

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет транспорту та механічної інженерії

(повне найменування факультету)

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

(повна найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

**Дослідження впливу сил різання при точінні на якість
оброблюваної поверхні**

спеціальність 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Прикладна механіка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ІМм-21
Корнелюк Юрій Іванович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Самчук Людмила Михайлівна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 20__ р.

к.т.н., доцент

Гарант освітньої програми:

Четвержук Тарас Іванович

(підпис)

Луцьк – 2023 року

Луцький національний технічний університет
Факультет Транспорту та механічної інженерії
Кафедра Прикладної механіки та мехатроніки
Другий (Магістерський) рівень
Спеціальність 131 Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ Р.РЕДЬКО

“ _____ ” _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Корнелюка Юрія Івановича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження впливу сил різання при точінні на якість оброблюваної поверхні, керівник роботи Самчук Людмила Михайлівна, к.т.н., доцент, затверджені наказом вищого навчального закладу від «14» січня 2023 р. № 42/01-02.
2. Строк подання студентом роботи 1.12.2023 року.
3. Вихідні дані до роботи: матеріал заготовок для проведення досліджень – сталь 45, сталь 40Х, методичні вказівки щодо основних параметрів сил, що діють на заготовку та інструмент в процесі різання, методика розрахунку сил різання.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. Розділ 1. Аналіз основних закономірностей процесу різання. Розділ 2. Матеріали та обладнання для дослідження. Розділ 3. Розробка експериментально-дослідницького комплексу для вимірювання сил різання. Розділ 4. Висновки. Список посилань.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Принципова схема вимірювання сил різання – 1 лист (ф. А1), 2. Тензометричний токарний динамометр. загальний вигляд – 1 лист (ф. А1), 3. Автоматизований комплекс для вимірювання сил різання при токарній обробці – 1 лист (ф. А1), 4. Методика проведення експерименту – 1 лист (ф. А1), 5. Експериментальне дослідження впливу геометрії ріжучого інструменту та режимів різання на силу різання при токарній обробці – 1 лист (ф. А1). 6. Зміна шорсткості при зміні переднього кута заточки різця для сталі 45 (ф. А1).

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання *01.03.2023р.*

Керівник

(підпис)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи магістра	Примітка
1.	<i>Аналіз основних закономірностей процесу різання</i>	<i>14.04.2023р.</i>	
2.	<i>Матеріали та обладнання для дослідження</i>	<i>14.04.2023р.</i>	
3.	<i>Розробка експериментально-дослідницького комплексу для вимірювання сил різання</i>	<i>18.05.2023р.</i>	
4.		<i>18.07.2023р.</i>	
7.	<i>Представлення роботи до захисту</i>	<i>1.12.2023 р.</i>	
8.	<i>Електронний варіант роботи</i>	<i>1.12.2023 р.</i>	

Студент

(Корнелюк Ю.І.)

(підпис)

Керівник роботи

(Самчук Л.М.)

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Корнелюк Ю.І. Дослідження впливу сил різання при точінні на якість оброблюваної поверхні. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра на здобуття кваліфікації другого (магістерського) рівня вищої освіти із спеціальності 131 Прикладна механіка – Луцький національний технічний університет. – Луцьк, 2023.

Робота присвячена питанням вивчення впливу сил різання на якість поверхні при токарній обробці. Розуміння закономірностей параметрів різання та якості поверхні дозволить підбирати режими різання таким чином, щоб задовільнити задані вимоги щодо якості при найбільш ефективній обробці. Сили, що діють на заготовку в процесі різання є динамічно змінними тому їх фіксація повинна здійснюватись експериментальним методом.

В роботі було виконано комплекс наукових та теоретичних досліджень результати яких дали змогу оцінити вплив параметрів різання на якість поверхні заготовки. Отримані результати можуть бути виконані при проектуванні технологічних процесів для оптимізації параметрів різання з метою отримання максимальної ефективності

Ключові слова: точіння, режими різання, динамометр, сила різання.

ANNOTATION

Korneluk Y.I. This paper is devoted to the study of the influence of cutting forces on surface quality during turning. – Manuscript.

Master's qualification work for obtaining the qualification of the second (master's) level of higher education in specialty 131 Applied Mechanics - Lutsk National Technical University. - Lutsk, 2023.

Understanding the regularities of cutting parameters and surface quality will allow us to select cutting modes in such a way as to meet the specified quality requirements with the most efficient processing. The forces acting on the workpiece during cutting are dynamically variable, so their fixation should be carried out by an experimental method.

In this work, a set of scientific and theoretical studies was performed, the results of which made it possible to assess the effect of cutting parameters on the surface quality of the workpiece. The obtained results can be used in the design of technological processes to optimize cutting parameters in order to obtain maximum efficiency.

Keywords: turning, cutting modes, dynamometer, cutting force.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ	8
1.1. Вплив геометрії різальної частини різців на процес різання.....	8
1.2. Особливості процесів, що відбуваються при різанні металів.....	9
1.3. Вимірювання сили різання.....	14
1.4. Геометричний аналіз токарного різця.....	17
2. МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	21
2.1. Матеріал для проведення експерименту.....	21
2.2. Обладнання для токарних і гвинторізних робіт.....	24
2.3. Планування багатofакторного експерименту.....	31
2.4. Оцінка результатів прямих вимірювань.....	35
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ СИЛ РІЗАННЯ.....	37
3.1. Токарний динамометр.....	37
3.2. Вимірювальний стенд.....	39
3.3. Контрольні датчики.....	41
4. ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЗАТОЧУВАННЯ ІНСТРУМЕНТУ ТА РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА СИЛУ РІЗАННЯ ПРИ ТОЧІННІ.....	45
4.1. Результати досліджень впливу параметрів заточування інструменту на сили різання при точінні.....	45
4.2. Результати досліджень впливу режимів токарної обробки на сили різання при точінні.....	47
4.3. Оцінка результатів дослідження методом скінченних елементів.....	50
4.4. Співвідношення між розрахунковими та виміряними радіальними силами.....	51

4.5. Параметрична оптимізація параметрів обробки	54
4.6 Вплив параметрів заточування різця на якість поверхні та силу різання.....	57
ВИСНОВКИ.....	60
СПИСОК ПОСИЛАНЬ.....	61

ВСТУП

Актуальність теми. Призначення режимів обробки різанням розглядається як техніко-економічне завдання. Режими обробки впливають на показники виробництва як технічні, так і економічні. У зв'язку з цим розрахунок режимів різання є одним із основних завдань в машинобудуванні. Особливе значення при розрахунку режимів різання має залежність між стійкістю ріжучого інструменту, швидкістю різання, подачею і глибиною різання, а також геометричними параметрами ріжучого інструменту. При розрахунку режимів різання доцільно враховувати фактор оптимізації їх за одним із критеріїв оптимізації: максимуму продуктивності, мінімуму собівартості, а також оптимізація за комплексом параметрів якості поверхневого шару оброблюваних поверхонь і точності обробки. Призначення режиму обробки нерозривно пов'язане з вибором інструментального матеріалу, а також з вибором змащувально-охолоджуючих технологічних середовищ з врахуванням методу обробки і матеріалу оброблюваних деталей.

Метою роботи Вибір геометричних параметрів різального інструменту на обробку деталей, та розробка рекомендацій з вибору режимів різання.

Об'єкт дослідження – Механічна обробка деталей типу "вал"

Предмет дослідження – Оброблення деталей зі сталі Ст45 та сталі 40Х.

Методи дослідження. Для виконання кваліфікаційної роботи магістра використовували трьохкомпонентний токарний динамометр. При розрахунку режимів різання врахований фактор оптимізації: максимуму продуктивності, мінімуму собівартості, а також оптимізація за комплексом параметрів якості поверхневого шару оброблюваних поверхонь і точності обробки.

Новизна одержаних результатів. Для підвищення точності магістрантом розроблено наукове устаткування. Здійснено оптимізацію вибору геометрії ріжучого інструменту та призначено режимів різання. Розроблена методика розрахунку параметрів механічної обробки. Дана методика дає прогнозування параметрів необхідної геометрії ріжучого інструменту.

Практичне значення одержаних результатів. Розрахунок параметрів обробки дозволяє передбачити необхідну геометрію і режим різання ріжучого інструменту.

Апробація результатів роботи. Ю. Корнелюк Вимірювання сил різання при точінні / Ю. Корнелюк, Л. Самчук / Тези III студентської науково-технічної конференції факультету транспорту та механічної інженерії “Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії”. Луцьк: ЛНТУ – 2023р. С.32-35.

Особистий внесок магістранта. Магістрантом проведено вдосконалення тензOMETричного токарного динамометру. Були підібрані матеріали для виготовлення заготовки та обладнання, обрана методика побудови експерименту. Здійснено калібрування пластин. Експериментально дослідження та обґрунтовано вплив геометрії ріжучого інструменту для сталей 45 та 40Х.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ

1.1. Вплив геометрії різальної частини різців на процес різання

«Процес різання характеризується деформацією стружки та тертям, що виникають під дією сил різання, а також високою температурою у зоні відділення стружки. В результаті цього має місце зношування різальних кромek і поверхонь різця. З характером і величиною зношення пов'язані стійкість, продуктивність і витрати інструменту, а також якість поверхні, що обробляється. Геометричні параметри різальної частини різця дуже впливають на процес різання. Зрештою від їх вибору залежать сили різання та зношення інструменту. Різання металів є складним процесом, так, як на нього впливає велика кількість факторів: властивості різального та оброблюваного матеріалів, розміри шару, що зрізається, режими різання, умови роботи. У практиці доводиться мати справу із найрізноманітнішими комбінаціями цих факторів. У зв'язку з цим встановлення оптимальної геометрії різця є досить складним завданням»[1].

На підставі експериментальних робіт наведено орієнтовні дані щодо впливу геометричних параметрів на різні фактори, що супроводжують процес різання. Наявність великої кількості факторів спричиняє різноманітність пропозиції щодо поліпшення геометрії різців, що висуваються виробництвом.

Залежно від умов обробки можна знайти оптимальні геометричні параметри. Оскільки важко встановити уніфіковану форму різальної частини різця для всіх видів практики, доцільно розглянути принципові положення щодо вибору кожного з геометричних параметрів. При виборі значень геометричних параметрів велику роль відіграють матеріал, що обробляється, і його фізико-механічні властивості, різальний матеріал, його ріжучі і фізико-механічні властивості, розміри зрізаного шару металу (товщина, ширина), обрані режими різання (швидкість, подача, глибина).

При обробці як в'язких, так і крихких матеріалів зношування різців, оснащених твердим сплавом, протікає на передній і задній поверхнях. Проте характер і інтенсивність зношення відрізняються залежно від пластичності

матеріалу, що обробляється. Для малопластичних матеріалів доводиться посилювати головку різця, незважаючи на меншу сумарну силу різання (наприклад, для чавуну вона менша, ніж для сталі, приблизно в 2-3 рази). Лунка на передній поверхні має значно менші розміри. Внаслідок цього питома сила різання на поверхні контакту стружки з різцем виявляється більшою для крихких матеріалів. Це змушує застосовувати великий кут загострення різця.

«Основним недоліком твердих сплавів є знижена міцність, тому при конструюванні оснащених ними різців необхідно передбачати заходи щодо збільшення міцності ріжучих кромки. З таких заходів слід зазначити розташування передньої поверхні та її частини під кутом, більший кут нахилу кромки, розташування пластинки вздовж задньої поверхні, що забезпечує роботу твердого сплаву на стиск (замість роботи на вигин та розтяг)»[1].

Товщина зрізу впливає на характер і інтенсивність зношення. З підвищенням товщини зрізання зростають сила різання, температура, а також зношення передньої поверхні зі зменшенням його по задній поверхні. З метою підвищення міцності ріжучих кромки необхідно зі збільшенням товщини зрізу збільшувати кут загострення. Ширина зрізу впливає лише на інтенсивність зношення. Тому вона не впливає на вибір значень геометричних параметрів. Швидкість різання тісно пов'язана з температурою, тому вона впливає на характер та інтенсивність зношення. Зі збільшенням швидкості різання зношення по передній поверхні виявляється більшим, ніж по задній. Залежно від цього вибираються величини переднього та заднього кутів.

1.2. Особливості процесів, що відбуваються при різанні металів

Дослідженнями процесів різання у легкому машинобудуванні займаються багато вчених: І. І. Ільїнський, Г. І. Костюк, В. В. Медісон, П. І. Ящеріцин та інші. У більшості робіт зазначених авторів процес різання системи пристосування – інструмент – заготовка розглядається як зняття певного шару металу з заготовки. В результаті чого утворюється оброблена поверхня та стружка (рис. 1). При цьому дослідженню обладнання та процесам обробки приділено набагато менше уваги.

«Процес точіння на важких токарних верстатах складніший, ніж на інших. При великих габаритах заготовок, доводиться обробляти заготовки довше. За цей час взаємне становище виконавчих механізмів верстата та параметри режиму різання та ріжучого інструменту (PI) змінюються. Це призводить до коливань, параметри яких змінюються за період стійкості PI, що погіршує якість поверхні»[1].

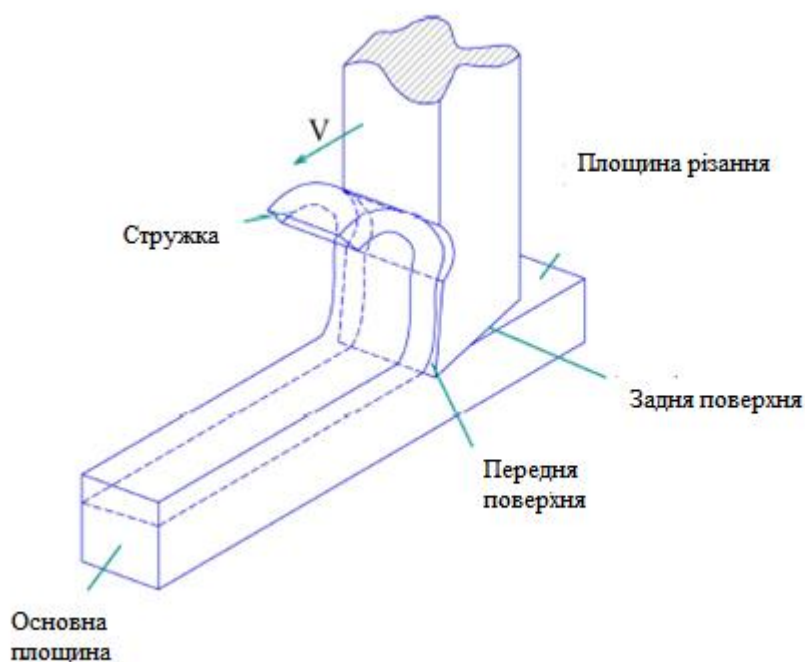


Рисунок 1.1 Схема ріжучого процесу

Особливості процесів різання в машинобудуванні: великі розміри деталей, велика глибина різання та подача, велика вартість заготовок, велика довжина поверхні, що обробляється, дороге унікальне обладнання, нерівномірні припуски, складності впливу на процес різання, обумовлені ергономічними факторами, підвищена вібрація при різанні та інші.

