

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ЛОГОМІНОВ ВІКТОР ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 621.914

**ФОРМУВАННЯ ШОРСТКОСТІ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ
КІНЦЕВОМУ ЦИЛІНДРИЧНОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ ТОНКОСТІННИХ
ЕЛЕМЕНТІВ ДЕТАЛЕЙ**

05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків–2013

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Внуков Юрій Миколайович
Запорізький національний технічний університет,
завідувач кафедри технології машинобудування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Залога Вільям Олександрович,
Сумський державний університет,
завідувач кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів

доктор технічних наук, професор
Мироненко Євгеній Васильович
Донбаська державна машинобудівна академія, декан інженерно-економічного факультету

Захист відбудеться "21" лютого 2013 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

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

Автореферат розісланий « » січня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Пермяков О.А.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Певні деталі в сучасному машинобудуванні, особливо в авіаційній промисловості, енергетичному машинобудуванні, інструментальному виробництві (наприклад лопатки турбін, моноколеса компресора та ін.) являють собою тонкостінні конструкції, жорсткість яких на порядок (а іноді і більше) нижче, ніж жорсткість пружної системи верстата, на якому ці вироби виготовляються. Такі деталі часто виготовляються кінцевим фрезеруванням з цільного куска матеріалу. Мала жорсткість тонкостінних деталей призводить до появи вібрацій, які є одною з головних перешкод на шляху подальшого підвищення якості обробки. Шорсткість і похибка поверхні оброблених деталей визначається відносними зміщеннями інструмента і оброблюваної деталі, які викликані коливаннями при її обробці. Амплітуда та частота коливань, виникаючих під час обробки, залежить в основному від характеристик пружної системи тонкостінної деталі та режимів фрезерування.

Таким чином, актуальною є задача встановлення механізму виникнення коливань, їх зв'язку з шорсткістю оброблюваної поверхні та визначення технологічних рекомендацій для покращення якості кінцевого фрезерування тонкостінних деталей.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано на кафедрі технології машинобудування Запорізького національного технічного університету у рамках державних НДР МОНмолодьспорту України: «Розробка технологічних основ забезпечення якості обробки нежорстких деталей при високошвидкісному різанні» (ДР № 0106U000366) та «Підвищення вібростійкості процесу фрезерування нежорстких деталей» (ДР № 0109U000219), в яких здобувач був відповідальним виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою досліджень є виявлення основних закономірностей формування шорсткості обробленої поверхні та визначення шляхів підвищення її якості при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних деталей.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні задачі:

1. Розробити та створити вимірювальний стенд, моделюючий умови фрезерної обробки тонкостінних деталей.
2. Розробити методики запису та аналізу осцилограм коливань тонкостінної деталі та профілограм її обробленої поверхні.
3. Дослідити особливості формування шорсткості та механізмів збудження коливань при різних умовах фрезерування тонкостінних деталей.
4. Встановити зв'язок між осцилограмами коливань тонкостінної деталі та профілограмою її обробленої поверхні.
5. Визначити шляхи покращення якості обробленої поверхні тонкостінної деталі в залежності від умов фрезерування.

Об'єкт дослідження – явище погіршення шорсткості обробленої поверхні в результаті появи коливань при механічній обробці тонкостінних деталей.

Предмет дослідження – закономірності впливу характеристик тонкостінних деталей та умов обробки на механічні коливання та формування шорсткості

обробленої поверхні при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних деталей.

Методи дослідження. Дослідження велись експериментальними методами та математичним моделюванням. Експерименти по кінцевому циліндричному фрезеруванні проводили на спеціально розробленому вимірювальному стенді. Вимірювальний стенд оснащений тензодатчиками та індуктивним датчиком Osiprox XS1 M18AB120 для вимірювання коливань тонкостінної деталі. Обробка осцилограм коливань проводилась за допомогою спеціально розроблених програм на базі математичного пакету MATLAB. Профілограми обробленої поверхні записували профілографом-профілометром 170311 заводу «Калібр» підключеним через АЦП до комп'ютера. Обробка профілограм для отримання параметрів шорсткості проводили в спеціально розробленій програмі на базі математичного пакету MATLAB. Математична модель формування шорсткості обробленої поверхні з використанням експериментальних осцилограм також реалізована в середовищі MATLAB. Експерименти проводились на базі науково-дослідної лабораторії динамічних випробувань Запорізького національного технічного університету.

Наукова новизна отриманих результатів:

- *вперше встановлено*, що періодичні коливання при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних деталей мають різні механізми збудження, які залежать від відношення часу різання одним зубом фрези до періоду власних коливань тонкостінної деталі. Якщо це відношення знаходиться в межах 2...8, то розвиваються регенеративні коливання, пов'язані з різанням по вібраційному сліду, залишеному на поверхні різання попереднім зубом. Якщо час різання одним зубом фрези менше ніж період власних коливань тонкостінної деталі, причиною появи коливань є періодична зміна точки врізання зуба фрези в деталь, яка здійснює власні згасаючі коливання під час холостого ходу зуба фрези;

- *вперше* за допомоги методу суміщених осцилограм отримані комплексні картини коливань при фрезеруванні тонкостінної деталі. Це дозволило оцінити вплив умов фрезерування і характеристик ПС деталі на вібростійкість обробки і формування шорсткості обробленої поверхні, оцінити різні методи пригамовування коливань і розробити рекомендації щодо покращення якості фрезерування тонкостінних деталей;

- *подальший розвиток отримало* моделювання процесу формування шорсткості обробленої поверхні при циліндричному кінцевому фрезеруванні тонкостінних деталей, в якому використовують реальні осцилограми відхилення деталі від точки рівноваги при її обробці;

- *встановлено*, що для розглянутих умов фрезерування тонкостінних деталей у випадку, якщо мають місце регенеративні коливання, більш вібростійкою є попутна схема фрезерування. Якщо при фрезеруванні з'являються коливання пов'язані з періодичною зміною точки врізання, більш вібростійкою є зустрічна схема фрезерування.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що практичні прийоми пригамовування коливань при фрезеруванні тонкостінних деталей, можуть мати широке застосування в оброблювальних галузях авіаційного двигунобудування та інструментального виробництва. Результати досліджень та рекомендації по

покращенню шорсткості при кінцевому фрезеруванні тонкостінних деталей передані на ДП «Івченко-Прогрес» (м. Запоріжжя) та враховуються для вдосконалення технології їх обробки, що підтверджено актом про використання результатів дослідження.

Результати роботи впроваджені в навчальний процес на кафедрах металорізальних верстатів та інструменту і технології машинобудування ЗНТУ при викладанні лекційних курсів з дисциплін «Теорія різання матеріалів» та лабораторних робіт з дисципліни «Контрольно-вимірвальні пристрої».

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: Експериментальні дослідження, виготовлення дослідного стенду та зразків, розробка програм для обробки результатів експериментів, математична модель процесу формування шорсткості обробленої поверхні виконані здобувачем самостійно. Постановка задач та обговорення результатів експериментів виконані спільно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертації доповідались та обговорювались на: ІХ (м. Запоріжжя, 2009 р.), Х (м. Суми, 2010 р.) та ХІІ (м. Київ, 2012 р.) Всеукраїнських молодіжних науково-технічних конференціях «Машинобудування України очима молодих»; ХІХ, ХХ Міжнародному науково-технічному семінарі «Высокие технологии в машиностроении и нормативно-техническое регулирование» (м. Алушта, 2011 р. та 2012 р.); ІХ Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології життєвого циклу авіаційних двигунів та енергетичних установок» (м. Алушта, 2012 р.).

У повному обсязі дисертація доповідалась на між кафедральному семінарі кафедри технології машинобудування, кафедри технології будування авіаційних двигунів та кафедри металорізальних верстатів та інструменту ЗНТУ та кафедрі інтегрованих технологій машинобудування НТУ «ХП».

Публікації. Основний зміст дисертації відображено в 11 публікаціях, з них: 7 статей в наукових фахових виданнях України, 1 патент на корисну модель та 3 тези доповідей науково-технічних конференцій.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних джерел, додатку. Повний обсяг дисертації становить 226 сторінки, з них: 101 рисунок по тексту 40 рисунків на окремих 40 сторінках, 6 таблиці по тексту, 1 таблиця на окремій 1 сторінці, список використаних джерел з 124 найменувань на 15 сторінках, 2 додатки на 2 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дана загальна характеристика роботи, обґрунтовано її актуальність, сформульовано мету і задачі досліджень, визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведено інформацію про апробацію та публікації основних результатів роботи.

У першому розділі обґрунтовано використання терміну тонкостінна деталь замість термінів маложорстка або нежорстка деталь. Встановлено, що коливальні процеси при фрезеруванні тонкостінної деталі визначаються в основному трьома її параметрами: статичною жорсткістю, частотою власних коливань та логарифмічним декрементом згасаючих коливань. Визначено, що при фрезеруванні тонкостінних деталей визначальний вплив на шорсткість оброблюваної поверхні мають її коливання відносно інструменту.

На основі аналізу наукових праць Кашіріна О.І., Кучми Л.К., Клауча Д.М., Ельясберга М.Є., Кудінова В.О., Ташлицького Н.І., Жаркова І.Г., Кедрова С.С., Петракова Ю.В., Клименко С.А., Струтинського В.Б., Равської Н.С., Залого В.О., Мироненко Є.В., Панчука В.Г., Васіна С.О., Свініна В.М., Оборського Г.О., Plusty J., Altintas Y., Budak E., Seguy S., Raja Izamshah та ін. представлено сучасні уявлення про виникнення коливань під час механічної обробки та методи зниження їх інтенсивності. З'ясовано, що при фрезеруванні тонкостінних деталей можлива поява як вимушених коливань, викликаних періодичним врізанням зубом фрези, так і регенеративних автоколивань, що пов'язані з обробкою по вібраційному сліду, залишеному на поверхні різання попереднім зубом.

Проведений аналіз апаратури та датчиків для дослідів динамічних процесів в технологічних системах верстатів та обґрунтовано використання індуктивних датчиків для досліджень. Зроблено висновок про те, що для розробки рекомендацій щодо покращення якості обробленої поверхні тонкостінних деталей необхідно встановити основні закономірності збудження коливань і формування шорсткості обробленої поверхні при їх фрезеруванні.

У другому розділі описані методи та умови проведення експериментів по фрезеруванню тонкостінних деталей. Дослідження проводили на спеціально розробленому стенді (рис. 1), який дозволяє роздільно розглядати вплив режимів фрезерування та характеристик ПС деталі на коливання та шорсткість обробленої поверхні деталі.

