сусідніх зубів для оцінки вібраційних процесів під час обробки.*

30. Гермашев А.И. Оценка эффективности и качества обработки тонкостенных деталей при концевом фрезеровании/ Ю.Н. Внуков, А.И. Гермашев, П.А. Каморкин, Е.Б. Козлова // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві. – Одеса : Наука і техніка, 2014. – №2(7). – С. 97 – 108.

*Здобувачем визначено, що якість обробленої поверхні та ефективність з'йому припуску при фрезеруванні ПС ТЕД залежить від швидкості обертання шпинделя.*

31. Гермашев А.И. Методика исследования колебаний при фрезеровании тонкостенных деталей/ А.И. Гермашев // Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: тези доповідей XIV Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції, 27–31 жовтня 2014 р., м. Суми. – Суми : СумДУ, 2014. – С. 28-29.

*Здобувачем розроблено методика дослідження коливань при фрезеруванні тонкостінних деталей по 10 параметрам базового фрагменту осцилограми.*

32. Гермашев А.И. Методика и устройство для оценки эффективности и точности обработки тонкостенных деталей при концевом фрезеровании / Ю.Н. Внуков, А.И. Гермашев // Современные проблемы машиноведения: тезисы докладов X Междунар. науч.- техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), 23–24 октября 2014 г., г. Гомель. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2014. – С. 32-33

*Здобувачем розроблено пристрій для визначення об'єму зрізаного припуску при фрезеруванні тонкостінних деталей.*

33. Гермашев А.И. Устройство для исследования условий контактирования инструмента с деталью при цилиндрическом фрезеровании тонкостенных деталей / А.И. Гермашев, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, Ю.Н. Внуков// «Инженерия поверхности и

реновация изделий»: тезисы доклада XV Международной научно-технической конференции, 01–05 июня 2015 г., г. Затока. – К. : АТМ України, 2015. – С. 45-47.

*Здобувачем розроблено систему контролю умов контактування фрези з оброблюваною деталлю.*

34. Гермашев А.І., Методи пригнічення вібрацій при фрезеруванні тонкостінних деталей / Дядя С.И., Гермашев А.И., Козлова Е.Б. // Дванадцятий міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові: тези доповідей, 28–29 травня 2015 р., м. Львів. – Львів: КІНПАРТІ ЛТД, 2015. – С. 83-84.

*Здобувачем запропоновано комплексний підхід пригнічення коливань при фрезеруванні ТЕД, який включає вплив на зону різання та ПС ТЕД.*

35. Гермашев А.И. Методики экспериментального и расчетного определения условий колебательного движения тонкостенной деталей при фрезеровании / А.И. Гермашев // Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: тези доповідей XX Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції, жовтня, 4-7 листопада 2015 р., м. Житомир. – Житомир : ЖДТУ. – 2015. – С. 17-20.

*Здобувачем запропоновано динамічну модель збудження коливань для аналізу впливу зміни характеристик деталі на параметри її вібростійкості.*

36. Giermaszew A. I. Influence of cooling liquids on vibration decreasing during thin-walled elements treatment / E. S. Dzhemilov, A. I. Giermaszew // VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna «TECHNIKA I TECHNOLOGIA MONTAŻU MASZYN TTMM 2014», 27– 30 maja 2014r., Rzeszów – Berezka. – 2014. – P. 16.

*Здобувачем проведено порівняння впливу різних видів СОТС на пригнічення коливань ПС ТЕД.*

## АНОТАЦІЇ

**Гермашев Антон Ігорович «Підвищення якості кінцевого фрезерування тонкостінних елементів деталей шляхом застосування спеціальних технологічних середовищ». - На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 - технологія машинобудування. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2016.

Дисертаційна робота присвячена виявленню основних закономірностей впливу спеціальних технологічних середовищ на зміну властивостей пружної системи тонкостінної деталі для підвищення її вібростійкості та якості обробки, а також розробці технології ефективного застосування спеціальних технологічних середовищ у виробництві для фрезерування моноколів ГТД.

Розроблено систему критеріїв оцінювання умов коливального руху тонкостінної деталі за десятьма параметрами БФО, яка кількісно показує високу ефективність застосування спеціальних технологічних середовищ для зниження вібрацій тонкостінної деталі при фрезеруванні.

Встановлено що ефективність видалення припуску при фрезеруванні ТЕД істотно залежить не тільки від статичних і динамічних властивостей пружної системи

деталі, але і від швидкості обертання інструменту і напрямку подачі (зустрічне чи попутне).

Спосіб оцінки порушення цілісності контакту середовища з деталлю по зміни ЧВК системи  $f_{ck}$  дозволив розробити технологію ефективного застосування спеціальних середовищ на виробництві для фрезерування лопаток моноколів ГТД.