«Такі особливості викликають необхідність дослідження закономірностей обробки на важких верстатах, управління процесами різання, забезпечення точності та працездатності обладнання, підвищення експлуатаційних властивостей різальних інструментів, оптимізації господарської діяльності підприємств»[1].

Процес різання характеризується стійкістю різального інструменту. В роботі А. Ю. Андронova [1] досліджується стійкість різців важких токарних верстатів (обробка деталей масою до 60 т, довжиною до 18000 мм, та обробка деталей масою до 25 т, довжиною до 8000 мм) з матеріалів ВК8, Т5К10, ТТ7К12 [2].

У роботі Ю. О. Стреляна пропонується введення адаптивної системи із зворотним зв'язком для отримання стабільної якості готових виробів [3]. У роботі [3] проведено дослідження параметрів тертя для формування стружки на основі умов різання металів.

В роботі [4] проведено дослідження обробки титанового сплаву. Використовувалися модифіковані моделі матеріалів із прогнозуванням сили та температури. Авторами [5] пропонується використання рівнянь Нав'є-стокса, рівняння перетворення та руйнування матеріалу.

Провівши огляд джерел дослідження коливань при різанні металу, хочеться виділити такі чинники, що впливають на коливання: вплив жорсткості технологічної системи верстата; вплив механічних властивостей на коливання; вплив режиму різання; вплив геометрії різця.

«Визначення причин коливань провадиться у певній послідовності. Спочатку перевіряється жорсткість технологічної системи верстата. Перевіряється відсутність люфтів у напрямних, регулюється натяг клинів, притискних планок, перевіряється надійність кріплення виробу та інструменту; величини вильотів інструменту, патрона та шпинделя. Якщо перевірка помічених несправностей та подальше регулювання не дали результату, проводиться пошук можливих причин. Перевіряються коливання електродвигуна приводу, пульсація гідроприводу, при шліфуванні – биття шліфувального кола»[1].

Усі чинники, що впливають процес різання, призводять до різних видів коливань. На сьогоднішній день прийнято таку класифікацію коливань:

- вимушені коливання, які виникають через зовнішню періодичну силу. Вони впливають на процес різання; нерівномірність припуску, залишеного на

обробку; дисбаланс обертових частин верстата, деталі та інструменту; дефекти зубчастих передач;

- параметричні коливання виникають із наявністю будь-яких змінних параметрів. До них можна віднести: - змінну жорсткість вузла; змінну жорсткість деталі; шпоночну канавку на валу; змінну жорсткість підшипників кочення (прогинання валу періодично змінюються, хоча зовнішня сила постійна). Такі коливання дуже близькі до вимушених;

- релаксаційні коливання, що виникають при повільних переміщеннях вузлів верстатної системи;

- автоколивання - виникають через: входу або виходу різальних лез при контакті з деталлю; нерівномірність припуску; неоднорідність властивостей оброблюваного матеріалу; биття заготовки; биття інструменту (при цьому виникають власні загасаючі коливання, що за умов переходять у незагасаючі автоколивання); зміни сили різання від товщини зрізу (3-5 мкс); зміна сили тертя стружки.

У роботі [6] описано аналіз впливу глибини різання на частоту коливань при різанні металу в системі з одним ступенем вільності (рис. 1). Далі розглянуто замкнуту пружну систему верстата з урахуванням ступенів вільності різця та заготовки (див. рис.1), на підставі якої підтверджено припущення, що вібрації при різанні металу є автоколиваннями.

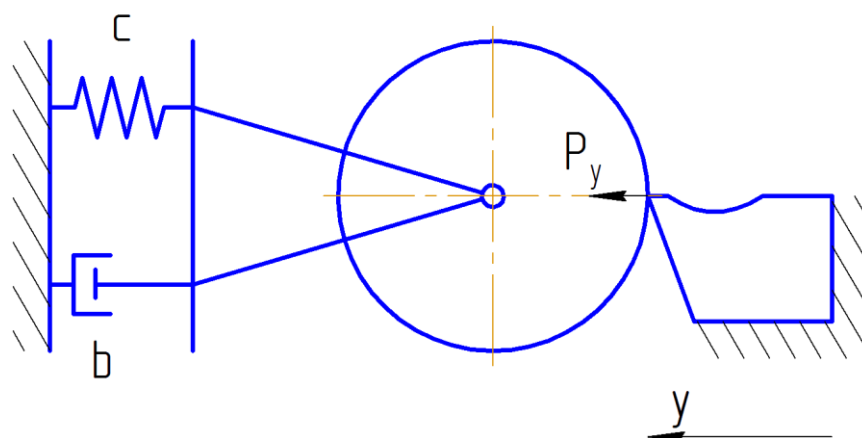


Рисунок 1.2 Схема динамічної системи різання з одним ступенем вільності в радіальному напрямку.

У роботі [6] описується, що основною причиною виникнення автоколивань при токарній обробці є наявність координатного зв'язку між процесом різання та рухом по різних осях пружної системи верстата. Запропоновано основні способи підвищення вібростійкості верстатів при різанні шляхом орієнтації головних осей жорсткості та підбір жорсткостей та мас елементів системи, забезпечення умов, за яких збільшення сили різання викликає віджимання інструмента від деталі, збільшення демпфування систем. Пропонується для розгляду система деталь-інструмент, спільно пов'язана з процесом різання, як єдина замкнута пружна система верстата.

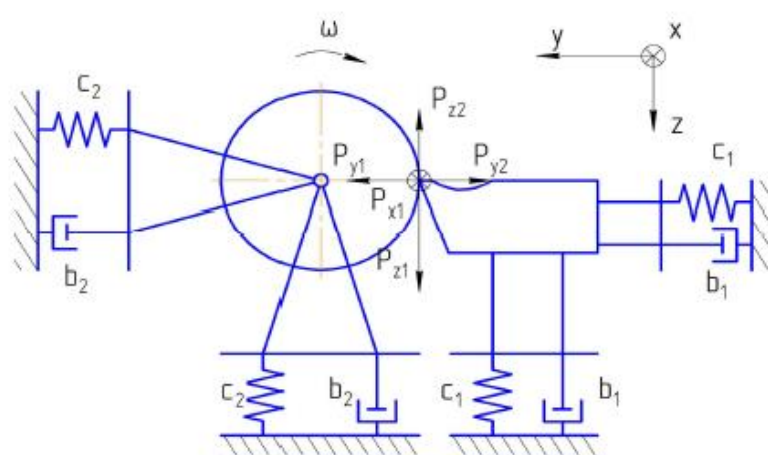


Рисунок 1.2 Пружна система верстата, пов'язана з процесом різання

Огляд літератури дозволив визначити період стійкості різального інструменту, обсяг матеріалу, що знімається за період стійкості і продуктивність в залежності від шару, що знімається. Ці критерії враховують характеристики матеріалів заготовки та різального інструменту на параметри обробки, представлені в таблиці 1. 1.

Таблиця 1.1. – Розрахункові дані

Матеріал заготовки	Матеріал Різучого інструмента	t, мм	S, мм/об	V, м/хв	T, хв	G, мм ³	П, мм ³ /хв
сталь40	T5K6	1	0,25**	0,9**	45	10125	225
40X	T15K10	5	0,2**	0,8**	45	36000	800
90XФ	T5K10	12	1,6	52	45	44928000	998400
сталь45	T15K6	0,4	0,05	270	55,3*	298656	5400
сталь45	T15K6	0,2	0,16	50	1,65*	2649,8	1600
сталь45	T15K6	1	0,1	80	1,38*	11105,7	8000
сталь45	BK8	0,4**	0,5**	0,7	3,59*	502,68	140
сталь45	T15K6	0,3**	0,17**	100	4879,7*	24886616	5100

1.3. Вимірювання сили різання

Експериментальні дослідження показали, що тангенціальна складова сили різання (FT) при різанні металу приблизно пропорційна фронтальній площі. «Константа пропорційності є специфічною для матеріалу і зазвичай називається питомою потужністю (Ks).

$$FT = Ksbh \quad (1.1)$$

де b - ширина стружки, h - товщина стружки»[7].

Сила різання зазвичай вимірюється на короткій відстані від зони різання за допомогою динамометра сили різання. Динамометр складається з двох плоских пластин, що містять три або чотири п'єзоелектричні тензодатчики. Чутливі елементи в тензодатчиках є плоскими частинами керамічного кристала. Керамічні деталі демонструють п'єзоелектричний ефект, який означає, що, коли вони деформуються, вони виробляють електричний заряд, який може бути посилений у напруження, пропорційну силі, яка спричинила деформацію. Нижню пластину динамометра притискають до столу, а заготовку кріплять до верхньої пластини [7]. Щоб забезпечити постійний контакт тензодатчиків з пластинами, вони встановлюються з дуже великою силою попереднього натягу.

Датчики навантаження досить жорсткі. Сила різання між інструментом і деталлю викликає невеликі рухи верхньої пластини відносно нижньої пластини

(пропорційно жорсткості датчиків навантаження). Цей невеликий рух деформує тензодатчик, і деформація створює сигнал вимірювання.

«Яким би корисним не був динамометр, він має обмеження. Він займає частину робочого простору. П'єзоелектричні компоненти чутливі до присутності рідини, тому зазор між пластинами необхідно ущільнити. Усі п'єзоелектричні кристали дещо відрізняються, і відмінності в поєднанні з невеликими зсувами тензодатчиків змінюють результуючу чутливість динамометра в координатних напрямках таблиці. Тому динамометр необхідно відкалібрувати»[7].

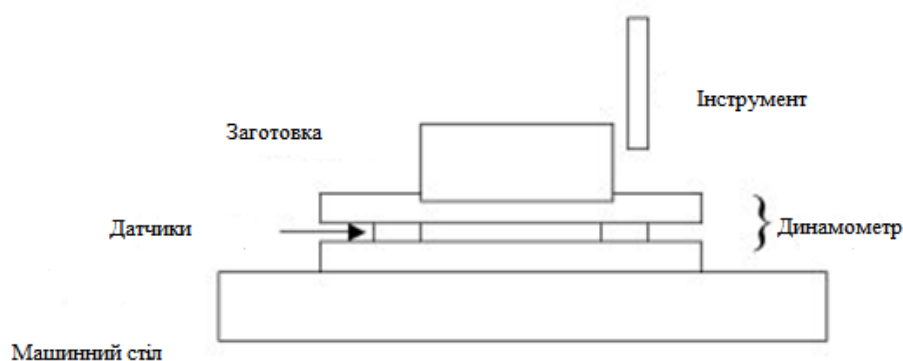


Рисунок 1.3 Динамометр сили різання

Однак основна проблема — пропускна здатність — безпосередньо впливає на принцип роботи. Оскільки п'єзоелектричні елементи повинні деформуватися, щоб створити сигнал, вони є гнучкими. Динамометр має функцію частотної характеристики, яка означає, що динамометр підсилює або послаблює сигнал залежно від частоти сили різання (рис. 2).

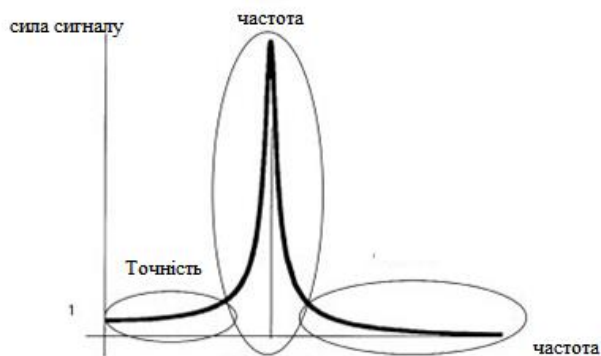


Рисунок 1.4 Спрощена функція частотної характеристики динамометра настільного типу

«Якщо частота сили різання низька, то сигнал сили різання передається динамометром. Якщо частота сили різання близька до власної частоти динамометричної системи, сигнал сили різання посилюється, іноді здосить сильно. Якщо сила різання значно перевищує власну частоту динамометричної системи, сигнал сили різання послаблюється. Тому виробники динамометрів намагаються розмістити власну частоту якомога вище. Вони вибирають дуже жорсткі тензодатчики та встановлюють їх із високим попереднім натягом. Масу верхньої плити намагаються зробити якомога меншою. Типові виробники динамометрів вказують частоти від 2000 до 3000 Гц»[8].

Деталь і монтажне обладнання додають масу верхній пластині та знижують власну частоту, переміщуючи пік на малюнку вліво та зменшуючи частоту. Для практичних застосувань власна частота з установленою деталлю часто значно нижча 1000 Гц. Для шпинделя, що обертається зі швидкістю 24 000 об/хв і утримує інструмент із двома зубами, частота проходження зуба становить 800 Гц, тому пік на малюнку має бути значно вищим за цей. Обмеження смуги пропускання динамометра є однією з головних причин того, що вимірювання сили різання зазвичай недоступне у виробничих верстатах.