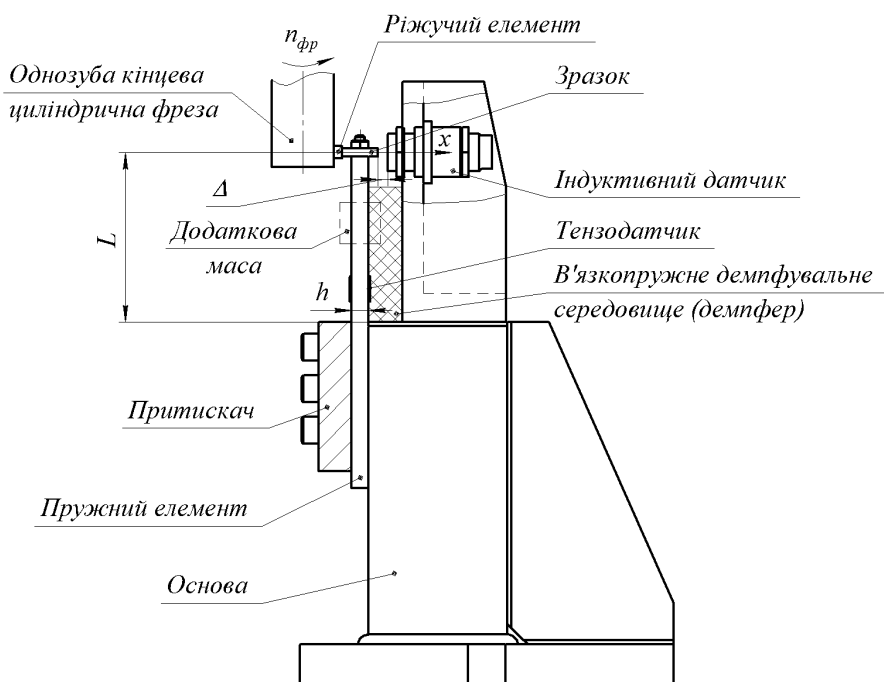


Рис. 1. Принципова схема стенда для досліджень коливань тонкостінних деталей

Експериментальне визначення статичних характеристик пружного елемента станда виконували за допомоги зразкового динамометра ДОСМ-3-0,2. Жорсткість пружного елемента товщиною $h=8$ мм при вильоті $L=80$ мм становить $C=2,24$ Н/мкм, що на порядок нижче ніж жорсткість шпинделя з однозубою фрезою – $C_{фр}=20,2$ Н/мкм. Динамічні характеристики визначали за осцилограмою згасаючих коливань пружного елемента тонкостінної деталі, які збуджували ударним методом шариком підвішеному на нитці.

Результати порівняння розрахункових та експериментально визначених даних показали, що для всіх випадків спостерігаються розбіжності, пов'язані з впливом контактної жорсткості при затисканні деталі, яка не враховується при розрахунках.

Встановлено, що частота власних коливань (ЧВК) тонкостінної деталі зменшується зі зменшенням товщини та збільшенням вильоту пружного елемента, а також зі збільшенням його маси. Логарифмічний декремент згасання, визначаючий демпфувальні властивості ПС деталі, зростає зі збільшенням вильоту пружного елемента та маси коливальної системи.

У третьому розділі визначено вплив умов фрезерування та характеристик ПС тонкостінної деталі на шорсткість обробленої поверхні.

Дослідження впливу частоти обертання фрези $n_{фр}$ на параметр шорсткості Ra проводили для двох швидкісних діапазонів. Перший – для $n_{фр}=56, 90, 224, 355$ та 560 об/хв при подачі на зуб $S_z=0,2$ мм/зуб; другий – для $n_{фр}=224, 560, 1120$ та 1800 об/хв при $S_z=0,05$ мм/зуб. Товщина припуску, що знімався, скрізь складала $t=0,5$ мм, ширина зрізу – $B=3,4$ або 4 мм. Результати вимірювання Ra показали, що в першому швидкісному діапазоні зі збільшенням $n_{фр}$ параметр Ra зростає, причому для зустрічного фрезерування значно швидше. При $n_{фр}=560$ об/хв різниця досягає $3,8$ разів. В другому швидкісному діапазоні при збільшенні $n_{фр}$ від 224 об/хв до 560 об/хв спостерігається ріст Ra . При зустрічному фрезеруванні ріст Ra , також як і в першому діапазоні, більш інтенсивний ніж при попутному (рис. 2). Зі збільшенням $n_{фр}$ до 1120 об/хв шорсткість знижується, а при подальшому збільшенні до 1800 об/хв знову зростає. В зоні високих частот обертання фрези від $n_{фр}=1120$ об/хв до $n_{фр}=1800$ об/хв шорсткість при попутному фрезеруванні вище ніж при зустрічному. Зі збільшенням частоти обертання шпинделя $n_{фр}$ від 224 об/хв до 1800 об/хв шорсткість Ra змінюється не монотонно. Мають місце дві зони погіршення шорсткості: $n_{фр}=560$ об/хв та $n_{фр}=1800$ об/хв. На рис. 3 наведені відповідні профілограми обробленої поверхні. З них видно, що при $n_{фр}=560$ об/хв та $n_{фр}=1800$ об/хв в профілі обробленої поверхні з'являється періодична компонента, що свідчить про вплив коливань на формування шорсткості обробленої поверхні.

Збільшення подачі на зуб S_z від $0,02$ до $0,1$ мм/зуб при $n_{фр}=560$ об/хв та зустрічному фрезеруванні призводить до значного зростання Ra – від $2,59$ до $28,7$ мкм. При подальшому збільшенні S_z від $0,1$ до $0,32$ мм/зуб Ra практично не змінюється. Профілограми для всіх цих режимів показують, що рельєф поверхні має строго періодичний характер з шагом хвилі, що зменшується зі збільшенням подачі.

При $n_{фр}=1800$ об/хв зі збільшенням подачі на зуб S_z від $0,01$ до $0,05$ мм/зуб параметр Ra збільшується, причому при попутному фрезеруванні більше ніж при зустрічному. Профілограми обробленої поверхні показують, що зі збільшенням S_z зростає доля періодичної складової в профілі обробленої поверхні.

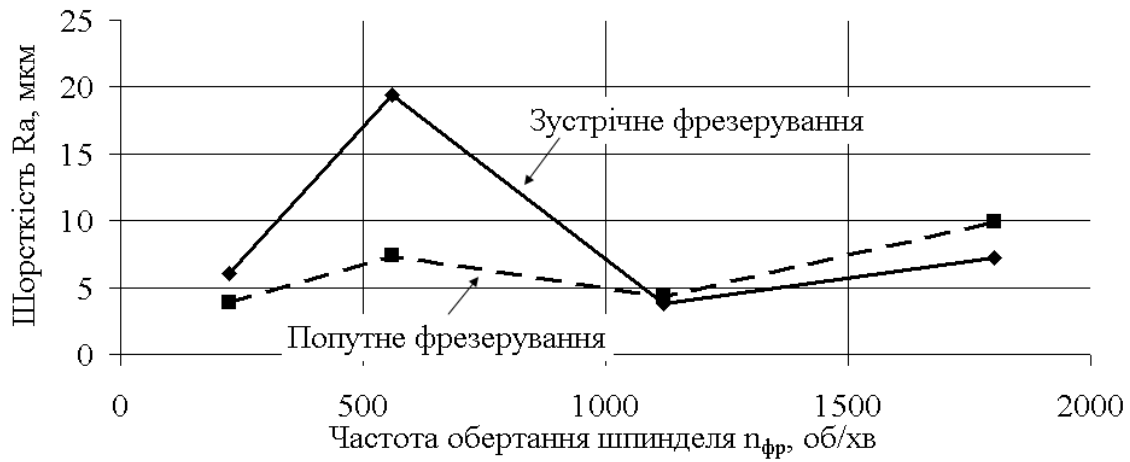


Рис. 2. Вплив частоти обертання та напрямку подачі на шорсткість Ra ($S_z=0,05$ мм/зуб; $t=0,5$ мм; $B=3,4$ мм)

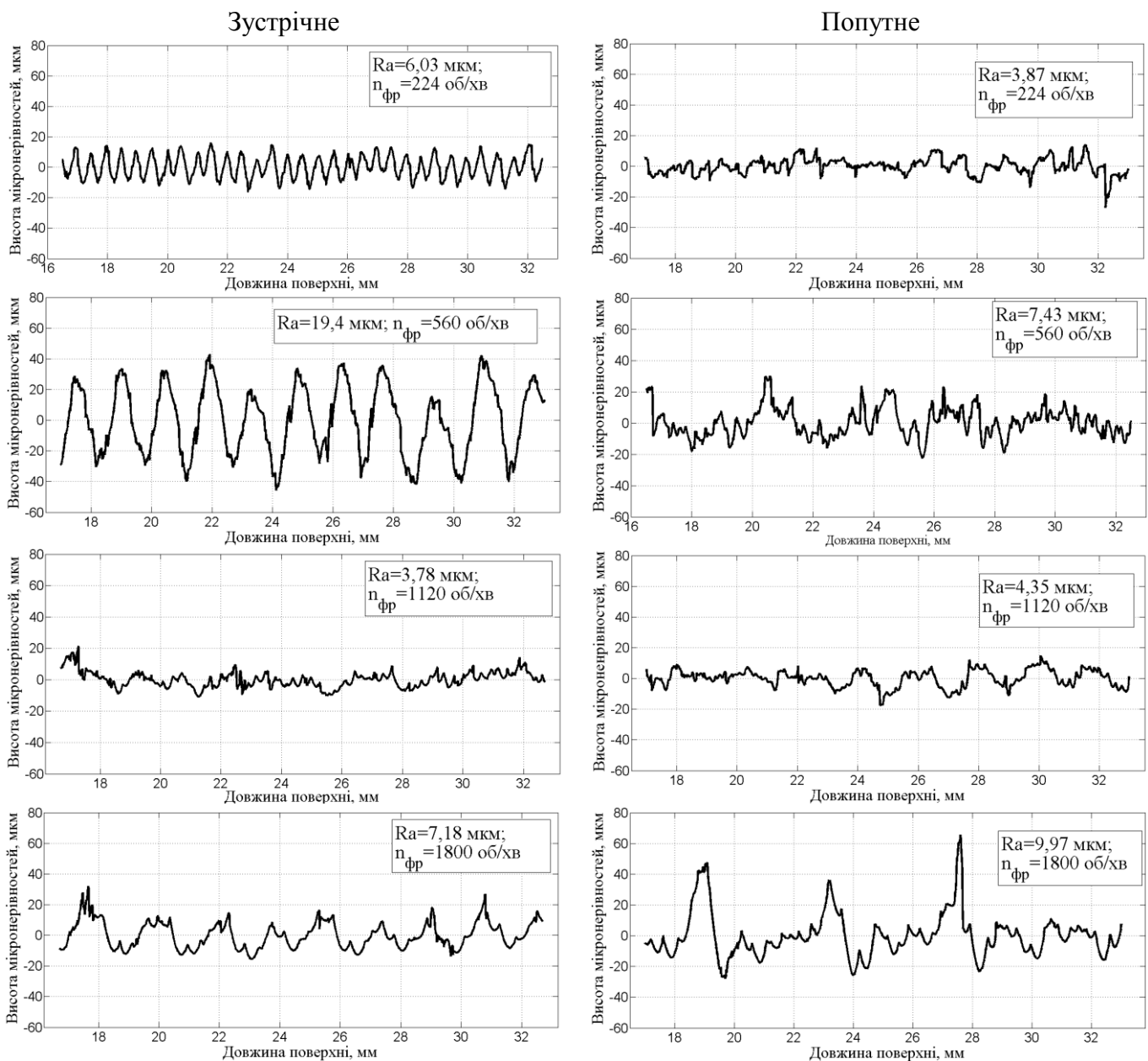


Рис. 3. Профілограми обробленої поверхні ($S_z=0,05$ мм/зуб; $t=0,5$ мм; $B=3,4$ мм)