*Ключові слова:* спеціальне технологічне середовище, технологія обробки, кінцеве фрезерування, моноколесо ГТД, якість, розмірна точність.

**Гермашев Антон Игоревич «Повышение качества концевое фрезерования тонкостенных элементов деталей путем применения специальных технологических сред».** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2016.

Диссертационная работа посвящена выявлению основных закономерностей влияния специальных технологических сред на изменение свойств упругой системы тонкостенной детали для повышения ее виброустойчивости, точности и качества обработки, а также разработке технологии эффективного применения специальных сред в производстве для фрезерования моноколес ГТД.

Разработанное устройство и методика для измерения эффективности удаления припуска, определения точности и качества обработанной поверхности при фрезеровании тонкостенной детали позволили установить, что эффективность удаления припуска при фрезеровании тонкостенной детали существенно зависит не только от статических и динамических свойств упругой системы детали, но и от скорости вращения инструмента и направления подачи (встречное или попутное). С увеличением скорости изменяются условия возбуждения вибраций, увеличивается эффективность удаления припуска, особенно при встречном фрезеровании.

Разработанный способ оценки нарушения сплошности контакта среды с деталью по изменению ЧСК системы  $f_{ck}$  позволил экспериментально показать, что при применении специальных технологических сред наблюдается явление нарушения сплошности контакта между средой и деталью в процессе ее фрезерования, приводя к уменьшению частотных характеристик обрабатываемого изделия и ухудшению его виброустойчивости.

Разработана система критериев оценивания условий колебательного движения тонкостенной детали по десяти параметрам БФО, которая количественно показывает высокую эффективность применения специальных технологических сред для снижения вибраций тонкостенной детали при фрезеровании.

Экспериментально показана связь размаха автоколебаний детали во время обработки и параметра шероховатости обработанной поверхности  $Ra$ . Полученные результаты свидетельствуют о том, что БФО является достоверным источником информации о колебательном движении тонкостенной детали во время фрезерной обработки, а также то, что лишь незначительная доля общего колебательного процесса детали является определяющей в вопросах формирования качества обработанной поверхности при фрезеровании ТЭД.

Разработана новая технология эффективного применения специальных технологических сред на производстве (технология заливки) для фрезерования лопаток моноколес ГТД. Технология заливки была испытана при моделировании всего цикла обработки моноколеса на экспериментальном стенде. Положительный эффект, в сравнении с заводским вариантом использования технологической среды, был получен при моделировании обработки всех лопаток, кроме последней. При испытании данной технологии в производстве было также установлено существенное повышение виброустойчивости процесса обработки и качества обработанной поверхности. В связи с этим разработаны рекомендации по внедрению данной технологии в технологический процесс изготовления моноколес ГТД, форма для заливки моноколеса вне рабочей зоны станка и конструкция инструмента для фрезерования деталей, окруженных технологическими средами, позволяющая удалять излишки технологической среды, которые находятся на пути движения инструмента.

*Ключевые слова:* специальная технологическая среда, технология обработки, концевое фрезерование, моноколесо ГТД, качество, размерная точность.

**Anton I. Germashev “Increasing of quality of end milling by using special technological materials”.** – Manuscript

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.02.08 – machinebuilding technology. National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2016.

The aim of the thesis is to identify the main regularities of influence of special technological materials (filler materials) on changing characteristics of elastic system of thin-walled detail and increasing of vibration stability, dimensional accuracy and reducing of surface roughness. Also this work is devoted to development of technology of efficient use of special technological materials in manufacture for producing blisks and impellers of gas turbine engine (GTE).

The developed device and method for measuring of real volume of removed material, dimensional accuracy and quality of surface finish in thin-walled milling made possible to establish that the removal efficiency in thin-walled milling depends not only on static and dynamic characteristics of elastic system of thin-walled detail, but it also depends on spindle speed and feed direction (up and down milling).

In this thesis was developed system of evaluation criteria of the conditions of the vibrational motion of thin-walled detail, which includes ten parameters on the base fragment of oscillogram, which quantitatively shows the highly efficient of special technological materials using for reducing vibrations of thin-walled detail during milling.

The technology for the efficient use of special technological materials in the manufactory for milling blades of blisks and impellers of GTE is developed, as well as recommendations on the implementation of this technology to the industry.

*Keywords:* special technological material, processing technology, end milling, blisks GTE, quality, dimensional accuracy.

Підписано до друку 20.05.2016 р. формат 60x84 1/16 0,9 д.а. Тираж 100 прим. Зам. №450  
69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, Друкарня, вул.Жуковського,64