1.4. Геометричний аналіз токарного різця

«Різець складається з двох частин: головки – робочої частини, з різальною пластиною з інструментального матеріалу і стрижня (тіла) різця, що виготовляється зазвичай зі сталі 45 та різцетримача. Слід зазначити, що по передній поверхні завжди сходить стружка; головна задня поверхня звернена до оброблюваної поверхні; головна ріжуча кромка (лезо) утворюється перетином передньої з головною задньою поверхнею; допоміжна ріжуча кромка (лезо) утворюється перетином передньої та допоміжної задньої поверхонь; вершина різця утворюється поєднанням головної та допоміжної ріжучих кромок. Вершина може бути гострою, закругленою (радіусною) або у вигляді невеликої прямої лінії (третья, перехідна ріжуча кромка). В останніх двох випадках шорсткість оброблюваної поверхні зменшується. На рис. 1.6 наведені поверхні та площини на заготівлі в процесі її обробки різцем»[8].

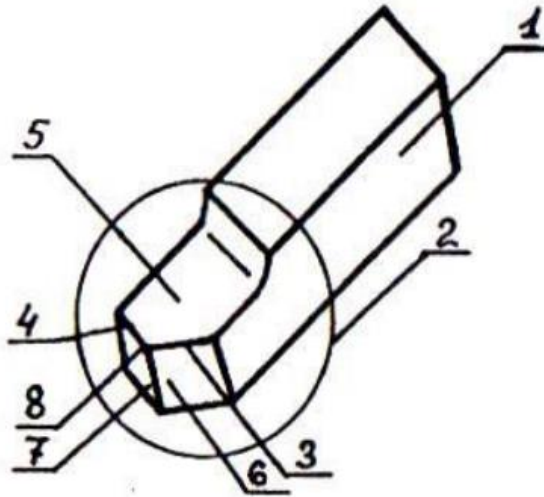


Рисунок 1.5 Елементи різця: 1 - стрижень (тіло) різця; 2 – головка різця; 3 - головна ріжуча кромка (лезо); 4 - допоміжна ріжуча кромка; 5 – передня поверхня; 6 – головна задня поверхня; 7 – допоміжна задня поверхня; 8 – вершина різця.

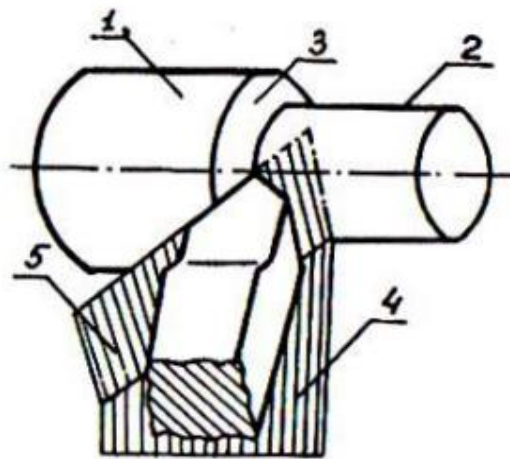


Рисунок 1.6 Поверхні та площини при токарній обробці: 1 – поверхня, що обробляється, з якої зрізають шар матеріалу (припуск); 2 – оброблена поверхня, що виходить після зрізання шару матеріалу; 3 – поверхня різання, утворюється головною ріжучою кромкою різця; 4 – основна площина, паралельна напрямкам поздовжньої та поперечної подачі; 5 – площина різання, проходить через головну ріжучу кромку щодо поверхні різання заготовки. Головні кути вимірюються в перерізі головної січної площини А-А, яка перпендикулярна до проекції головної ріжучої кромки на основну площину. γ – головний передній кут – кут між передньою поверхнею та площиною, перпендикулярною до площини різання.

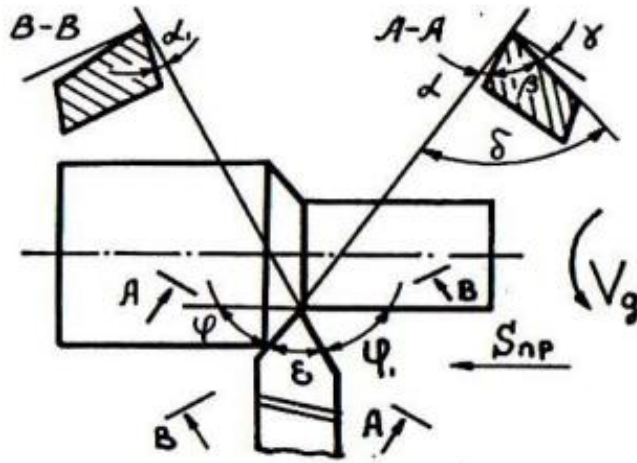


Рисунок 1.7. Кути токарного різця

«Зі збільшенням кута γ інструмент легше врізається в матеріал, знижується сила різання і витрата потужності, підвищується якість поверхні, що обробляється. Надмірне збільшення кута γ знижує міцність головної ріжучої кромки та збільшує її зношення»[9].

Величина γ зазвичай становить $0 - 15^\circ$, а при обробці твердих матеріалів та ударних навантаженнях передній кут може бути негативним і досягати $- 10^\circ$. α – головний задній кут. Кут призначений для зменшення тертя між головною задньою поверхнею і поверхнею різання, що знижує зношення інструменту. Надмірне збільшення кута призводить до зниження міцності різального леза. Зазвичай він становить $6 - 12^\circ$. β – кут загострення (кут клину) між передньою та головною задньою поверхнями різця ($\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$). δ – кут різання між передньою поверхнею та площиною різання ($\delta = \alpha + \beta$).

«До допоміжних кутів зазвичай відносять також кут нахилу головної ріжучої кромки λ , який визначається між головним різальним лезом і площиною, що проходить через вершину різця паралельно основній площині. Кут визначає напрям стружки і коливається від $+ 5^\circ$ до $- 5^\circ$. Якщо $\lambda = 0$, стружка сходиться по осі різця, якщо $\lambda < 0$, стружка сходиться у напрямку подачі, при $\lambda > 0$ стружка сходиться у напрямку, зворотному напрямку подачі. Напрямок сходу стружки значна при роботі на верстатах-автоматах. Зі збільшенням λ якість обробленої поверхні погіршується»[10].

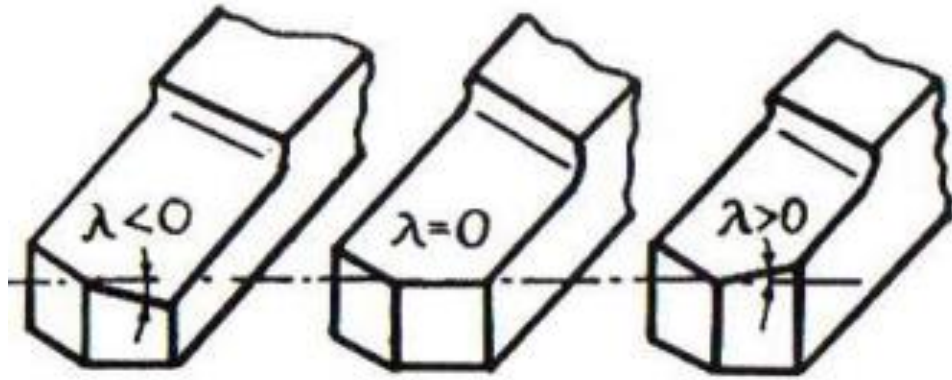


Рисунок 1.8 Кути нахилу головної ріжучої кромки

Передня поверхня різця може мати три різні форми: плоску без фаски, що рекомендується при обробці сірого чавуну, проте вона може бути використана і для інших матеріалів; плоску з фаскою – при токарній обробці сталі з великими подачами; криволінійну з фаскою – для різців усіх типів, що застосовуються для обробки пластичних матеріалів.

«Форма головки різця, величина кутів, форма передньої поверхні та різального леза, розміри перерізу різця істотно відбиваються на процесі різання. Вони впливають на величину сил, температуру різця, що, своєю чергою, має враховуватися щодо режимів різання»[10].

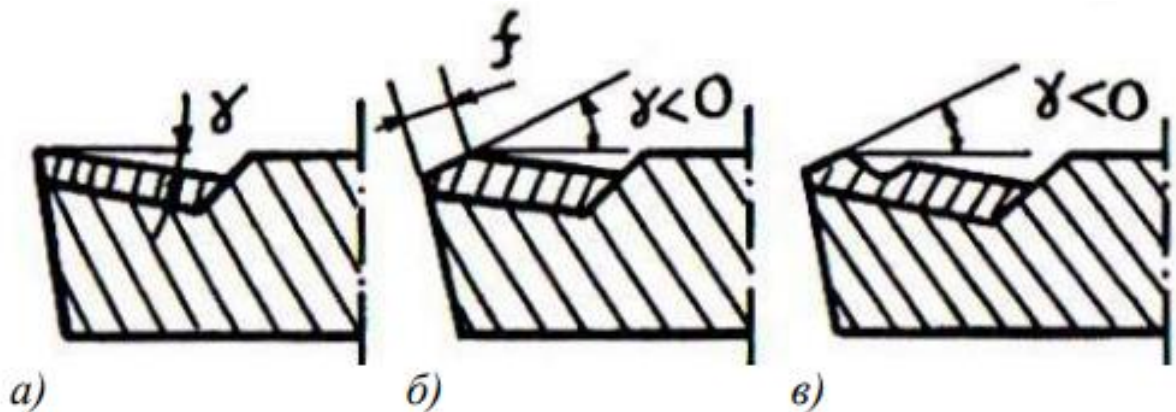


Рисунок 1.9 Форма передньої поверхні різця

Висновки: Проаналізовані поверхні та площини при токарній обробці. Зі збільшенням кута γ інструмент легше врізається в матеріал, знижується сила різання і витрата потужності, підвищується якість поверхні, що обробляється. Надмірне збільшення кута γ знижує міцність головної ріжучої кромки та збільшує її зношення. Представлено методику вимірювання сили різання.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Матеріал для проведення експерименту

Характеристика сталі 45X. Низьколегований сплав із групи конструкційних сталей. Виготовляється у вигляді різних профілів, гарячекатаного та каліброваного сортового прокату, листа, широких та вузьких смуг та безшовного трубного прокату. Може піддаватися термічній та хіміко-термічній обробці.

Сталь 45 - вуглецева конструкційна якісна сталь ферито-перлітного класу – одна з найпопулярніших, характеризується невеликою вартістю та високими споживчих якостями. Подібна за складом та властивостями до сталі - 40X, 50, 50Г2. Виробляється сталь 45 і поставляється споживачам у вигляді прокату сортового, в тому числі фасонного, каліброваних та шліфованих прутків, тонко- та товстолистового прокату, стрічок, смуг, дроту, труб тощо.

«Частка вуглецю сталі 45 варіюється в межах 0,42-0,5%. Така концентрація зумовлює високий показник твердості металу. Крім того, до складу сталі в незначних кількостях входять: кремній, хром, марганець, нікель, мідь, фосфор, сірка, миш'як. Загальний відсотковий вміст домішок – максимум 2,57%. Густина цієї марки сталі становить 7826 кг/м³. Ця величина входить в рамки середнього значення щільності конструкційної сталі, що дорівнює 7700-7900 кг/м³»[11].

Для отримання даних щодо механічних властивостей металу проводяться спеціальні випробування на спеціальному устаткуванні. На значення параметрів впливають хімічний склад, температура випробувань, вид та тривалість термообробки (загартування, відпал, відпуск), геометричні розміри заготовок. Так, наприклад, за допомогою нормалізації (попередньої термообробки) покращують процес різання, за допомогою гартування підсилюють міцність, твердість, стійкість до зношування. Варіюючи цими чинниками можна домогтися послаблення чи посилення тих чи інших якостей. При цьому термообробці можуть піддаватися як заготовки, так і готові вироби.

«Випробовування на міцність проводяться на спеціальних установках. Один кінець металевого виробу закріплюється нерухомо в лещатах, інший

прикріплюється до механічного або гідравлічного приводу. Плавню наростаюче зусилля (на розрив, скручування, стиск або вигин) фіксується електронними пристроями. Максимальне зусилля, коли починає руйнуватися метал і буде порогом міцності. Для сталі 45 межа міцності при розтягуванні дорівнює 550-690 МПа»[11];

Межа плинності - пов'язана з попереднім параметром, при якому починаються незворотні деструктивні процеси руйнування металу (кристалічних ґраток) без зростання навантаження. Межа плинності сталі 45 при підвищенні температури випробувань становить від 200 до 1200С падає від 340 МПа до 15 МПа.

«Відповідно до ГОСТ 1050 твердість металопродукції зі сталі 45:

гарячекатаної, без термічної обробки – 229 НВ;

гарячекатаною після відпалу або високої відпустки – 197 НВ;

каліброваної зі спеціальним оздобленням поверхні нагартованої заготовки – 241НВ;

каліброваної та зі спеціальною обробкою поверхні після відпалу або високого відпуску – 197 НВ»[11].

Ударна в'язкість – цей параметр залежить від температури експлуатації деталей, від мікроструктури металу, від чистоти сталі або наявності певних домішок в сплаві[11].

Залежність величини ударної в'язкості від виду термообробки добре показує наступний приклад. При випробуванні сталевих прутків діаметром 25 мм з різним типом термообробки та при температурі 20°С.

«Результати виглядають наступним чином:

для гарячекатаного дроту – 14-15 Дж/см²;

для прутка, що пройшов відпал – 42-47 Дж/см²;

для дроту з нормалізацією – 49=52 Дж/см²;

для прутка з термообробкою типу загартування та відпустки – 110-123 Дж/см²»[11].

При поступовому зниженні температури випробувань до - 60°С ударна в'язкість знижується, тобто. метал стає крихким.

Технологічні властивості

Сталь 45 – важко зварювана, відноситься до 3 групи зварюваності; не схильна до відпускнуї крихкості; кування проводиться при початковій температурі 1250°C; низькі антикорозійні властивості.