При формуванні шорсткості обробленої поверхні дуже важливим є геометрія ріжучого леза (радіус округлення ріжучої кромки – ρ та ширина фаски зносу – δ_z). Від цих параметрів залежить умови пластичного деформування шару, що зрізується, та контакту задньої поверхні інструмента з обробленою поверхнею. З іншого боку значення ρ та δ_z впливають на силу відтискання деталі $P_{відм}$, де площадка зносу по задній поверхні може виконувати додаткову роль віброгасильної фаски.

Встановлено, що зі збільшенням ρ параметр Ra , як правило, зростає (рис. 4). Однак для швидкості $n_{фр}=224$ об/хв при зустрічному фрезеруванні зростання ρ не призводить до зростання Ra . Для цих умов фрезерування профілограма змінює свою форму від періодичної до випадкової.

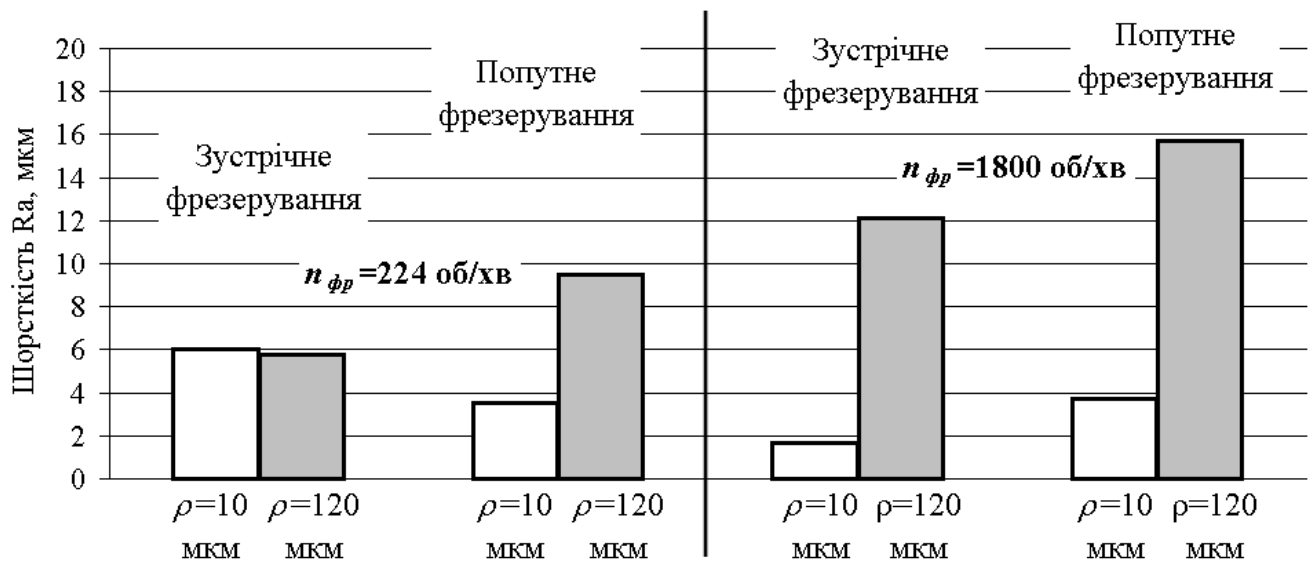


Рис. 4. Вплив радіусу округлення ріжучої кромки ρ на шорсткість Ra

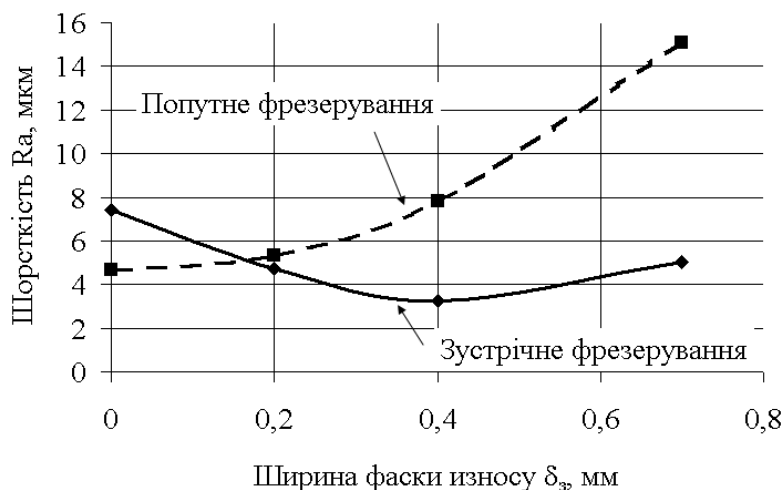


Рис. 5. Вплив ширини фаски зносу δ_z на шорсткість Ra ($n_{фр}=224$ об/хв; $S_z=0,05$ мм/зуб; $t=0,5$ мм; $B=3,4$ мм)

Збільшення δ_z призводить, як правило, до погіршення шорсткості Ra . Однак, при частоті обертання фрези $n_{фр}=224$ об/хв шорсткість обробленої поверхні Ra навіть при $\delta_z = 0,7$ мм залишається нижчою ніж при $\delta_z=0$ мм (рис. 5). В цьому випадку зі зростанням δ_z від 0 до 0,7 мм змінюється вигляд профілограми – від періодичного до випадкового.

Оцінка технологічних можливостей покращення шорсткості в зонах великих

значень Ra показала наступне. Використання інструментів зі штучною фаскою зносу призводить до покращення шорсткості Ra як при зустрічному фрезеруванні при $n_{фр}=560$ об/хв так і для попутного фрезерування при $n_{фр}=560$ об/хв (рис. 6). При великих частотах обертання ($n_{фр}=1800$ об/хв) застосування інструмента з фаскою зносу призводить до погіршення Ra . Введення додаткової маси в ПС деталі при $n_{фр}=560$ об/хв призводить до зниження шорсткості Ra при зустрічному фрезеруванні та збільшенню Ra для попутного фрезерування (рис. 6). При $n_{фр}=1800$ об/хв введення додаткової маси в ПС деталі погіршує Ra .

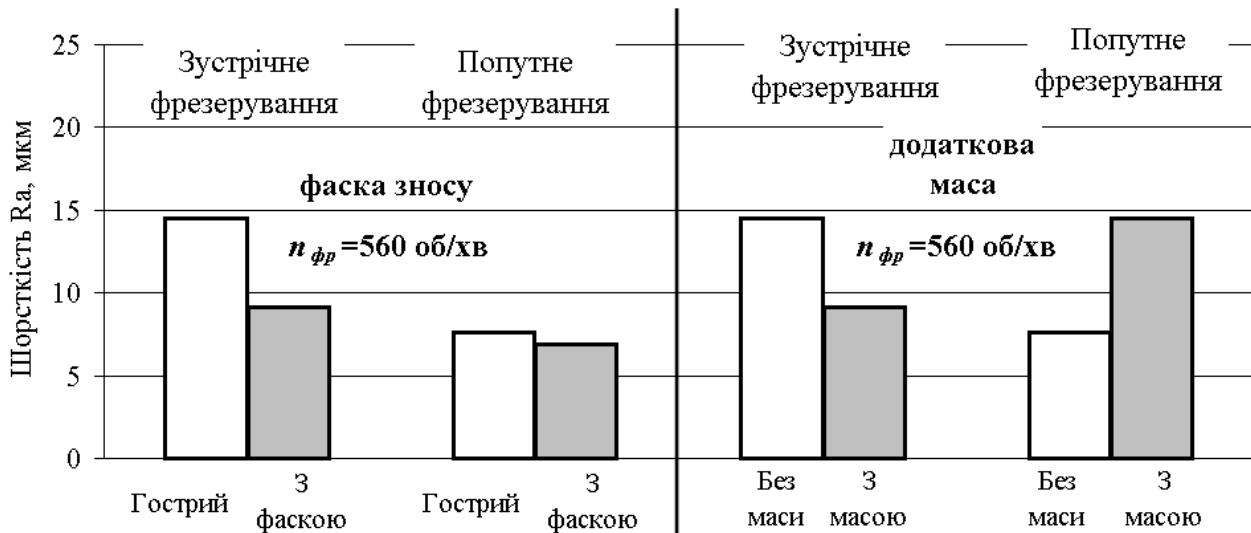


Рис. 6. Вплив фаски зносу ($\delta_z = 0,28$ мм) та введення додаткової маси на шорсткість Ra ($n_{фр}=560$ об/хв; $S_z=0,05$ мм/зуб; $t=0,5$ мм; $B=4$ мм)

Застосування в'язкопружних демпфувальних середовищ є ефективним для великих частот обертання фрези ($n_{фр}=1800$ об/хв, рис. 7), причому для попутного фрезерування спостерігається значне (до 6 разів) зменшення значення Ra . При середніх частотах обертання шпинделя $n_{фр}=560$ об/хв застосування демпферів не призводить до зниження Ra (рис. 7).