«Сталь 45 чутлива до концентрації напружень, схильна до утворення тріщин у місцях зварювання. Заготовки, що зварюються, повинні попередньо прогріватися, а також бажано прогрівати в процесі зварювання для отримання рівномірних швів (для листа товщиною 15 мм температура прогріву - 100°C). Рекомендовані електроди для зварювання - УОНИ-13/45 та УОНИ-13/55. Якість швів обов'язково перевіряється після закінчення зварювальних робіт або сучасними методами ультразвукової діагностики або рентгеном, або методом навантаження - шов піддається навантаженню, що на 30% більше передбачуваного. Сталь 45 стійко переносить перепади температур, характеризується за витривалістю та зносостійкістю, піддається обробці. Тому вона широко застосовується в машинобудуванні, верстатобудуванні, будівництві. З неї роблять редуктори, зубчасті колеса та вали-шестірні, ланцюгові приводні зірочки, кулачки, супорти, шпинделі та інші деталі, що піддаються в процесі експлуатації навантаженням та тертю»[11].

Характеристика сталі 40Х.

Низьколегований сплав із групи конструкційних сталей. Виготовляється у вигляді різних профілів, гарячекатаного та каліброваного сортового прокату, листа, широких та вузьких смуг та безшовного трубного прокату. Може піддаватися термічній та хіміко-термічній обробці[12].

«Хімічні властивості. Хромовмісний залізвуглецевий сплав. Крім хрому, сталь містить як легуючі добавки кремній і марганець, а також домішки сірки, фосфору і деяких кольорових металів. Введення хрому в кількості близько 1% підвищує прожарювання сталі 40Х і сприяє збільшенню міцності. Низьколегована сталь 40Х характеризується високою механічною міцністю. У термообробленому стані демонструє високу зносостійкість та твердість поверхні. Помірковано чутлива до деформаційного старіння. Є сплавом, що

важко зварюється. Дуже схильна до відпускної крихкості та флокеночутлива. Правильно підібраний режим термічної обробки дозволяє знизити вміст водню в металі»[12].

Сталь 40Х масово використовується для дисків, роторів, поршнів хрестовин робочих валів, осей та валів парових та гідравлічних турбін. Також сталь затребувана при виробництві безшовних труб різного перерізу та численних кріпильних елементів парових котлів та водогрійних установок. Досить часто її застосовують у машинобудуванні для виготовлення: зубчастих коліс; різьбових втулок; гайок, плоских та сферичних шайб; рейкових напрямних; валів, поршнів, півосей; кілець та кулачків [13].

2.2. Обладнання для токарних і гвинторізних робіт

«Токарний верстат 1А616 призначений для обробки порівняно невеликих деталей з різних матеріалів швидкорізальним (Р18, Р6М5) і тврдосплавним (ВК, ТК, ТТК) інструментами в індивідуальному і серійному виробництвах. На токарному верстаті по металу здійснюють точіння зовнішніх циліндричних і конічних поверхонь, торців, прорізання канавок і відрізання, обточування конічних фасонних поверхонь, свердління, зенкерування отворів, нарізання різноманітних різьблень різцем, нарізування метричного, дюймового різьблення мітчиком і плашкою, накочування сітчастих рифлень поверхні»[14].





Рисунок 2.1 Токарно-гвинторізний верстат моделі 1А616

Можливість обробки деталей - тіла обертання: вали; кільця; втулки; муфти; гайки; зубчасті колеса. Обробка відбувається за допомогою обертання заготовки щодо ріжучого інструменту[14].

Універсальні кутоміри Мікротех тип 3-5 з ноніусом 0-360 призначені для вимірювання зовнішніх і внутрішніх кутів. Застосовується в приладобудуванні, машинобудуванні та інших галузях промисловості. Для вимірювання кутів у зазначених діапазонах, кутомір має основу та лінійку, комбінація яких дає змогу вимірювати в різних випадках. Під час виконання вимірювань, поверхні лінійки й основи об'єднати без просвіту з поверхнями деталі, що створюють потрібний кут за допомогою гвинта мікрометричного подавання. Зафіксувати за потреби, взаємне положення вимірювальних поверхонь кутомера фіксувальною гайкою. Провести відлік значення кута за шкалою основи (число градусів) і за ноніусом (число хвилин) [15].

«Кутоміри з ноніусом можуть використовуватися як засіб вимірювання під час проведення робіт із механічного оброблення деталей або для контролю точності виготовлення під час приймання готових виробів відділами ОТК»[15].



Рисунок 2.2 Кутомір типу 3-5

Для науково-дослідних робіт переважно використовують електричні та, меншою мірою, гідравлічні й механічні динамометри. Різець укріплюється болтом 3 на основі 1 каретки 2, що повертається відносно опор O і Ox і переміщається на шарикопідшипниках уздовж осі різця, ці переміщення повинні бути мізерно малі.

«Скоба 4 служить для установки різця на рівні центрів верстата. У процесі різання дотична сила P , що діє вертикально вниз, змусить піднятися задній кінець каретки 2, а також шток 5 з поршнем 6, і тиск рідини в циліндрі 7 трубкою 8 буде передано манометру. Пристрій, що складається з поршня і циліндра з рідиною, називають гідравлічним датчиком. За допомогою таких самих датчиків вимірюються складові сили різання. Такі динамометри часто забезпечуються самописними пристроями для автоматичного запису кривих, що фіксують зміну сил у процесі різання»[16].



Рисунок 2.3. Трьохкомпонентний токарний динамометр

Верстати моделі 3622д призначені для алмазного доведення поверхонь твердосплавних різців всіх типів висотою державки до 25 мм по ГОСТ 6743-61, ГОСТ 9795-61, ГОСТ 9796-61.

«Висота встановлюваного різця, мм 25

Довжина різця, мм 300

Діаметр шліфувального круга, мм 150

Серія 1973

Заміна 3В622Д

Потужність 0,75

Габарити 560x800x1280

Маса 480»[18]



Рисунок 2.4. Заточування токарних різців

Різець токарний прохідний відігнутий 32x25x170 Т15К6 з пластиною з твердого сплаву за ГОСТ 18877-73 складається з державки і робочої частини - твердосплавної пластини. Державка виготовляється із сталевієї полоси марки ст45 або 40Х. Ріжучі твердосплавні пластини використовують 01, 02, 07, або 10 форм. Марки сплавів застосовують такі як: ВК8; Т5К10; Т15К6; Т30К4; ВК6; ВК3; ВК6ОМ.

«Різець прохідний відігнутий використовується у металообробці, з усієї токарної групи, він займає третє місце після відрізного і прохідного упорно-

зігнутого різця. Універсальний у використанні: працює при точінні на прохід, обробці циліндричних поверхонь, фасонних, конусних поверхонь. Використовується при підрізанні торця, нарізання внутрішніх і зовнішніх фасок»[18].

Різець з квадратним перетином державки кріплять у борштангах і застосовують для розточування отворів. Різець широко використовують на різних токарно-карусельних станках. Різець прохідний відігнутий виготовляють правого та лівого виконання та з кутами врізання пластини 0° та 10° .

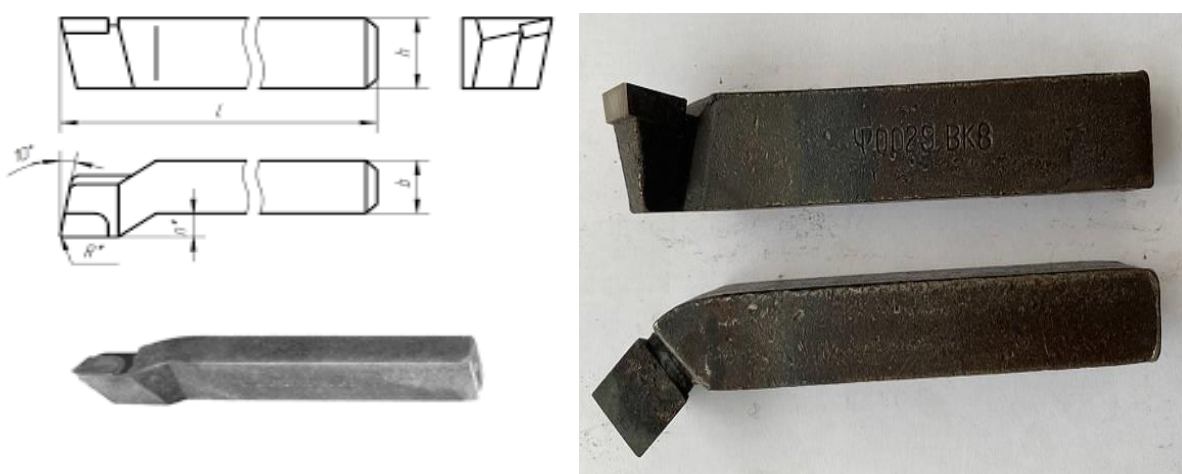


Рисунок 2.5. Різець токарний

Поняття «цифрова оптика» стосовно наукових досліджень, розкриває його зміст, дає певну характеристику. Під цифровою оптикою розуміється сукупність заснованих на цифрових технологіях підходів, методів, інструментарію, що допускають «масштабування» об'єктів, подій і періодів, що розглядаються, вивчення їх у різних часових і просторових інтервалах, зміну цих інтервалів у межах одного наукового дослідження. На матеріал переважно наукового характеру дається загальна характеристика мікро- та макро досліджень як методологічних підходів та напрямів в наукових дослідженнях.

«Обґрунтовується необхідність забезпечення поєднання макро- та мікро наукових підходів, методів та технологій в науковому дослідженні і через це – цілісного пізнання та уявлення про структуру. Це поєднання розглядається і з погляду можливості виходу через мікροаналіз на узагальнення, і з погляду

можливості розуміння локальних подій та об'єктів через глобальну оптику. Методи цифрової оптики аналізуються також у ракурсі індивідуального та масового зображення, зокрема через обробку масових даних»[18].

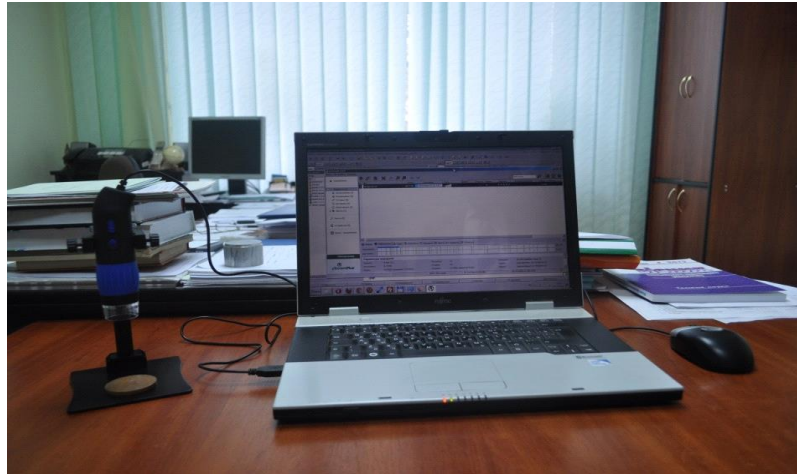


Рисунок 2.6 Комплекс для визначення матеріалів

Прилад профілограф-профілометр модель 201 призначений для вимірювання параметрів шорсткості та хвилястості поверхонь металевих і неметалевих деталей, а також поверхонь із покриттями. Параметри шорсткості визначають за профілограмою (запис профілю мікрошорсткостей у прямокутних координатах у збільшеному масштабі), або безпосередньо за аналоговим показником. Прилад дає змогу контролювати номінально прямолінійні профілі зовнішніх і внутрішніх поверхонь.

«У режимі роботи - діапазон базових довжин: 0,08; 0,25; 0,8; 2,5 мм інтегрування. Це означає, що 'відсікаються' нерівності з кроками більше встановленої базової довжини. Під час запису найбільша довжина ходу вимірювального перетворювача становить 40 мм, що дає змогу контролювати мікронерівності (шорсткість) і хвилястість із великими кроками»[19].

Метрологічні характеристики приладу

Межі показань при вимірюванні, мкм - 0,02 ... 5,00.

Похибка приладу (під час відлічування показань) - до $\pm 10\%$.

Вертикальне збільшення, тисяч крат - 1; 2; 4; 10; 20; 40; 100.

Похибка вертикального збільшення - до + 5%.

Горизонтальне збільшення, крат - від 2 до 4000 (18 ступенів).

Вимірвальна сила, сН - не більше 0,1.

Довжина інтегрування (при використанні приладу), мм - 1,6; 3,2; 6,0.

Базова довжина (відсічення кроку), мм - 0,08; 0,25; 0,8; 2,5.

«Максимальний крок нерівностей, що реєструється під час запису профілограми, мм:

- опора тороїдальна ($R = 50$ мм) - 2,5;

- опора плоска - 3,5;

- пристосування для контролю хвилястості - 20,0.

Номінальний діаметр контрольованого отвору, мм:

- за глибини до 10 мм - 8;

- за глибини до 800 мм - 20.

Радіус заокруглення, мкм - $10+2,0$ або $2+2,0$ »[19]



Рисунок 2.7. Профілограф-профілометр модель 201

2.3. Планування багатofакторного експерименту

Будь-яке дослідження (чи то фізичний, чи то обчислювальний експеримент) пов'язане з матеріальними, енергетичними, виробничими, часовими витратами.

Тому завдання отримання достовірних результатів при мінімальних витратах на їхнє одержання дуже важливе[19].

«Теорія планування експерименту має дати відповідь на такі основні запитання:

- як організувати і провести експеримент;
- як обробити результати експерименту, щоб витягти максимум інформації про досліджуваний об'єкт;
- які обґрунтовані висновки можна зробити на основі результатів експерименту»[19].

При фізичному експерименті дослідник майже завжди має справу з так званими погано організованими (дифузійними) системами, що характеризуються різними невизначеностями. Обчислювальний експеримент має, як правило, меншу невизначеність, але вихідна інформація для цього експерименту також найчастіше береться або зі статистичних спостережень за реальним об'єктом, або шляхом випробувань фізичних властивостей того чи іншого об'єкта в лабораторних умовах. Тому основним апаратом теорії планування експерименту математична статистика. Теоретично планування завжди є об'єкт якого необхідно встановити функціональні чи стохастичні зв'язок між виходом (функцією відгуку) і входами (факторами). Чинники, як правило, набувають конкретних дискретних значень. Якщо кожному фактору поставити у відповідність координатну вісь, то утворена система координат називається факторним простором. Певне поєднання рівнів чинників у просторі описує умови проведення одиничного досвіду. Це поєднання називається точкою плану експерименту[19].

Якщо лінійна модель не адекватна досліджуваному об'єкту, слід випробувати плани вищих порядків і насамперед повний поліном другого порядку:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_1^2 + b_4 X_2^2 + b_5 X_1 X_2 \quad (2.1)$$

«За допомогою останнього члена полінома враховується взаємодія факторів X_1 та X_2 . Поліном містить 6 коефіцієнтів. Отже, за допомогою

багатофакторного експерименту(БПЕ) порядку $2^2=4$ визначити всі коефіцієнти неможливо. У загальному вигляді число коефіцієнтів повного квадратичного полінома, що підлягають оцінці, визначається як»[20]:

$$\eta = 1 + 2k + C_k^2 \quad (2.2)$$

Для того, щоб отримати окремі (не змішані) оцінки коефіцієнтів при членах X_2 необхідно кожен фактор нормувати хоча б на трьох рівнях (кількість рівнів має бути не менше $n+1$, n – ступінь полінома). У цьому спектр плану типу ПФЭ визначиться як $v=(n+1)k$.

«Наприклад, при $k=2$ і $n=2$ $\eta=6$, спектр плану дорівнюватиме $v=32=9$. Виникає деяка, щоправда, невелика надмірність спектра плану. Зі збільшенням числа факторів ця надмірність збільшується. Так при $k=3$ і $n=2$ $v=33=27$, а $\eta=10$ – надмірність числа дослідів може бути занадто великий. Уникнути цієї надмірності можна шляхом побудови про композиційних планів» [20].

Таблиця 2.1.–Матриця F центрального ортогонального композиційного плану при $k=2$ [20]

№ дослідів	Матриця F						Вид точок плану
	X_0	Матриця X		ця X_1^2	X_2^2	X_1	
		X_1	X_2				
1	1	1	1	1	1	1	планування
2	1	-1	1	1	1	-1	
3	1	1	-1	1	1	-1	
4	1	-1	-1	1	1	1	
5	1	1	0	1	0	0	планування
6	1	-1	0	1	0	0	
7	1	0	1	0	1	0	
8	1	0	-1	0	1	0	

Якщо фактори є випадковими величинами, підпорядкованими певним законам розподілу, функціональний зв'язок між функцією відгуку Y та факторами X_i дозволяє отримати числові характеристики Y та її закон розподілу.

При розподілі випадкових факторів згідно із законом рівномірної щільності в діапазоні $-1 \dots 1$:

$$f_X(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq -1; \\ 1/2 & \text{при } -1 \leq x \leq 1, \\ 0 & \text{при } x \geq 1. \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\llcorner M[Y] = b_0 + b_1 M[X_1] + b_2 M[X_2] + b_3 M[X_1^2] + b_4 M[X_2^2] + b_5 M[X_1 X_2],$$

$$D[Y] = b_1^2 D[X_1] + b_2^2 D[X_2] + b_3^2 D[X_1^2] + b_4^2 D[X_2^2] + b_5^2 D[X_1 X_2]$$

При розподілі факторів

$$M[X_1] = M[X_2] = 0, D[X_1] = D[X_2] = 1/3, M[X_1^2] = M[X_2^2] = 1/3,$$

$$D[X_1^2] = D[X_2^2] = 4/45 \gg [20].$$

З урахуванням наведених значень числових характеристик факторів вираз запишеться як:

$$M[Y] = b_0 + (b_3 + b_4)/3, D[Y] = (b_1^2 + b_2^2)/3 + (b_3^2 + b_4^2) \cdot 4/45 + b_5^2/9, \quad (2.4)$$

«У разі, якщо не кодовані фактори розподілені за законами, відмінними від закону рівномірного розподілу, для визначення числових характеристик функції відгуку доцільно попередньо перейти від полінома, записаного щодо кодованих факторів до полінома відносно не кодованих факторів, використовуючи співвідношення $\gg [20]$.

$$Y = b_0^* + b_1^* Z_1 + b_2^* Z_2 + b_3^* Z_1^2 + b_4^* Z_2^2 + b_5^* Z_1 Z_2$$

Для перевірки значущості тих чи інших членів регресійного полінома використовуємо метод β -коефіцієнтів. Для цієї мети запишемо поліном щодо нормованих центрованих випадкових величин:

$$\llcorner t_Y = \beta_1 t_1 + \beta_2 t_2 + \beta_3 t_3 + \beta_4 t_4 + \beta_5 t_5, t_Y = \frac{Y - M[Y]}{\sigma[Y]}, t_1 = \frac{X_1 - M[X_1]}{\sigma[X_1]} = \frac{X_1}{\sigma[X_1]},$$

$$t_2 = \frac{X_2 - M[X_2]}{\sigma[X_2]} = \frac{X_2}{\sigma[X_2]}, t_3 = \frac{X_1^2 - M[X_1^2]}{\sigma[X_1^2]}, t_4 = \frac{X_2^2 - M[X_2^2]}{\sigma[X_2^2]},$$

$$t_5 = \frac{X_1 X_2 - M[X_1 X_2]}{\sigma[X_1 X_2]} = \frac{X_1 X_2}{\sigma[X_1] \sigma[X_2]}, \beta_1 = b_1 \frac{\sigma[X_1]}{\sigma[Y]}, \beta_2 = b_2 \frac{\sigma[X_2]}{\sigma[Y]},$$

$$\beta_3 = b_3 \frac{\sigma[X_1^2]}{\sigma[Y]}, \beta_4 = b_4 \frac{\sigma[X_2^2]}{\sigma[Y]}, \beta_5 = b_5 \frac{\sigma[X_1]\sigma[X_2]}{\sigma[Y]} \gg [20].$$

Адекватність моделі справжнього функціонального зв'язку між функцією відгуку та факторами може бути перевірена за критерієм Фішера:

$$F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2[Y]}, S_{\text{ад}}^2 = \frac{Q}{f_{\text{ад}}}, Q = \sum_{\ell=1}^N (y_{\ell} - y_{\ell}^*)^2 \quad (2.5)$$

де

y_{ℓ} - значення функції відгуку, отримані на основі обчислювального експерименту,

y_{ℓ}^* - значення функції відгуку, отримані на основі регресійного полінома,

$f_{\text{ад}}$ - Число ступенів вільності» [19].

Рівень значущості гіпотези про адекватність отриманого регресійного полінома справжнього функціонального зв'язку залежить від величини критерію F та чисел ступенів вільності чисельника та знаменника ν_1 та ν_2 . При визначенні рівня значущості можна скористатися як таблицями для критерію Фішера, наведеними у літературі з математичної статистики, і різними системами для ПК.

2.4. Оцінка результатів прямих вимірювань

Залежно від розв'язуваної задачі, прямі вимірювання можуть проводитися з одноразовими і багаторазовими спостереженнями. Прямі одноразові вимірювання є найбільш розповсюдженими у практиці технічних вимірювань, оскільки точність їх результатів у звичайних умовах, як правило, достатня, і водночас вони відрізняються простотою вимірювального експерименту, високою продуктивністю (числом вимірювань за одиницю часу) та незначними витратами, для їх проведення не ставляться високі вимоги до кваліфікації експериментатора. За цими показниками вони значно перевищують інші методи вимірювань.

«Прямі багаторазові вимірювання застосовуються у тому разі, коли необхідно забезпечити підвищену точність результатів вимірювань, яка досягається за рахунок зменшення випадкової складової похибки вимірювань усередненням (статистичною обробкою) результатів спостережень вимірюваної величини того самого розміру. Їх доцільно проводити тоді, коли випадкова похибка результату вимірювань є переважною порівняно із систематичною. При малій кількості результатів»[20]:

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2.6)$$

Багаторазові вимірювання відрізняються підвищеними складністю, трудомісткістю і витратами, тому їх доцільність мусить бути переконливо обґрунтованою. Найчастіше вони застосовуються, наприклад, при виконанні наукових експериментів. Особливості в організації вимірювального експерименту при виконанні одноразових і багаторазових прямих вимірювань визначають відмінність у методиках оцінки їх результатів і похибок.

«В деяких випадках виявляється, що результат одного вимірювання різко відрізняється від результатів інших вимірювань, виконаних за тих же контрольованих умов. В цьому випадку говорять про грубу похибку. Такий результат, що містить грубу похибку необхідно виявити, виключити і не враховувати при подальшій статистичній обробці результатів вимірювань. Випадкові відхилення результатів спостережень»[20]:

$$\delta_i = X_i - m_x, \delta_i^2 = (X_i - m_x)^2 \quad (2.7)$$

Висновки. Проведено аналіз та характеристики матеріалу для дослідження. Запропоноване технологічне обладнання. Запропоновано багатофакторну оцінку при проведенні експерименту.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ СИЛ РІЗАННЯ

3.1. Токарний динамометр

Вимірювання сили при різанні металу є важливою задачею, оскільки це напряму пов'язано з проектуванням деталей машин, конструкцією інструменту, енергоспоживанням, точність деталі тощо. Метою вимірювання сили різання є розуміння механізму різання, наприклад, впливу змінних параметрів режимів різання чи параметрів заточування інструменту на силу різання, оброблюваність заготовки, процес стружко утворення чи знос інструменту [21].

«Як відомо, сили різання отримані інженерними розрахунками містять деякі похибки при порівнянні з експериментальними вимірюваннями. Сила різання навіть в стаціонарних умовах залежить від багатьох параметрів, а зміна сили різання з часом має особливу характеристику, вирахувати яку теоретично неможливо. Необхідність вимірювання всіх складових сили різання впливає з багатьох факторів, але найбільш важливим є необхідність кореляції з прогресом зносу інструменту та непостійністю сил, що діють на інструмент під час обробки» [22].

Якщо це вдасться детально виміряти усі складові сил різання, що виникають під час точіння, можна буде здійснювати моніторинг зносу інструменту при токарній обробці на основі зміни сили [23]. Важливість вимірювання сили різання полягає в тому, що вона є хорошим індикатором для виявлення зносу інструменту. Добре відомо, що під час процесу різання параметри різання такі як швидкість різання, подача і глибина різання часто мають відхилення від розрахункових значень. Для цього було розроблено багато динамометрів [24].

Зазвичай у динамометрах вимірювання сили різання в основному базується на пружній деформації матеріалів. Різноманітні дослідження, що стосуються конструкції динамометрів можна знайти в опублікованих роботах [25,26].

«Компоненти сили при токарній обробці часто вимірюють за допомогою динамометра з восьмикутним кільцем, або за допомогою тензорних датчиків які змінюють свій опір при деформації. Датчики, як правило розміщують на хвостовику інструменту. Хвостовик інструменту завжди характеризується неточністю і нечутливістю при вимірюванні одного або двох компонентів» [27].

Тензорезистор показує чітку залежність між вимірюваною величиною і деформацією на відповідному місці на пружному елементі [28]. У більшості випадків статичну силу отримують за допомогою тензометричного датчика який виробляє вихідну напругу, пропорційну прогину при пружній деформації.

Динамометри для вимірювання сили різання повинні бути виготовлені з достатньою точністю і високою жорсткістю конструкції [29]. У Луцькому НТУ [30] розробили динамометр на основі тензорезисторів, який може бути адаптований до деяких верстатів.

У цьому розділі описано конструкцію та принцип роботи аналогового динамометра на основі тензорезистора. Цей динамометр здатний вимірювати компоненти сил різання у трьох координатах. Оскільки зчитування аналогових значень вручну є складним і неточним, було реалізовано підключення до комп'ютера для автоматизації збору даних. На рисунку 3.1 наведено загальний вигляд розробленого динамометра на основі тензорезисторів.

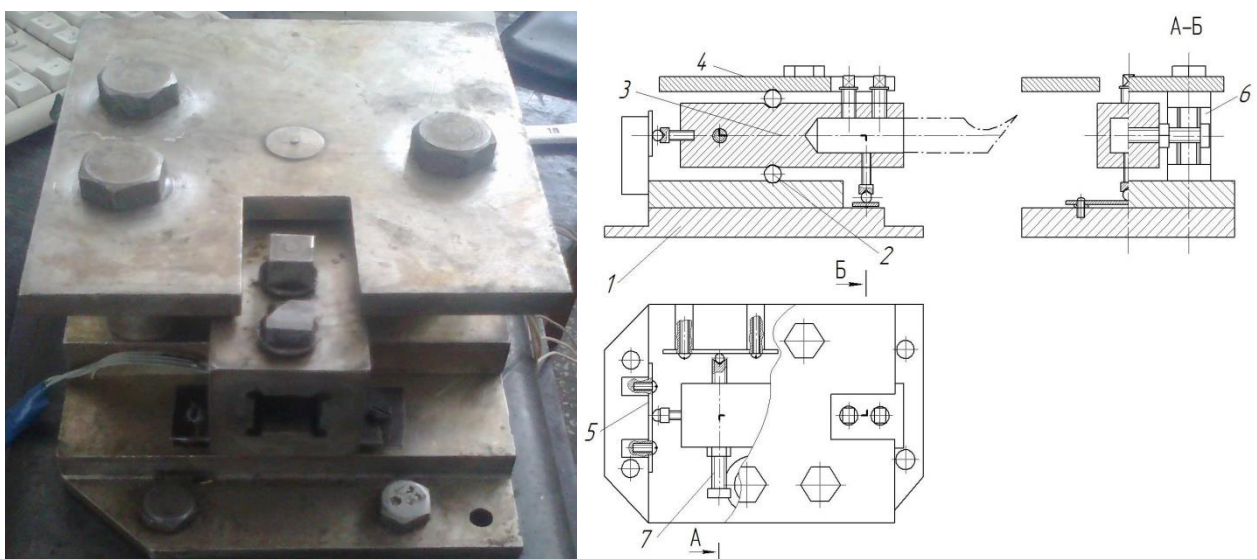


Рисунок 3.1 – Динамометр на основі тензорезисторів

«Динамометр монтується замість різцетримача на токарний верстат. Зусилля, яке діє на різець сприймає різцетримач та передає на пружні пластини з наклеєними тензометричними елементами. Різцетримач фіксується до корпусу шарнірами»[30].

3.2 Вимірювальний стенд

Аналоговий динамометр з трьома силовими компонентами здатний вимірювати сили різання під час токарної обробки у трьох напрямках. Підключення до комп'ютера для збору даних відбувається через аналоговий перетворювач.