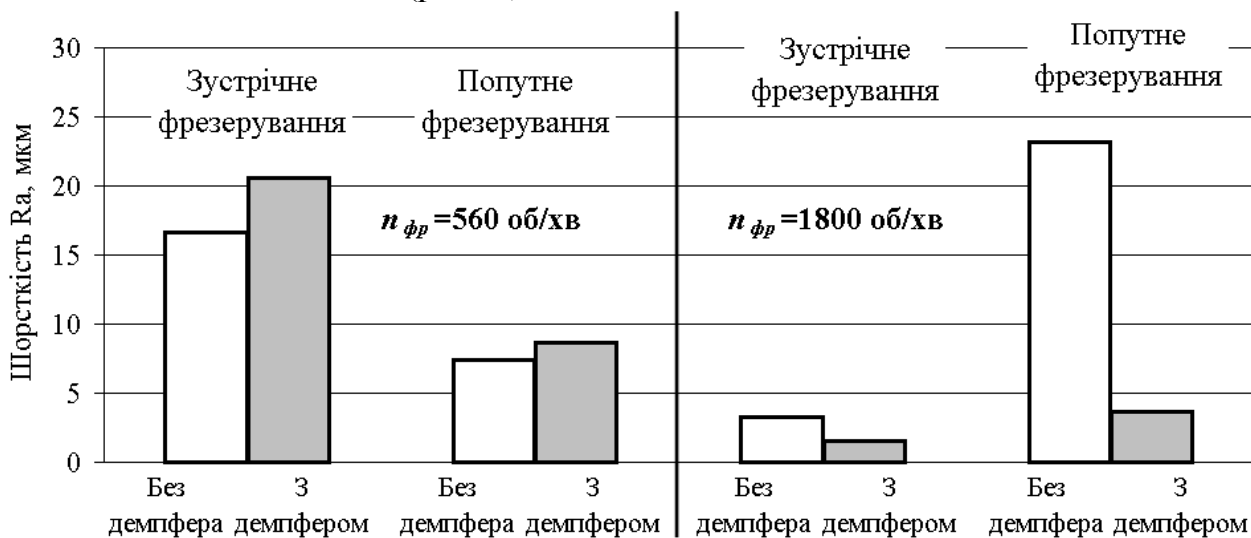


Рис. 7. Вплив введення в'язкопружного демпфувального середовища в ПС деталі на шорсткість Ra ($S_z=0,05$ мм/зуб; $t=0,5$ мм; $B=4$ мм)

Використання виходжувального проходу, тобто останнього проходу без подачі на глибину припуску t для частот обертання $n_{фр}=560$ об/хв та $n_{фр}=1800$ об/хв не показав покращення шорсткості Ra .

У четвертому розділі проведені дослідження особливостей збудження коливань при різних умовах фрезерування тонкостінної деталі та встановлено зв'язок між осцилограмами коливань та профілограмою її обробленої поверхні.

При циліндричному фрезеруванні частина поверхні різання після зрізання припуску залишається на оброблюваній поверхні (зона I на рис. 8). Умови її коливання на вході фрези при зустрічному фрезеруванні (рис. 8, а) та на виході зуба фрези з деталі при попутному фрезеруванні (рис. 8, б) визначають рівень шорсткості обробленої поверхні.

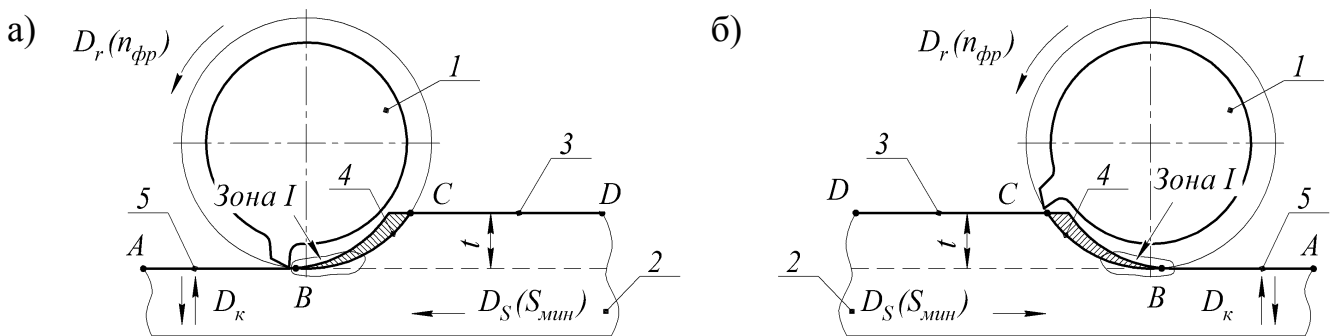


Рис. 8. Схема циліндричного фрезерування тонкостінної деталі:

а – зустрічне фрезерування; б – попутне фрезерування;

1 – циліндрична фреза; 2 – тонкостінна деталь; 3 – поверхня, що оброблюються; 4 – поверхня різання; 5 – оброблена поверхня; Зона I – зона формування шорсткості на обробленій поверхні

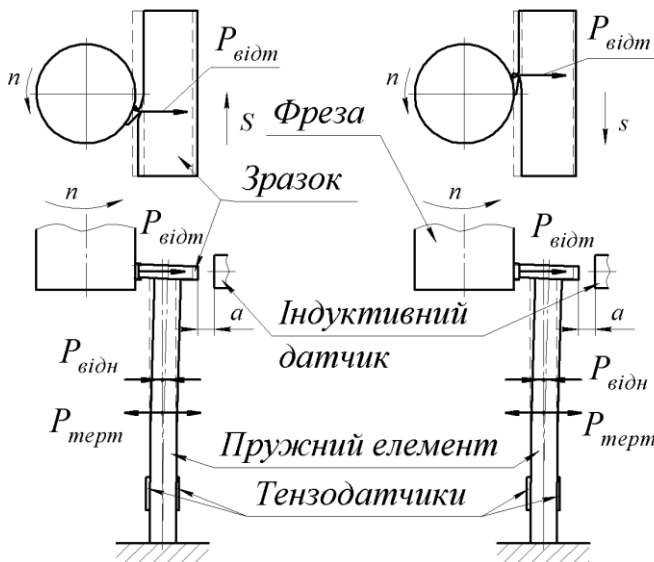


Рис. 9. Схема дослідження коливань тонкостінної деталі

Під час фрезерування на ПС тонкостінної деталі діють три сили (рис. 9):

1. $P_{відт}$ – сила відтискання – складова сили різання, що відтискає тонкостінну деталь від інструменту;

2. $P_{відн}$ – сила відновлювання – це сила пружності, яка повертає деталь до положення рівноваги;

3. $P_{терт}$ – сила тертя, що гасить коливання деталі за рахунок дисипації енергії.

Схема дослідження всіх трьох сил представлена на рис. 9. Відхилення тонкостінної деталі і відповідно сили, що на її діють, вимірювали двома типами датчиків: тензодатчиками та індуктивним датчиком.

На рис. 10 представлені вимірювальні можливості методики дослідження осцилограм коливань тонкостінної деталі, які записуються датчиками.

На рис. 10 прийняті наступні позначення:

$\tau_{\text{цикл.фр}}$ – час циклу фрезерування. Цикл фрезерування складається з часу різання $\tau_{\text{різ}}$ та часу холостого ходу $\tau_{\text{х.х}}$ – між точкою виходу із зони різання попереднього зуба та точкою входу в зону різання наступного зуба; $\tau_{\text{різ}}^{\text{вх}}$ – частина часу зрізання припуску одним зубом в період збільшення сили відтискання деталі до її максимального значення – $P_{\text{відт}}^{\text{max}}$; $\tau_{\text{різ}}^{\text{вих}}$ – частина часу зрізання припуску одним зубом в період зменшення сили відтискання від максимального її значення $P_{\text{відт}}^{\text{max}}$; $\tau_{\text{ЗПС}}$ – час заспокоєння ПС деталі, тобто згасання її вільних коливань.

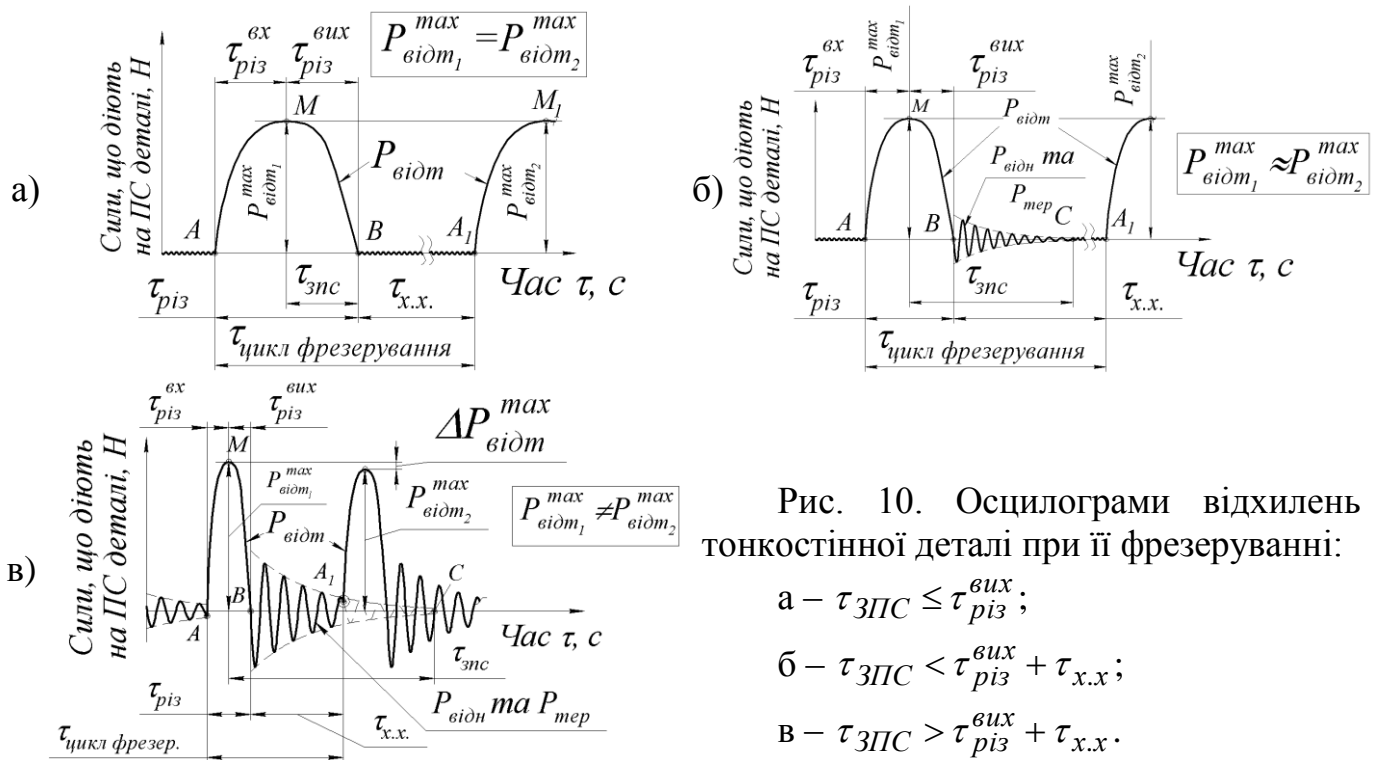


Рис. 10. Осцилограми відхилень тонкостінної деталі при її фрезеруванні:

а – $\tau_{\text{ЗПС}} \leq \tau_{\text{різ}}^{\text{вих}}$;

б – $\tau_{\text{ЗПС}} < \tau_{\text{різ}}^{\text{вих}} + \tau_{\text{х.х}}$;

в – $\tau_{\text{ЗПС}} > \tau_{\text{різ}}^{\text{вих}} + \tau_{\text{х.х}}$.

При циліндричному фрезеруванні тонкостінних деталей можливі три варіанти:

1. Фрезерування відбувається в умовах, коли час заспокоєння ПС деталі менший або дорівнює часу, при якому сила відтискання $P_{\text{відт}}$ знижується від рівня свого максимального значення $P_{\text{відт}}^{\text{max}}$ до моменту виходу зуба фрези із зачеплення. Тобто виконується відношення $\tau_{\text{ЗПС}} \leq \tau_{\text{різ}}^{\text{вих}}$ (рис. 10, а).

2. Фрезерування проходить в умовах, коли при виході зуба фрези із зачеплення, ПС деталі не встигла відновитись в стан рівноваги і їй необхідний деякий час для заспокоєння. Однак при підході наступного зуба, ПС деталі вже врівноважена, тобто спостерігається співвідношення $\tau_{\text{ЗПС}} < \tau_{\text{різ}}^{\text{вих}} + \tau_{\text{х.х}}$ (рис. 10, б).

3. Фрезерування відбувається в умовах, коли ПС деталі не встигає заспокоїтись та ще знаходиться в коливальному процесі, а черговий зуб фрези починає різання, тобто спостерігається відношення $\tau_{\text{ЗПС}} > \tau_{\text{різ}}^{\text{вих}} + \tau_{\text{х.х}}$ (рис. 10, в). В цьому випадку точка A_1 дотику наступним зубом фрези оброблюваної деталі може бути в будь-якому

місці в межах розмаху вільних коливань оброблюваної поверхні з урахуванням їх згасання. Розташування точок дотику зуба фрези з оброблювальною поверхнею, що коливається, A , A_1 і т.д. має строгу закономірність і впливає на величину сили відтискання $P_{відт}^{\max}$. На рис. 10, в показано, що підвищення точки дотику A_1 з хвилею вільних коливань деталі під час холостого ходу в порівнянні з точкою A попереднього дотику приводить до зниження сили відтискання на величину $\Delta P_{відт}^{\max}$. Таким чином, якщо зуб фрези врізається в оброблювану поверхню, яка коливається, то в кожному випадку сила відтискання відрізняється на величину $\Delta P_{відт}^{\max}$ та з'являється причина виникнення додаткового збудження або гасіння коливального процесу.

Дослідження впливу частоти обертання однозубої кінцевої циліндричної фрези $n_{фр}$ на формування змушувальної сили (сили відтискання маложорсткої деталі – $P_{відт}$) з урахуванням відновлювальної сили – $P_{відн}$ та сили тертя – $P_{терт}$ проводили для чотирьох значень $n_{фр}=224, 560, 1120$ та 1800 об/хв при зустрічному і попутному фрезеруванні.

Експериментально встановлено (рис. 11), що при попутному циліндричному кінцевому фрезеруванні рівень сил, які відтискають тонкостінну деталь від фрези більший, ніж при зустрічному, у всьому діапазоні розглянутих швидкостей різання фрези. Зі збільшенням швидкості обертання фрези середній рівень сил відтискання змінюється несуттєво, однак розмах їх коливань збільшується, причому для зустрічного фрезерування значніше ніж для попутного.

Аналіз осцилограм відхилення тонкостінної деталі під час її фрезерування (рис. 12) показав, що в діапазоні $n_{фр}=224\dots 1800$ об/хв існують дві принципово різні по механізму збудження причини виникнення коливань. В зоні частот обертання фрези $n_{фр}=560$ об/хв спостерігаються інтенсивні регенеративні коливання, викликані різанням по вібраційному сліду, залишеному попереднім зубом фрези.

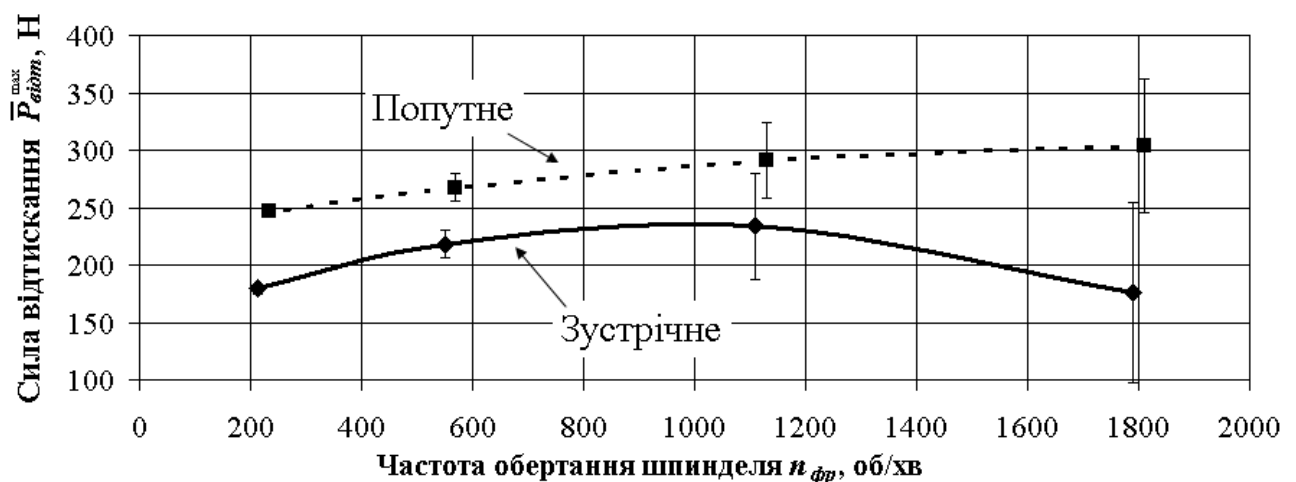


Рис. 11. Вплив швидкості обертання та напрямку подачі на середні значення максимальних сил відтискання $\bar{P}_{відт}^{\max}$ та розмах їх коливань

При зустрічному фрезеруванні виникнення регенеративного збудження коливальних значно більш інтенсивне ніж при попутному фрезеруванні (рис. 12). Це обумовлює значне погіршення шорсткості обробленої поверхні при зустрічному фрезеруванні в порівнянні з попутним при $n_{фр}=560$ об/хв (рис. 2).

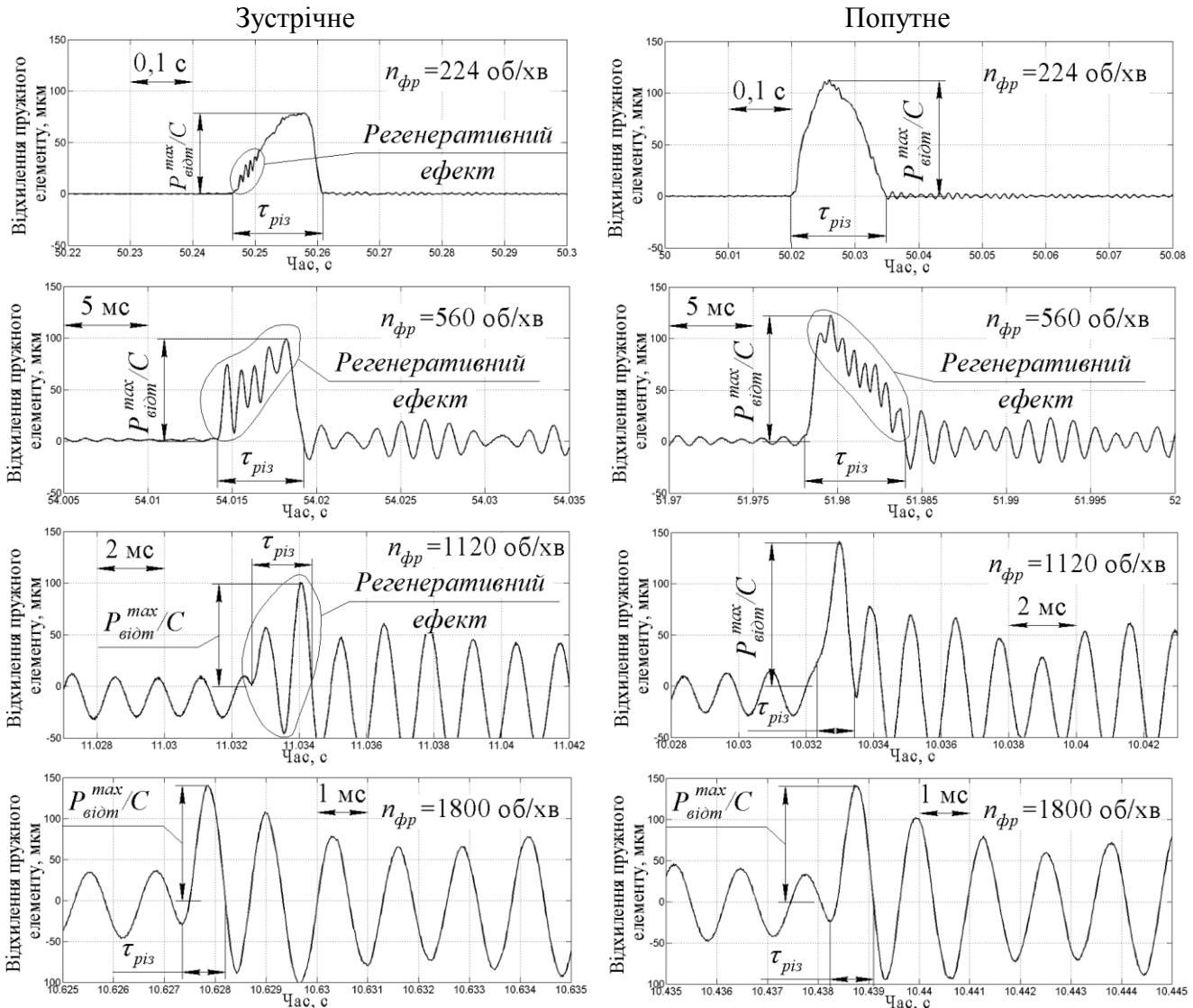


Рис. 12. Осцилограми відхилень деталі для різних частот обертання фрези $n_{фр}$

Для дослідження регенеративного ефекту була розроблена методика суміщених осцилограм, яка дозволяє оцінити можливості його подавлення (рис. 13). Встановлено, що при зустрічному фрезеруванні формування віброгасильних фасок на задній поверхні зуба фрези і приєднання додаткових мас знижує регенеративний ефект. При попутному фрезеруванні вторинні коливання знижуються при нанесенні віброгасильних фасок, додаткова маса показала негативний результат. Введення демпферів з низькою жорсткістю в ПС деталі не впливає на величину регенеративних коливань. Ці результати повністю корелюються зі значеннями R_a , розрахованих з профілограм обробленої поверхні (рис. 14).