«Аналогові дані можуть бути чисельно оцінені на комп'ютері і при необхідності можуть бути перетворені назад в аналогову форму. Принцип вимірювання сил різання та схематичне зображення вимірювання наведено на рисунку 3.2. Система здатна вимірювати силу подачі (F_f), силу тяги (F_t) і головну силу різання (F_c) які виникають під час токарної обробки, як показано на рис. 3.2. Цей динамометр складається з пружних пластин, на яких встановлені тензорезистори та виконані необхідні з'єднання для формування вимірювальних мостів Вітстоуна» [30].

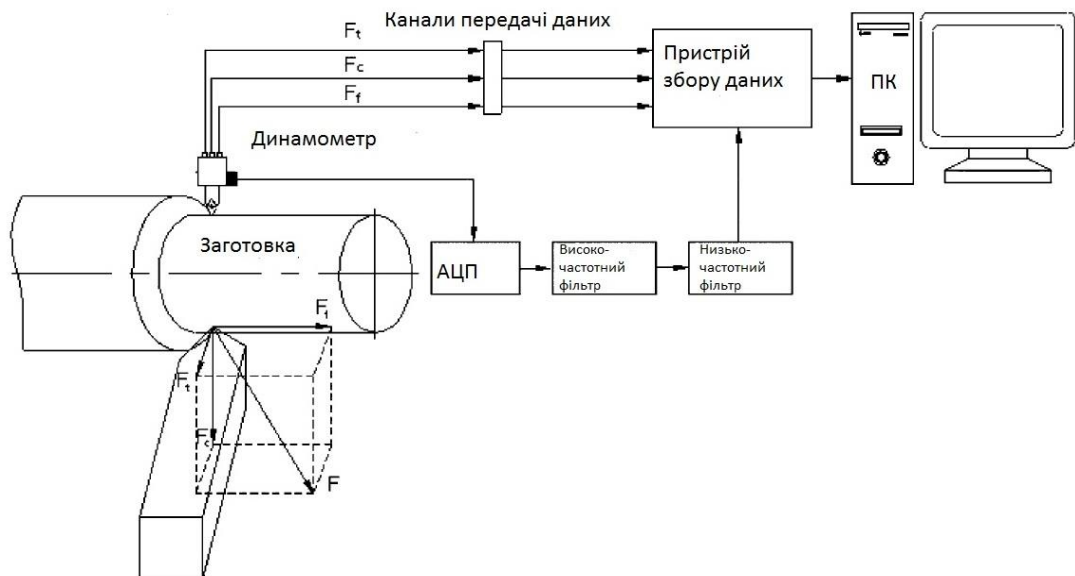


Рисунок 3.2 – Схема експериментального комплексу для вимірювання сил різання при точінні

Інформація про силу різання в реальному часі автоматично зчитується і зберігаються. Система автоматично зчитує та зберігає дані про силу різання під час точіння. Оскільки вихідна потужність мостових схем Вітстоуна дуже низька через високу навантаження динамометра, аналогові сигнали, що надходять з динамометра підсилюються вхідними модулями тензометричних датчиків (Advantech ADAM 3016), потім перетворюються в цифрові сигнали і знімаються платою збору даних PCI-1712, встановленою картою збору даних PCI-1712 в комп'ютері на базі MS-Windows. Збережені дані можуть бути отримані і використані для аналізу при необхідності. Програмне забезпечення для збору даних здатне усереднювати і графічно моделювати силові параметри у процесі роботи [29].

Конструкція динамометра має відповідати суворим вимогам щодо втрат в наслідок тертя частин динамометра а також похибкам спричиненими властивостями матеріалів пружних елементів. Пружні елементи повинні бути оброблені однаково і симетрично, щоб запобігти взаємному впливу і чутливості тензорних датчиків. Механічні властивості тензометричних датчиків повинні бути визначені експериментально та з високою точністю.

«Частота вібрації верстата, до якого кріпиться динамометр для вимірювання сили різання, повинна відповідати власній частоті коливань динамометра. Власна частота динамометра повинна бути якомога вищою. Частота вібрації верстату залежить від зі швидкістю обертання шпинделя верстату. Динамометр повинен мати власну частоту, яка щонайменше в чотири рази перевищує частоту вібрації верстату. Схема визнання вібрацій динамометра зображена на рис. 3.3. Для того, щоб визначити власну частоту динамометра, спочатку слід визначити кільцеву константу динамометра, для цього слід спочатку визначити кільцеву константу динамометра. Значення жорсткості для пружних елементів динамометра визначається за формулою »[29]:

$$Kt = \frac{F_t}{\delta_t} = \frac{Ebt^3}{1.8r^3} \quad (3.1)$$

Підставивши відповідні значення у рівняння, кільцева константа динамометра обчислюється як; $K_t = 36,458 \text{ Н/мм}$.

«Власна частота вібрацій при роботі динамометра, який монтується на верстат та контактує з заготовкою, може бути визначена з наступного співвідношення:

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K/m} \quad (3.2)$$

де – K постійна кільця динамометра (Н/мм),

M – маса динамометра (кг),

f_d – власна частота обертання динамометра (об/с)»[29].

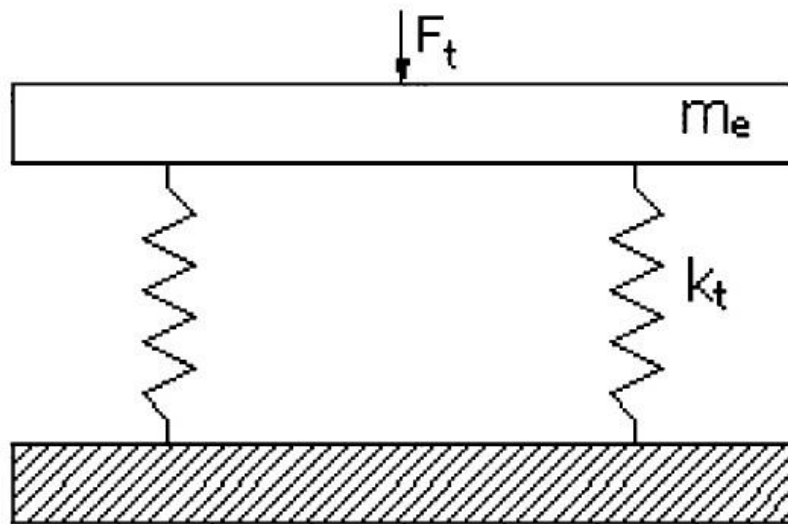


Рисунок 3.3. – Діаграма вільних коливань динамометра

Маса динамометра становить 36,43 кг. Підставивши відповідні значення у рівняння (3.2), власна частота коливань динамометра обчислюється як $f_d = 159.2$ об/с. Для того, щоб виконати зазначеної вище вимоги $f_d > 4f_m$, максимальна швидкість обертання шпинделя токарного верстата повинна становити 200 об/с або 12 000 об/хв.

3.3. Контрольні датчики

Правильний вибір точок, в яких встановлюються тензорезистори має важливе значення для досягнення високої точності в схемах мостів Вітстоуна. Орієнтація тензорезисторів на пружних платформах і положення пластин на динамометрі наведено на рис. 3.4.

«Сила тяги F_t сприймається кільцями динамометра А, В, С і D, як показано на рис. 3.4. Тензорезистори 3, 4, 7, 8, 11, 12, 15 і 16 знаходяться під дією головної сили різання F_t . Серед цих тензорезисторів 3, 7, 11 і 15 сприймають силу подачі різця, а 4, 8, 12 і 16 – сприймають силу притискання різця до деталі»[30].

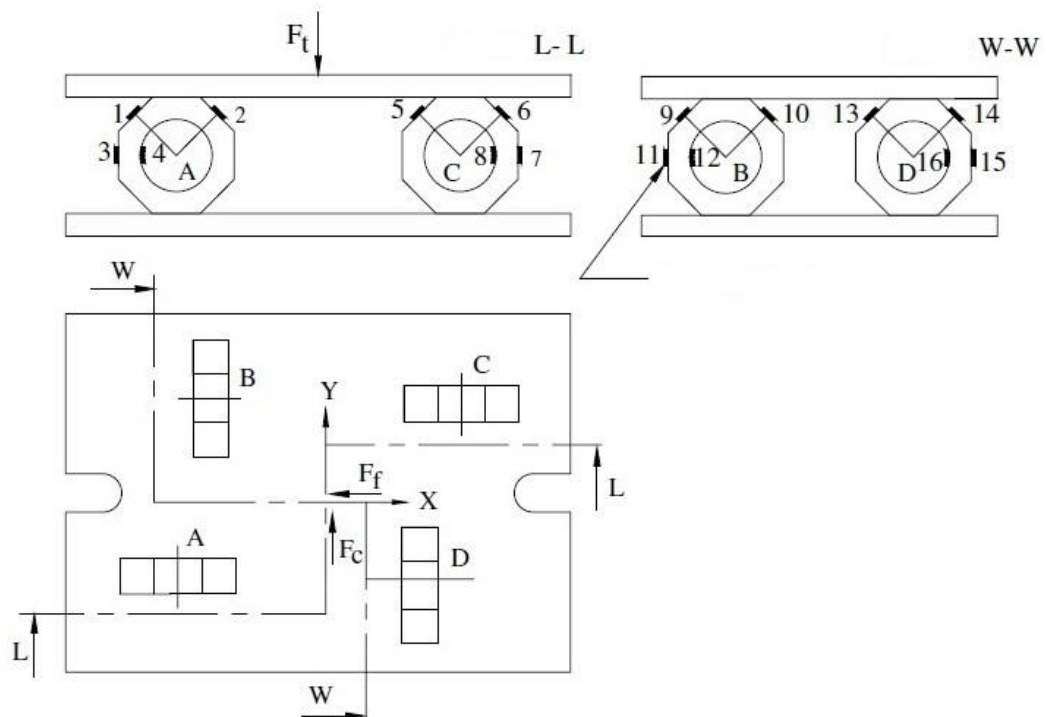


Рисунок 3.4. – Розміщення тензорезисторів та пружних елементів на динамометрі

Електрична схема, яка називається мостом Вітстона, показана на рисунку 3.5. Цей міст складається з чотирьох основних резисторів: R , R_1 , R_2 і R_3 , розташованих таким чином, що вимірюючи вихідну напругу V_o і знаючи вхідну напругу V_i , можна оцінити зміну електричного опору ΔR у

тензорезисторі. При використанні лише одного тензорезистора утворюється напівміст. Резистор R_4 і потенціометр R_t використовуються для балансування схеми.

«Це означає, що вихідна напруга V_o може бути встановлена рівною нулю, коли електричний опір тензорезистора дорівнює як показано на рисунку, таким чином, що, вимірюючи вихідну напругу V_o і знаючи вхідну напругу V_i , можна оцінити зміну електричного опору ΔR у тензорезисторі. При використанні лише одного тензорезистора утворюється напівміст. Резистор R_4 і потенціометр R_t використовуються для балансування схеми. Це означає, що вихідна напруга V_o може бути встановлена рівною нулю, коли електричний опір тензорезистора дорівнює номінальному значенню R , що дорівнює $\Delta R=0$. У загальному випадку вихідна напруга V_o не дорівнює нулю, навіть якщо тензорезистор не деформується, тому що резистори, які використовуються для завершення моста не завжди однакові, і це є причиною, через яку необхідний контур регулювання нуля»[30].

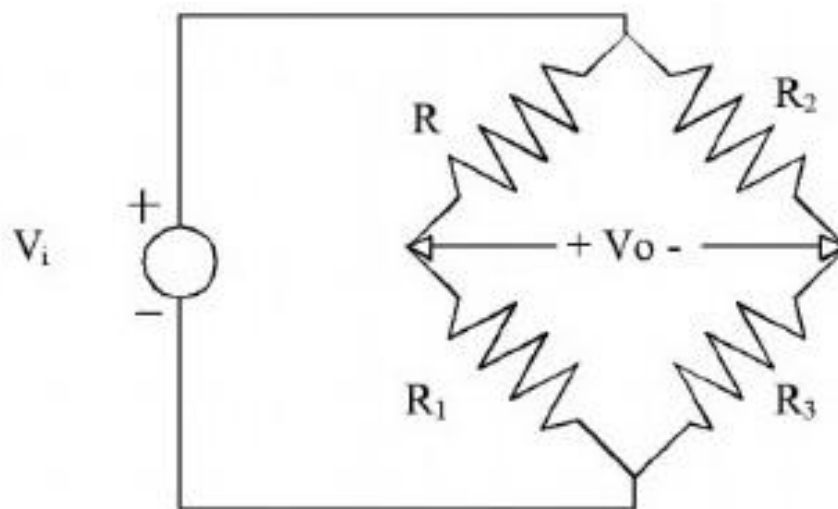


Рисунок 3.5 – Схема підключення тензорів

Метою цього прикладу є отримання сили P за допомогою двох тензорезисторів, встановлених на прямокутній балці. Два тензорезистори закріплені на верхній та нижній поверхні пружного елемента, як показано на

рисунку і згинаються коли навантаження P прикладається до пружного елемента.