При високих частотах обертання шпинделя ($n_{фр}=1800$ об/хв), коли період власних коливань ПС деталі близький до часу зрізання припуском одним зубом фрези регенеративний ефект відсутній. Найбільш ефективним способом гасіння

коливань тонкостінної деталі в цьому випадку є застосування в'язкопружних демпфувальних середовищ, що оточують її. Це дозволяє значно зменшити час її заспокоєння та стабілізувати умови врізання зуба фрези в припуск, що зрізується.

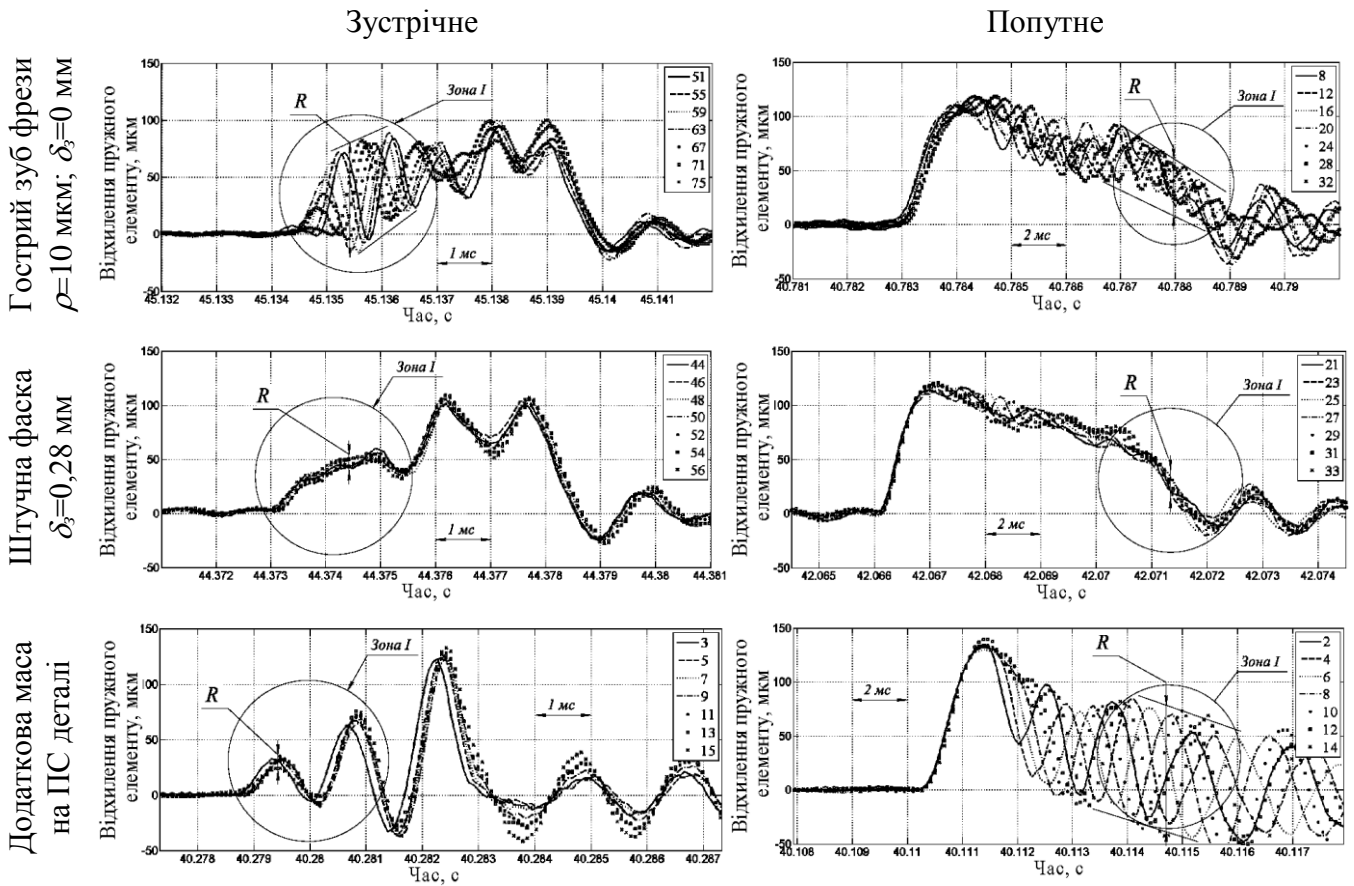


Рис. 13. Суміщені осцилограми коливань тонкостінної деталі ($n_{фр}=560$ об/хв)

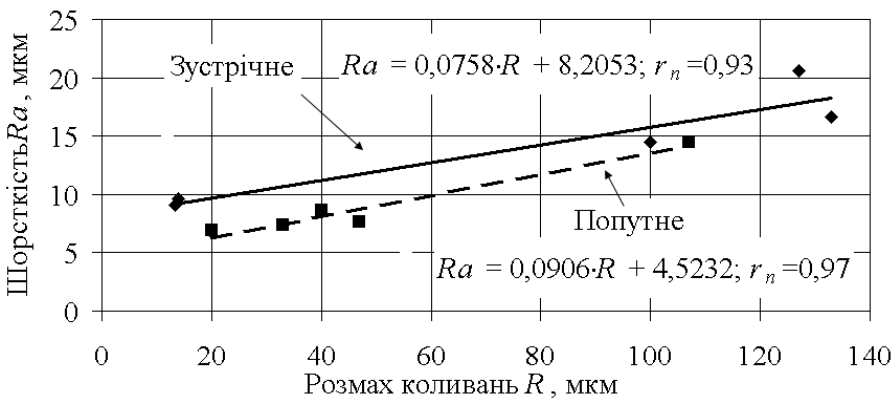


Рис. 14. Кореляційний зв'язок між розмахом коливань в зоні I (R) та Ra : r_n – коефіцієнт парної кореляції

Графіки положення точки врізання, що побудовані нижче осцилограм коливання тонкостінної деталі, показані на рис. 15.

Проведені дослідження дозволили сформулювати рекомендації щодо покращення якості фрезеруванні тонкостінних деталей. Ці рекомендації передані на ГП «Івченко-Прогрес» та використовуються при розробці та удосконаленні технології кінцевого фрезерування лопаток моноколіс компресора ГТД.

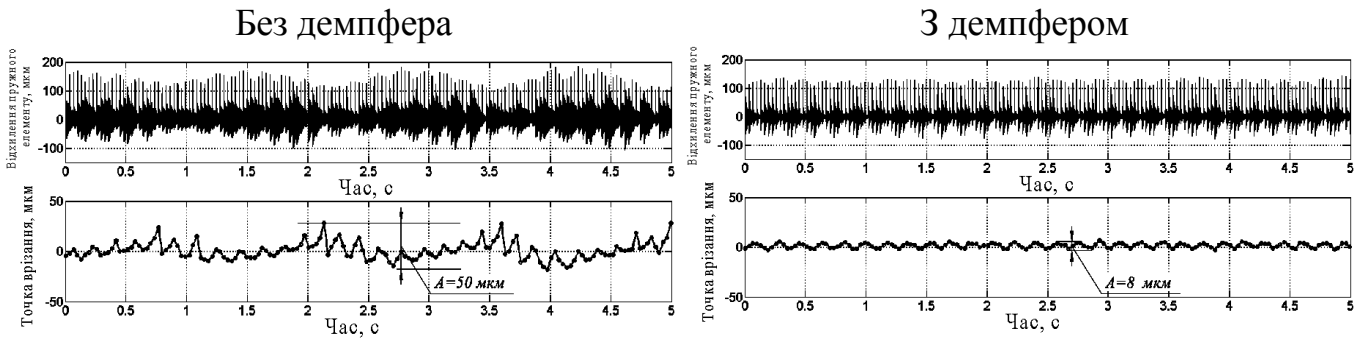


Рис. 15. Осцилограми коливань тонкостінної деталі та точки врізання зуба фрези в припуск (попутне; $n_{фр}=1800$ об/хв; $S_z=0,05$ мм/зуб; $t=0,5$ мм; $B=4$ мм)

У п'ятому розділі запропонована кінематична експериментально-розрахункова модель формування рельєфу обробленої поверхні при циліндричному фрезеруванні тонкостінної деталі, в якій використовуються реальні умови фрезерування та реальні осцилограми коливань тонкостінної деталі (рис. 16). Моделювання проводиться у часовій області. Оброблювана деталь описується масивом точок. Фреза задається двома точками: ріжучої кромки та центру фрези. Положення ріжучої кромки та центру фрези у кожен момент часу розраховується. Положення оброблюваної деталі визначається за експериментальною осцилограмою. Якщо ріжуча кромка фрези опиниться в тілі деталі, то відбувається модифікація поверхні деталі (змінюються координати точок) аналогічне зрізанню припуску.

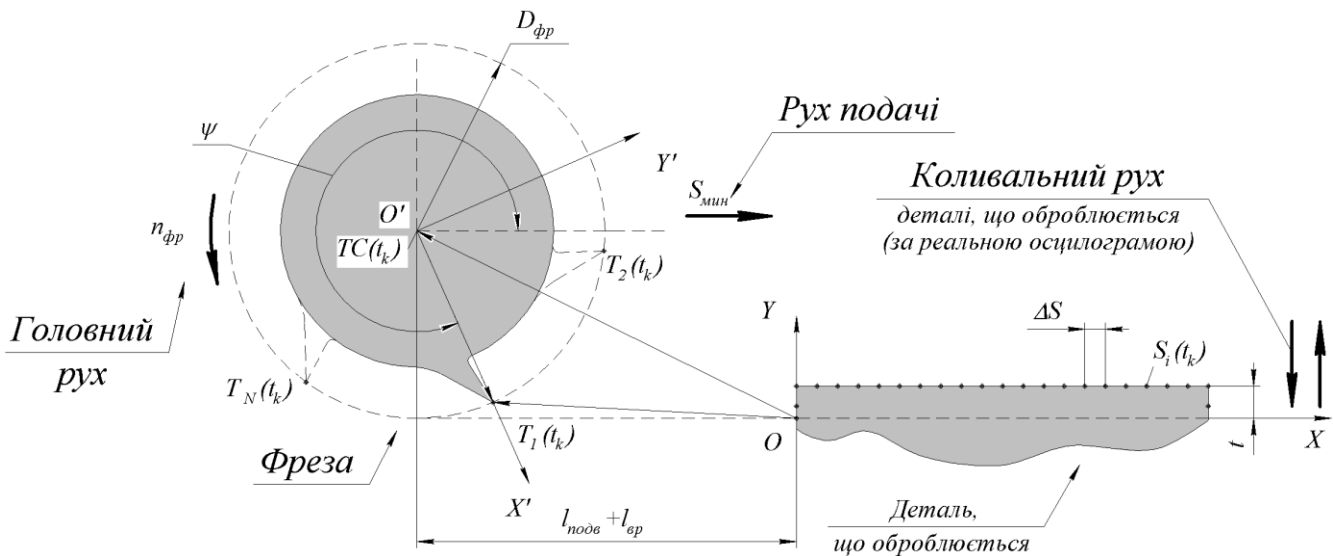


Рис. 16. Модель формування рельєфу обробленої поверхні

Порівняння результатів моделювання процесу формування рельєфу поверхні з експериментально вимірним профілем показують добру відповідність по формі, висоті та шагу хвиль мікронерівностей, а також по параметру Ra (рис. 17). Адекватність результатів моделювання та експериментального вимірювання шорсткості поверхні при фрезеруванні тонкостінних деталей дозволяють однозначно стверджувати про домінуючу роль коливальних процесів в зоні I в формуванні мікрогеометрії обробленої поверхні тонкостінних деталей.

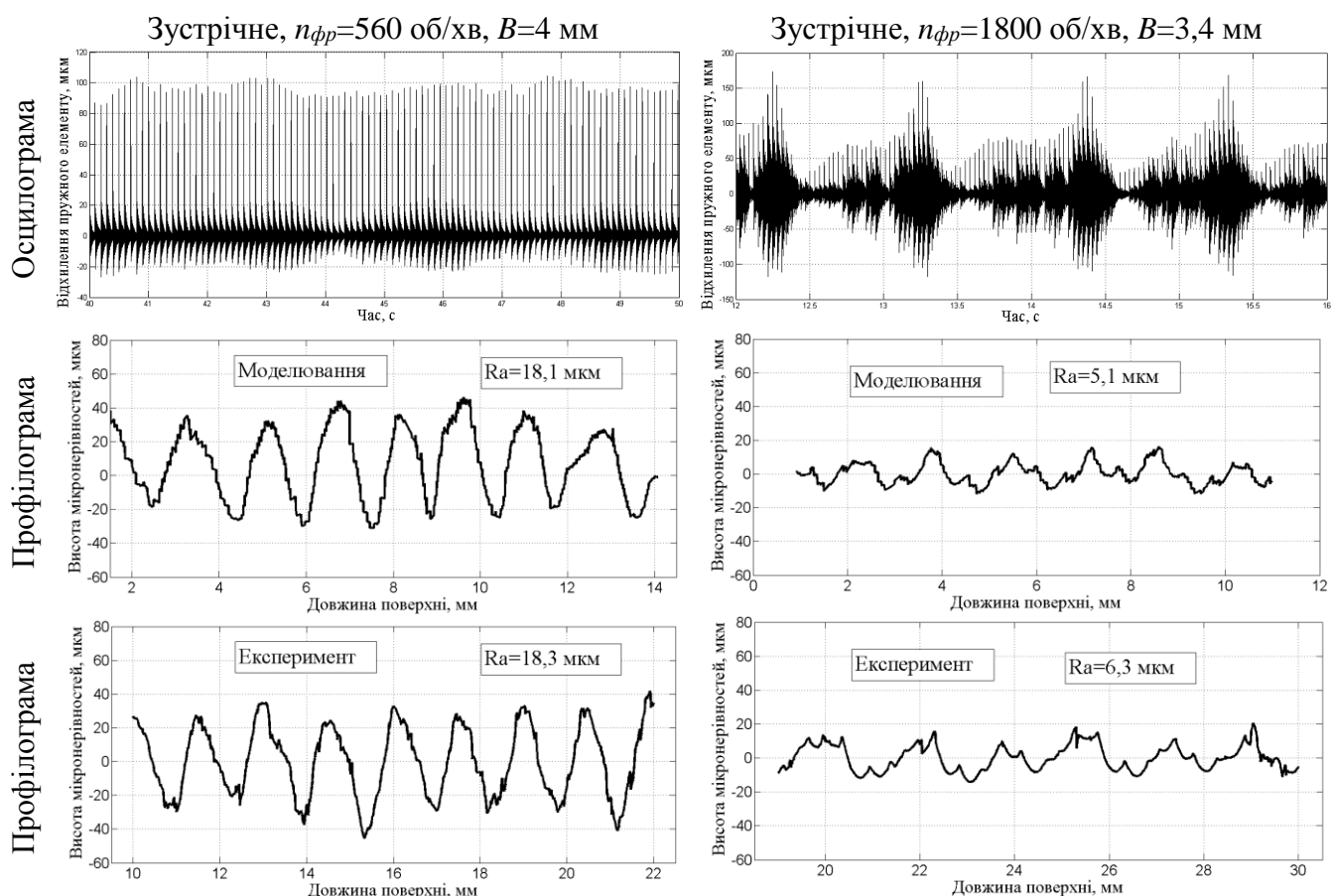


Рис. 17. Експериментальні осцилограми коливань деталі і профілограми шорсткості, отримані моделюванням та вимірюванням реальної поверхні деталі ($t=0,5$ мм; $S_z=0,05$ мм/зуб)

ВИСНОВКИ

В роботі вирішена науково-практична задача по встановленню причин та закономірностей формування шорсткості обробленої поверхні при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних деталей та запропоновані рекомендації для її зниження.

1. Для вивчення процесу кінцевого циліндричного фрезерування тонкостінної деталі запропонована схема вимірювання та розроблений експериментальний стенд, який дозволяє розглядати вплив умов фрезерування та динамічних властивостей ПС деталі на змінювання сил, діючих на деталь.

2. Встановлено, що при циліндричному фрезеруванні частина поверхні різання, після зрізання припуску черговим зубом фрези залишається на обробленій поверхні (зона I), причому для зустрічного фрезерування ця частина розташована при входженні зуба фрези в припуск, а для попутного – при виході. Таким чином якщо деталь здійснює коливання (відхилення) в момент врізання або виходу зуба фрези, а також безпосередньо під час зрізання припуску, то ці відхилення будуть чинити прямий вплив на формування шорсткості.

3. Дослідження профілограм обробленої поверхні по регулярності змінення висоти мікронерівностей та критерію шорсткості Ra в широкому діапазоні частот обертання інструменту (від 56 об/хв до 1800 об/хв), дозволило встановити дві зони

погіршення шорсткості: середньошвидкісну ($n_{fp}=560$ об/хв) та високошвидкісну ($n_{fp}=1800$ об/хв). При фрезеруванні на цих частотах на профілограмах з'являється періодична компонента змінення висоти мікронерівностей, що свідчить про вплив коливань деталі на формування мікрогеометрії обробленої поверхні.

4. Аналіз осцилограм відхилення тонкостінної деталі в процесі фрезерування показав, що в діапазоні частот обертання фрези від $n_{fp}=56$ об/хв до $n_{fp}=1800$ об/хв існують дві, принципово різні за механізмом збудження, причини виникнення коливань:

- в зоні частот обертання фрези $n_{fp}=560$ об/хв спостерігається найбільше проявлення регенеративного ефекту вторинного збудження коливань при різанні по вібраційному сліду від попереднього проходу зуба фрези. Зі збільшенням частоти обертання фрези регенеративний ефект поступово вироджується та зникає.

- при частотах обертання фрези $n_{fp}=1800$ об/хв причиною появи періодичних коливань сили відтискання деталі є періодична зміна розташування точки врізання зуба фрези в оброблювану поверхню, яка здійснює вільні коливання відносно положення її рівноваги, під час холостого ходу зуба фрези.

5. Розроблена методика суміщення осцилограм великої кількості послідовних зрізів зубом фрези дозволила провести дослідження можливостей пригатовування регенеративного ефекту.

Встановлено, що при зустрічному фрезеруванні формування віброгасильних фасок на задній поверхні зуба фрези та приєднання додаткових мас знижує регенеративний ефект. При попутному фрезеруванні регенеративні коливання знижуються при нанесенні віброгасильних фасок і збільшуються при приєднанні додаткової маси. Введення демпферів в ПС деталі не оказує впливу на величину регенеративних коливань, як при попутному, так і при зустрічному фрезеруванні.

6. Експериментально встановлено, що при високих швидкостях обертання шпинделя ($n_{fp}=1800$ об/хв) коли період власних коливань ПС деталі близький до часу зрізання припуску одним зубом, найбільш ефективним способом гасіння коливань тонкостінної деталі є застосування демпфування шляхом розміщення ПС деталі у в'язкопружному середовищі. Це дозволяє значно зменшити час її заспокоєння та стабілізувати умови врізання зуба фрези в припуск, що зрізується. Таким чином, розмах коливань деталі знижується більш ніж у 6 разів і як наслідок в 6 раз знижується показник шорсткості Ra при попутному фрезеруванні та у 2 рази при зустрічному.

Загальною умовою для зниження коливань при високих частотах обертання шпинделя є необхідність підтримання високої гостроти ріжучої кромки зуба фрези, тобто радіус округлення ріжучої кромки ρ повинен бути мінімальним.

7. Запропонована кінематична експериментально-розрахункова модель формування рельєфу обробленої поверхні при циліндричному фрезеруванні тонкостінної деталі, в якій використовуються реальні умови фрезерування та реальні осцилограми коливання деталі. Розроблений алгоритм розрахунку шорсткості обробленої поверхні.

Порівняння результатів моделювання процесу формування рельєфу поверхні з експериментально виміряним профілем показують добру відповідність по формі, висоті та шагу мікронерівностей, а також по параметру шорсткості Ra . Адекватність

результатів моделювання та експериментального вимірювання шорсткості дозволяє однозначно стверджувати про домінуючу роль коливальних процесів в зоні I в формуванні мікрогеометрії обробленої поверхні.

8. Комплексні дослідження профілю обробленої поверхні та осцилограм коливань деталі показали, що всі заходи, що ведуть до зниження коливань тонкостінної деталі в зоні I приводять до зниження шорсткості обробленої поверхні.