«Для кожного з пружних елементів було проведено тарування. При таруванні пружний елемент з тензорами навантажували з заданим навантаженням та складали графік зміни опорів тензорів в залежності від прикладеного навантаження. Кількість повторів – 3. Приклад тарувального графіку для одного з пружних елементів на рис. 3.6»[30]

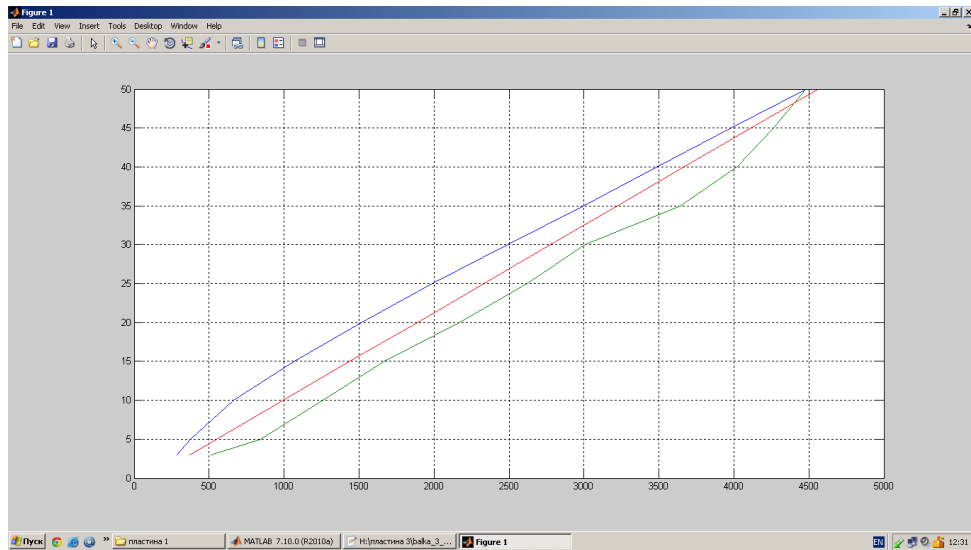


Рисунок 3.6. – Тарувальний графік для одного з пружних елементів

Приклад отриманих даних з динамометра наведено на рисунку 3.7. Де $F1$ – головна сила різання, $F2$ – сила, що діє на різець при його подачі, $F3$ – сила притискання різця до деталі, F – Загальне значення сили різання.

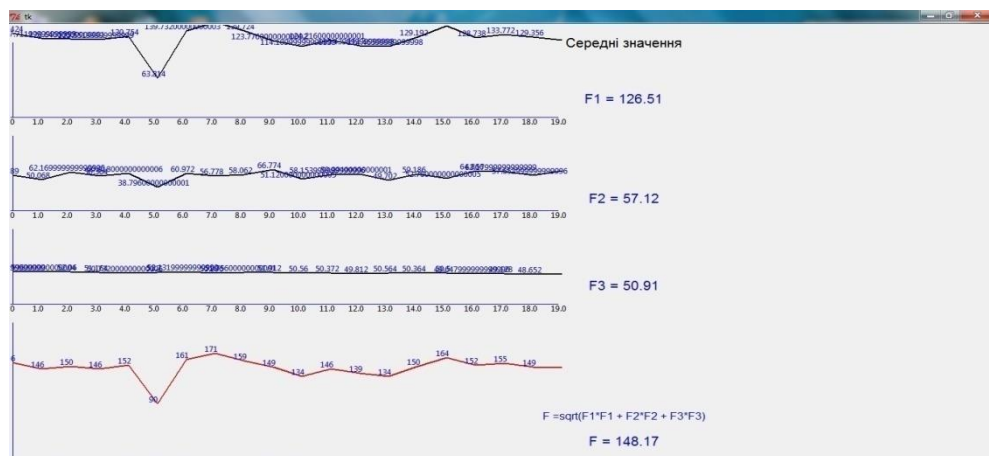


Рисунок 3.7. – Дані отримані в результаті перевірки роботи динамометра

«Похибка вимірювань динамометра буде рівною сумі похибці тарування та похибці на втрати на тертя у конструкції динамометра. Сумарна похибка складатиме до 7%. Отримані результати випробувань, виконаних при різних параметрах різання показують, що динамометр може бути використаний для вимірювання сил різання»[30].

Висновки. У даному розділі описано принцип роботи тензометричного токарного динамометру та основні аспекти його роботи. Пристрій розроблений для одночасного вимірювання трьох складових сил різання при точінні.

РОЗДІЛ 4

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЗАТОЧУВАННЯ ІНСТРУМЕНТУ ТА РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА СИЛУ РІЗАННЯ ПРИ ТОЧІННІ

4.1. Результати досліджень впливу параметрів заточування інструменту на сили різання при точінні

Розглянемо зміну сил, що впливають на токарний різець при точінні сталі 45 в залежності від зміни кутів заточування токарного різця. Змінними параметрами будуть кут заточування α та кут заточування φ . В таблиці 4.1 наведено змінні величини та їх варіювання. Параметри різання для усіх дослідів будуть сталими: $s=0,13$ мм/об, $n=450$ об/хв, $t=1$ мм.

Таблиця 4.1. – Характеристика змінних параметрів

Параметри	α_1°	φ_2°
Середнє значення	20	50
Зміна параметру	5	5
Верхнє значення	25	55
Нижнє значення	15	45

У таблиці 4.2 наведено зведені змінні параметри та результати досліджень. Для достовірності даних було проведено три досліди.

Таблиця 4.2. – Зведені змінні параметри та результати експерименту для сталі 45

№ досліджу	Матриця		Значення змінних параметрів		Натуральні експериментальні дані			Серед-не	Дис-персія
	α_1	φ_2	α_1	φ_2	Y_1	Y_2	Y_3	\bar{Y}	S
1	+1	-1	15	45	139	142	140	140,3	6,67
2	+1	-1	25	45	143	142	138	141	14
3	-1	+1	15	55	149	148	144	147	14
4	+1	+1	25	55	150	152	151	151	2

На рисунку 4.1 наведено графік зміни сил різання в залежності від кута заточування токарного різця для сталі 45.

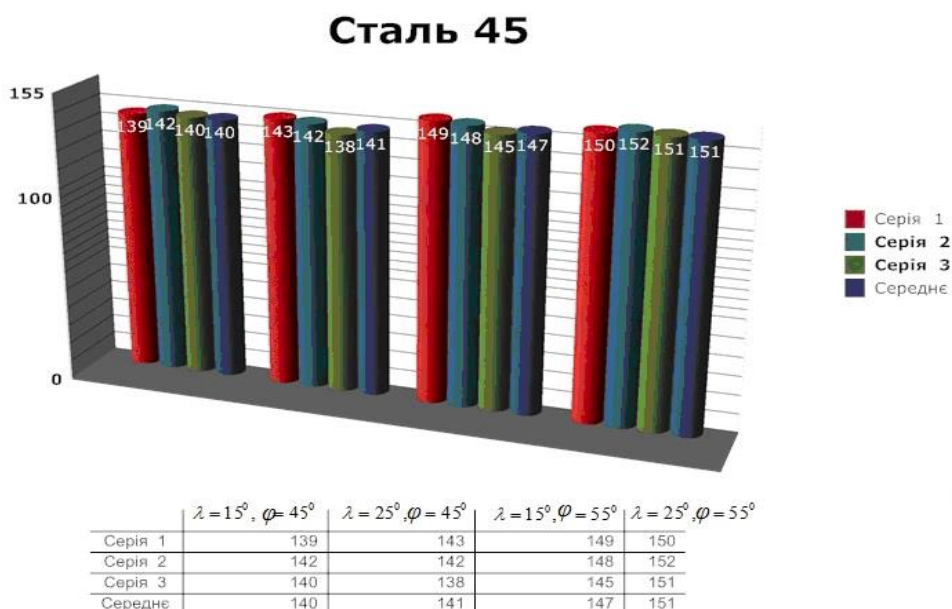


Рисунок 4.1 Графік зміни сил різання в залежності від кута заточування токарного різця для сталі 45

«Розглянемо зміну сил, що впливають на токарний різець при точінні сталі 40X в залежності від зміни кутів заточування токарного різця. Змінними параметрами будуть кут заточування α та кут заточування φ . В таблиці 4.1 наведено змінні величини та їх варіювання. Параметри різання для усіх дослідів будуть сталими: $s = 0,13$ мм/об, $n = 450$ об/хв, $t = 1$ мм»[31].

Таблиця 4.3. – Зведені змінні параметри та результати експерименту для сталі 40X

№ досліду	Матриця		Значення змінних параметрів		Натуральні експериментальні дані			Серед- не	Дис- персія
	α_1	φ_2	α_1	φ_2	Y_1	Y_2	Y_3	\bar{Y}	S
1	+1	-1	15	45	148	147	146	147	2
2	+1	-1	25	45	144	147	149	146,6	3,5
3	-1	+1	15	55	151	154	144	149,6	7,84
4	+1	+1	25	55	150	147	154	150,3	6,16

На рисунку 4.2 наведено графік зміни сил різання в залежності від кута заточування токарного різця для сталі 40X.

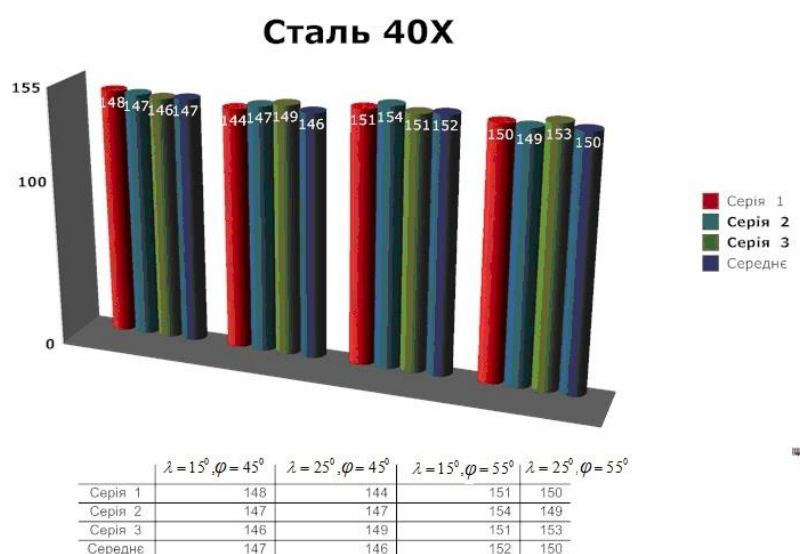


Рисунок 4.2 Графік зміни сил різання в залежності від кута заточування токарного різця для сталі 40X

4.2. Результати досліджень впливу режимів токарної обробки на сили різання при точінні

Визначимо закономірність зміни сил, що діють на токарний різець в залежності від зміни режимів різання для сталі 45. Змінними параметрами режимів різання буде поздовжня подача різця s та кількість обертів шпинделя n . В таблиці 4.4 наведено змінні величини та їх варіювання. Параметри заточування різця будуть сталими: кут $\alpha=15^\circ$, кут $\varphi=45^\circ$, кут $\varphi_1=45^\circ$, $t=1\text{мм}$.

Таблиця 4.4. – Характеристика змінних параметрів

Параметри	s мм/об	n об/хв
Середнє значення	0,12	450
Зміна параметру	0,24	900
Верхнє значення	0,33	1000
Нижнє значення	0,09	100

У таблиці 4.5 наведено зведені змінні параметри та результати досліджень. Для достовірності даних було проведено три досліди.

Таблиця 4.5. – Зведені змінні параметри та результати експерименту для сталі 45

№ досліджу	Матриця		Значення змінних параметрів		Натуральні експериментальні дані			Серед-не	Дис-персія
	s_1	n_2	s_1	n_2	Y_1	Y_2	Y_3	\bar{Y}	S
1	-1	-1	0,09	100	145	147	147	146,3	2,64
2	+1	-1	0,33	100	139	135	138	137,3	8,64
3	-1	+1	0,09	1000	135	135	136	135,3	0,67
4	+1	+1	0,33	1000	150	146	153	149,6	24,64

На рисунку 4.3 наведено графік зміни сил різання в залежності від зміни режимів різання для сталі 45

Сталь 45

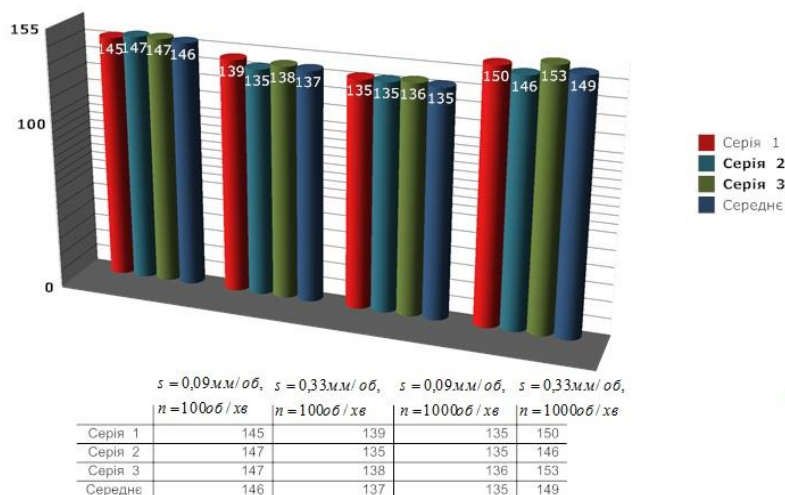


Рисунок 4.3 Графік зміни сил різання в залежності зміни режимів різання для сталі 45

«Визначимо закономірність зміни сил, що діють на токарний різець в залежності від зміни режимів різання для сталі 40Х. Змінними параметрами режимів різання буде поздовжня подача різця s та кількість обертів шпинделя n . В таблиці 4.4 наведено змінні величини та їх варіювання»[31]. У таблиці 4.6 наведено зведені змінні параметри та результати досліджень. Для достовірності даних було проведено три досліди.