9. Результати досліджень та рекомендації впроваджені на ДП «Івченко-Прогрес» та використовуються в учбовому процесі ЗНТУ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Внуков Ю.Н. Методика теоретического определения составляющих силы резания при фрезерной обработке / Ю.Н. Внуков, А.Г. Саржинская, В.А. Логоминов // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2009. – Вып. 77. – С. 31-46.

Здобувачем проведені розрахунки складових сил фрезерування, за наведеною в статті методикою та виконане порівняння розрахованих значення з експериментальними даними, які наведені в літературі.

2. Логоминов В.А. Анализ подходов по учету динамики сил резания при прогнозировании виброустойчивости механической обработки (обзор) / Ю.Н. Внуков, В.А. Логоминов // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011 – Вып. 79 – С. 132-153.

Здобувачем проведено аналіз підходів до врахування динаміки сил різання в роботах різних дослідників. Вказані питання, які потребують уточнення у майбутніх дослідженнях.

3. Внуков Ю.Н. Определение динамических характеристик нежестких деталей типа заземленных пластин / Ю.Н. Внуков, В.А. Логоминов, С.А. Бездольный // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПИ», 2011.– Вып. 6.–С.6-13.

Здобувачем описана методика та визначені динамічні характеристики нежорстких деталей розрахунковими та експериментальним методами.

4. Внуков Ю.Н. Стенд для изучения механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей концевыми фрезами / Ю.Н. Внуков, В.А. Логоминов, П.А. Каморкин // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011 – вып. 79 – С. 32-37.

Здобувачем описується стенд для вивчення механічних коливань при фрезеруванні тонкостінних деталей кінцевими фрезами.

5. Логомінов, В.О. Визначення товщини зрізу та часу контакту для ріжучого зуба прямозубої циліндричної фрези / Ю.М. Внуков, В.О. Логомінов, А.А. Мінакова // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Житомир: ЖДТУ, 2011. – Вып. 11. – С 174-178.

Здобувачем розглянуто розрахунок куту контакту зуба прямозубої циліндричної фрези та часу контакту одного зуба фрези з припуском.

6. Логоминов В.А. Моделирование колебаний нежестких деталей при концевом фрезеровании / В.А. Логоминов, О.Л. Лукьяненко // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2011. – №4. – С 145-157.

Здобувачем розроблена математична модель кінцевого фрезерування тонкостінної деталі. Проведені розрахунки коливань та геометрії обробленої поверхні тонкостінної деталі. Виконано порівняння розрахунків з експериментальними даними.

7 Внуков Ю.Н. Особенности концевое фрезерования маложестких деталей типа «Защемленных пластин». // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – Вип. 7. – С 23-51.

Здобувачем описана методика дослідження та представлені результати експериментального дослідження сили відтискання тонкостінної деталі при кінцевому циліндричному фрезеруванні та при ударами її кулачком.

8. Пат. 40961 Україна, МПК⁷ B23Q 17/12. Спосіб гасіння коливань при обробці різанням / Шамровський О.Д. (UA), Внуков Ю.М. (UA), Павленко Д.В. (UA), Логомінов В.О. (UA); заявник та власник патенту ЗНТУ (UA). – № u200814773, заявл. 22.12.2008, опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.

Здобувачем запропоновано спосіб гасіння коливань при обробці різанням з використанням керованого антирезонансу.

9. Логоминов В.А. О динамической характеристике резания в работах различных авторов / В.А. Логоминов, Ю.Н. Внуков // Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: тези доповідей ІХ всеукраїнської молодіжної наук.-техн. конф., 26–77 листопада 2009 р., Запоріжжя / відп. ред. Ю. М. Внуков. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – С. 11-12.

Здобувачем проведений аналіз поняття динамічна характеристика різання в роботах різних авторів.

10. Логоминов В.А. Прогнозирование шероховатости поверхности при фрезеровании нежестких деталей / В.А. Логоминов, Ю.Н. Внуков // Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: тези доповідей Десятої всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції, 26-30 жовтня 2010 р., м. Суми. – Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – С.85-86.

Здобувачем представлена математична модель прогнозування шорсткості поверхні при фрезеруванні тонкостінних деталей.

11. Логоминов В.А. Исследование механизма вторичного возбуждения колебаний при резании по вибрационному следу (регенеративный эффект) при концевом фрезеровании тонкостенной детали / В.А. Логоминов, Е.Б. Козлова // Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: тези доповідей ХІІ всеукраїнської молодіжної наук.-техн. конф. присв. пам'яті П.Р. Родіна, 22–25 жовтня 2012 р., Київ. Секція 1. – Київ: КПІ, 2012. – С. 80-82.

Здобувачем розроблена методика для дослідження регенеративних коливань при фрезеруванні тонкостінних деталей.

АНОТАЦІЇ

Логомінов Віктор Олексійович «Формування шорсткості обробленої поверхні при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних елементів деталей». – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальність 05.03.01 – «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти». Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2013.

Дисертаційна робота присвячена виявленню основних закономірностей формування шорсткості обробленої поверхні та визначенню шляхів підвищення її якості при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних деталей.

Дослідження показали, що при обробці тонкостінних деталей в розглянутому діапазоні частот обертання фрези від 56 об/хв до 1800 об/хв існують дві, принципово різні за механізмом збудження, причини виникнення коливань. Перша (при $n_{фр}=560$ об/хв) пов'язана з регенеративним ефектом. Друга (при $n_{фр}=1800$ об/хв) – з періодичним змінням розташування точки врізання зуба фрези в поверхню, що оброблюється.

Розроблена методика суміщення осцилограм великої кількості послідовних зрізів зубом фрези дозволила провести дослідження можливостей пригамовування регенеративних коливань.

Експериментально встановлено, що у випадку виникнення регенеративних коливань, ефективним засобом пригамовування коливань та покращення якості поверхні є застосування віброгасильних фасок на задній поверхні зуба фрези та використання попутного фрезерування. В зоні великих частот обертання шпинделя ефективним є використання демпфування шляхом розміщення пружної системи деталі у в'язкопружному середовищі та зустрічна схема фрезерування.

Результати досліджень та рекомендації по покращенню шорсткості при кінцевому фрезеруванні лопаток моноколів компресора ГТД передані на ГП «Івченко-Прогрес» та використовуються при удосконаленні технології їх обробки.

Ключеві слова: процес механічної обробки, фізичні методи дослідження механічної обробки, кінцеве фрезерування, коливання, шорсткість, тонкостінні деталі.

Логоминов Виктор Алексеевич «Формирование шероховатости обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов деталей». – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 – «Процессы механической обработки, станки и инструменты». Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2013.

Диссертационная работа посвящена выявлению основных закономерностей формирования шероховатости обработанной поверхности и определению путей повышения её качества при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных деталей.

В ходе работы установлено, что если при цилиндрическом фрезеровании деталь осуществляет колебания (отклонения) в момент врезания или выхода зуба фрезы (зона I), а также непосредственно во время срезания припуска, то эти отклонения будут оказывать прямое влияние на формирование шероховатости обработанной поверхности.

Исследования показали, что при обработке тонкостенных деталей в рассматриваемом диапазоне частот вращения фрезы от 56 об/мин до 1800 об/мин существуют две, принципиально различные по механизму возбуждения, причины возникновения колебаний. Первая (при $n_{fp}=560$ об/мин) связана с регенеративным эффектом. С увеличением частоты вращения фрезы регенеративный эффект постепенно вырождается и исчезает. Второй (при $n_{fp}=1800$ об/мин) причиной появления периодических колебаний силы отжима детали является периодическое изменение расположения точки врезания зуба фрезы в обрабатываемую поверхность, совершающей свободные затухающие колебания.

Разработанная методика совмещения осциллограмм большого количества последовательных резов зубом фрезы позволила провести исследования возможностей подавления регенеративного эффекта.

Экспериментально установлено, что в случае возникновения регенеративных колебаний, эффективным средством подавления колебаний и улучшения шероховатости поверхности является применение виброгасящих фасок на задней поверхности зуба фрезы и использование попутного фрезерования. В зоне больших частот вращения шпинделя эффективным является использование демпфирования путем размещения УС детали в вязкоупругой среде и встречная схема фрезерования.

В работе создана кинематическая экспериментально-расчетная модель формирования шероховатости обработанной поверхности при цилиндрическом фрезеровании тонкостенной детали, в которой используются реальные условия фрезерования и реальные осциллограммы колебаний детали. Сравнение результатов моделирования процесса формирования рельефа поверхности с экспериментально измеренным профилем показало хорошее соответствие как по форме, высоте и шагу микронеровностей так и по параметру шероховатости Ra . Адекватность результатов моделирования позволяет однозначно утверждать о доминирующей роли колебательных процессов в зоне I в формировании микрогеометрии обработанной поверхности.

Результаты исследований и рекомендации по улучшению шероховатости при концевом фрезеровании лопаток моноколес компрессора ГТД переданы на ГП «Ивченко-Прогресс» и будут учтены при совершенствовании технологии их обработки.

Ключевые слова: процесс механической обработки, физические методы исследования механической обработки, концевой фрезерование, колебания, шероховатость, тонкостенные детали.

Victor A. Logominov “Surface roughness formation of cylinder end milling of thin-walled elements workpieces”. – Manuscript

Dissertation for the degree of candidate of technical science, specialty 05.03.01 – “The machining processes, machine and tools” National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Kharkov, 2013.

The aim of this dissertation is to identify main regularities between surface roughness formation and finding a ways of improving its quality for thin wall milling.

Dedicated experiment show that if workpiece has chatter frequency during milling, this chatter frequency will be effect on surface roughness formation. Chatter frequency

created by penetration tooth in workpiece or comes out of it and also at the moment of material removal.

The results of research demonstrate two uncoupling reason of chatter. They have various excitations. Spindle speed was observed in the range from 56 rpm to 1800 rpm. The first reason of chatter appearance is related with regenerative effect. It occurs when spindle speed is 560 rpm. The regenerative effect disappears with increases of spindle speed. The second chatter reason is related with periodical change location of digging cutter tooth point. It occurs when spindle speed is 1800 rpm.

The new methodology is developed. Oscillogram combination of big quantity of serial milling tooth cuts allow to make research for reduce probability of regenerative effect appearance.

In the case of appearance regenerative chatter the experimental work done to examine that the effective method of chatter avoidance is use antivibration bevels on the back of the cutter tooth and use down milling. Effective to put workpiece in damping environment and up milling for disappear chatter in when spindle has high frequency rotation.

Finally, research results and recommendation of improving surface roughness after milling is transmitted to Ivchenko Progress State Enterprise and will be taking into consider in manufacturing.

Keywords: Machining processes, physical methods of researching machining processes, cylinder end milling, chatter, surface roughness, thin-walled workpieces.