Таблиця 4.6. – Зведені змінні параметри та результати експерименту для сталі 40Х

№ досліду	Матриця		Значення змінних параметрів		Натуральні експериментальні дані			Середнє	Дисперсія
	s_1	n_2	s_1	n_2	Y_1	Y_2	Y_3	\bar{Y}	S
1	-1	-1	0,09	100	152	156	156	154,6	10,68
2	+1	-1	0,33	100	145	146	143	144,6	4,68
3	-1	+1	0,09	1000	135	135	138	136	6
4	+1	+1	0,33	1000	147	146	144	145,6	4,68

На рисунку 4.4 наведено графік зміни сил різання в залежності від зміни режимів різання для сталі 40Х

Сталь 40X

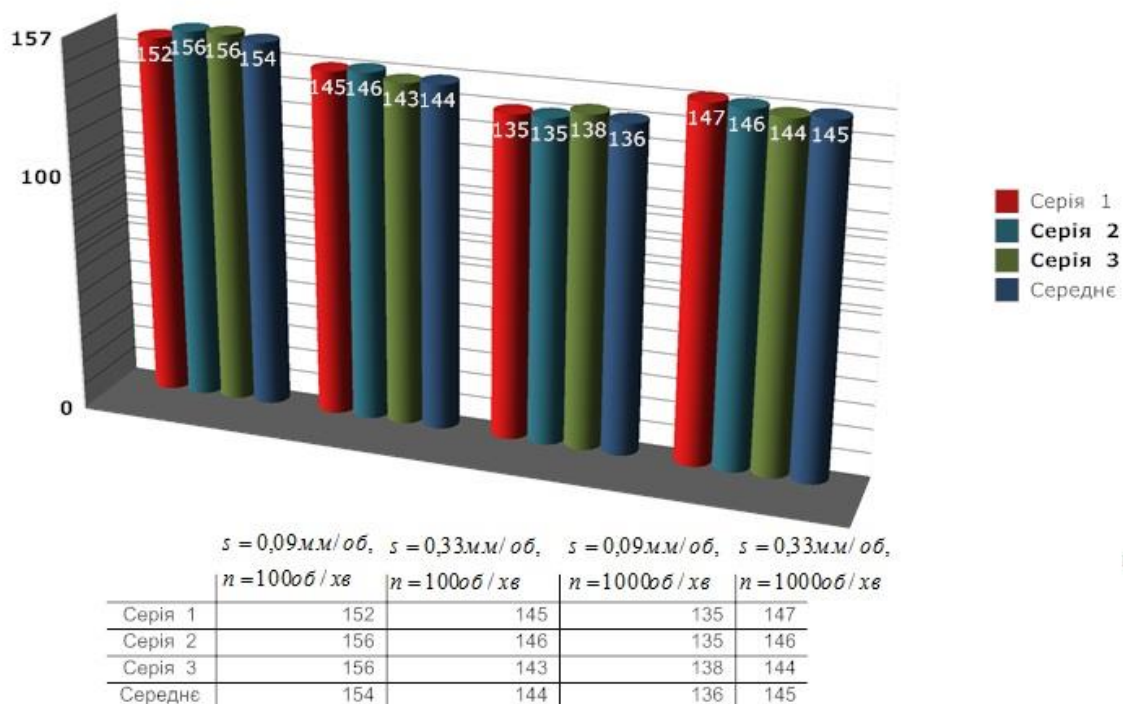


Рисунок 4.4 Графік зміни сил різання в залежності зміни режимів різання для сталі 40X

4.3. Оцінка результатів дослідження методом скінченних елементів

«Виконувані операції різання можна описати як стабільні процеси і відповідне емпіричне представлення теоретичного підґрунтя, поясненого в цьому проекті. Повторення цих операцій з різними характеристиками може забезпечити достовірність отриманих результатів. На графічних зображеннях сил різання чітко видно постійне зростання тангенціальної сили різання безпосередньо пов'язане зі збільшенням кількості матеріалу, що знімається при кожному різанні. Ця залежність, як пояснює модель навантаження, є основною причиною зростання всіх сил різання» [31].

Однак, як видно при процесі різання, зі збільшенням глибини різання сила різання зростає. Ця особливість призводить до того, що складніше передбачити зміну сили різання. На рис. 4.5 пропонується базове представлення напрямку, в якому діють ці сили [31].

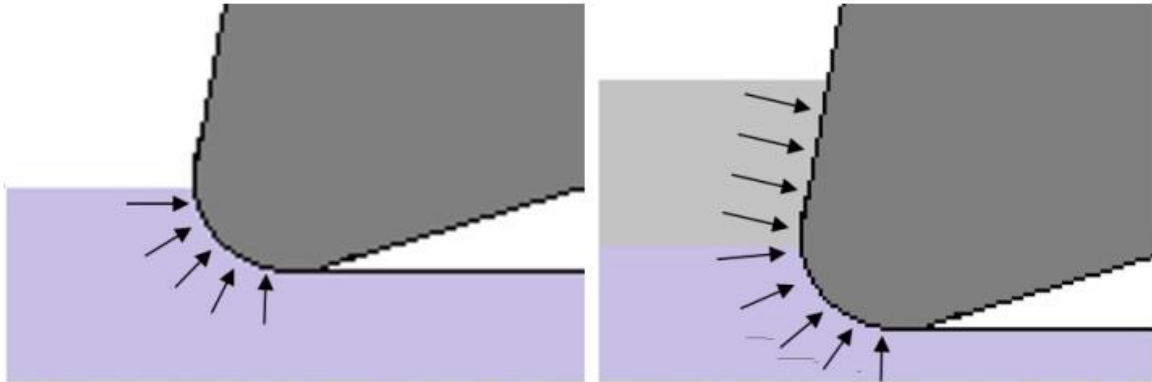


Рисунок 4.5 Відображення напрямку сил, що діють на інструмент при обробці з різною глибиною різання.

У цій точці сила різання і радіальна сила зрівнюються за своїм значенням. Без урахування будь-яких інших параметрів, цей факт буде мати місце при будь-якій конфігурації подачі, швидкості різання або геометрії пластини. З врахуванням цих моментів і при збереженні приросту глибини різання при виконанні операцій різання, подача і радіальна сила будуть явно відрізнятися. Сила тяги підтримує свій приріст за рахунок частини матеріалу, що знімається, але радіальна сила різко змінюється.

«Цей перерозподіл сил призводить до стабілізації сил, направлених в радіальному напрямку. Така ситуація обумовлена перерозподілом сил, що виникають в інструменті в залежності від сторони кута різання (ψ), сили будуть створювати невеликий ефект штовхання інструменту в протилежному радіальному напрямку. Однак, як було доведено, цей ефект є ідеальною моделлю, яка не є досконало представленою в реальних операціях різання, але все ж таки призводить до вирівнювання цих сил. Цей ефект призводить до стабілізації радіальних сил різання»[31].

4.4. Співвідношення між розрахунковими та вимірними радіальними силами

У цьому пункті наведено порівняння прогнозованих сил різання, розрахованих за допомогою створеної програми MATLAB та зусиллями, вимірними під час експериментальних випробувань. Зокрема, сила, що досліджувалась і буде детально розглянута, - це радіальна сила (F_r), - сила, яка

може спровокувати вібрації і можливий прогин, що призведе до погіршення якості заготовки.

«Представлено графічне зображення прогнозованої радіальної сили та вимірної радіальної сили для кожної умови. Параметри, які необхідно враховувати перед запуском програми є бічний кут різальної кромки, радіус носової частини пластини і швидкість подачі. Представлено чотири різні ситуації: використовувалися два різних інструменти і кожна експериментальна послідовність різання була виконана з двома різними швидкостями подачі»[32].

Спочатку представлено графічну залежність між вимірними і прогнозованими зусиллями для різця з різною заточкою кутів, таблиця 4.1. На першому рисунку показано графічне представлення цієї залежності для швидкості подачі 0,1 мм/об, а другий - для 0,2 мм/об.

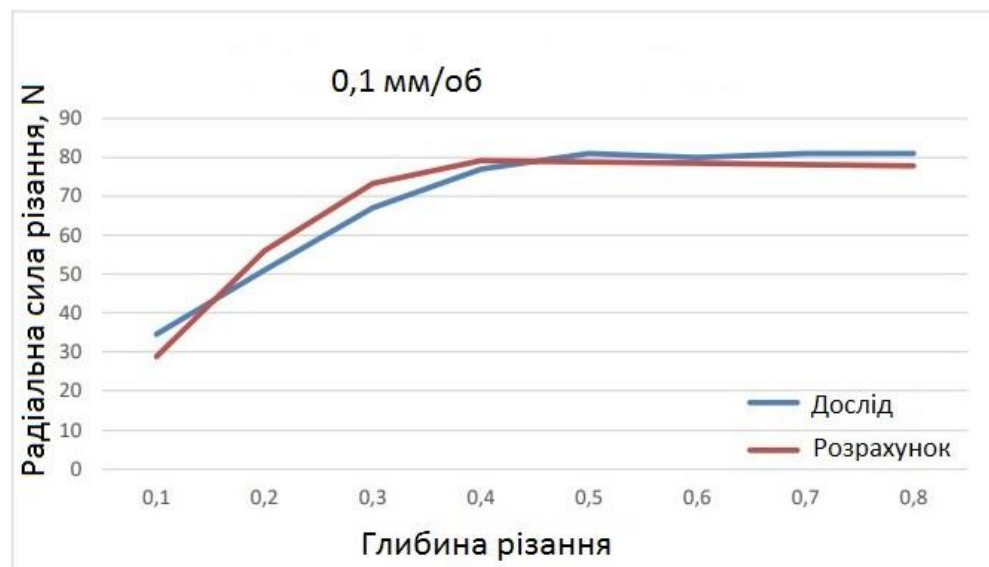


Рисунок 4.6 Прогнозовані та вимірні радіальні зусилля у пластині для обробки зі швидкістю подачі 0,1 мм/об

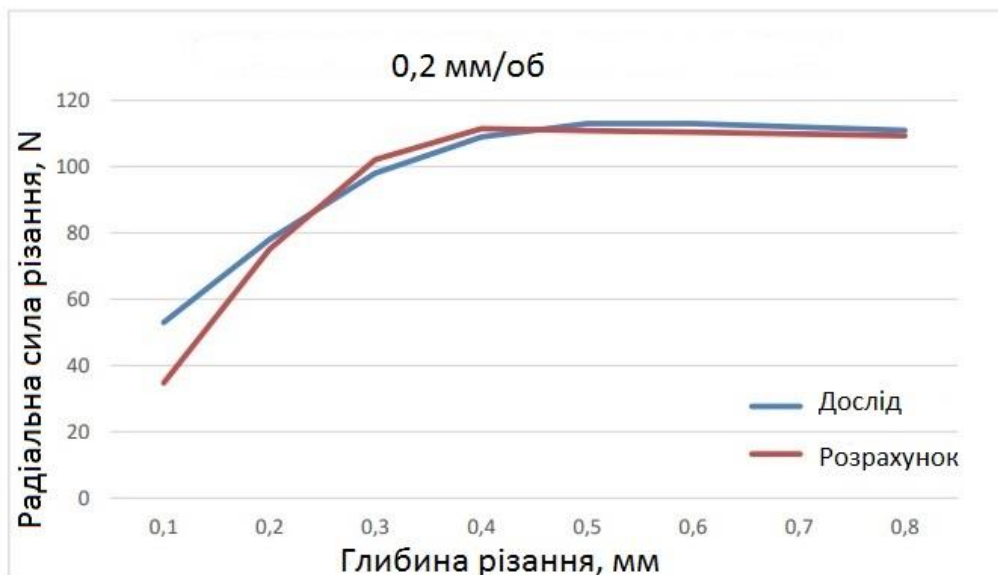


Рисунок 4.7 Прогнозовані та виміряні радіальні зусилля у пластині для обробки зі швидкістю подачі 0,2 мм/об

Обидва розрахункові значення сил відповідають кривим, побудованим на основі вимірних значень, взятих з експериментальних значень. Але є деякі моменти, про які слід згадати, щоб зрозуміти повністю співвідношення, представлене на цих графіках. Перш за все, слід зазначити, що в момент коли зростаюча глибина різання досягає значення радіусу округлення інструменту, є моментом найбільшої невизначеності, що означає, що виміряні значення можуть мати великі розбіжності між собою.

«Одним з найбільш важливих фактів, який це демонструється на графічному зображенні, є те, що в точці, де зростаюча глибина різання обганяє радіус округлення інструменту, прогнозована і виміряна криві досягають схожого значення. Після цієї точки з'являються чіткі відмінності. Створена модель представляє ідеальну ситуацію і показує зменшення радіальних сил, а з іншого боку, виміряні результати показують, що ці сили стабілізуються, але не мають спадаючої тенденції» [32].

Цей факт вже пояснювався, і він пов'язаний з різницею між ідеальним прогнозованим ефективним кутом заточування і реальним кутом, який виникає під дією сили тертя. Ця варіація ефективного кута заточування також генерує різницю між виміряною і прогнозованою силою коли глибина різання невелика.

4.5. Параметрична оптимізація параметрів обробки

Під час параметричної оптимізації параметрів різання зазвичай вирішується одне з таких техніко-економічних завдань, що забезпечують: мінімум витрат, пов'язаних із процесом обробки (характерна для умов обробки на універсальних верстатах у серійному виробництві); максимум продуктивності (характерна для лімітуючих позицій верстатних систем); мінімум витрат при заданій продуктивності (характерна для умов обробки на верстатах і автоматичних лініях у масовому виробництві).

«В основі вирішення всіх описаних оптимізаційних задач лежить модель процесу різання, яка відображає залежність стійкості різального інструменту від параметрів режиму обробки. Як приклад параметричної оптимізації режимів різання розглянемо таку задачу. Визначити оптимальні режими різання (частоту n , подачу S) для чистової токарної обробки за критерієм максимальної продуктивності та заданої якості поверхні (мінімуму основного часу T_o). Для знаходження оптимальних режимів різання необхідно створити модель оптимізації процесу різання»[33].

Цільова функція (критерій оптимальності)

Мінімум основного часу T_o .

$$\min T_o = L_{px} / (n \cdot S) \quad (4.1)$$

де L_{px} – довжина робочого ходу. Оскільки під час оптимізації довжина робочого ходу не змінюється, то зручніше використовувати таку цільову функцію:

$$\max F = \max n \cdot S \quad (4.2)$$

«Матимемо обмеження за стійкістю різального інструменту. Під час обробки стійкість різального інструменту не повинна бути меншою за нормативну стійкість T_H . Швидкість різання V залежить від стійкості різального інструменту »[34]:

$$v = \frac{C_v K_v}{T_H^m T^{xv} S^{yv}} \quad (4.3)$$

« де t – глибина різання, мм;

T_H – нормативна стійкість ріжучого інструменту, хв.»[33]

Решта величин - коефіцієнти для розрахунку швидкості різання: C_V – емпіричний параметр, постійний для групи оброблюваних матеріалів; K_v – коефіцієнт, що залежить від властивостей оброблюваного матеріалу і матеріалу інструменту, а також інших умов різання. Швидкість різання пов'язана з частотою обертання заготовки таким виразом [5]:

$$v = \frac{\pi D n}{1000} \quad (4.4)$$

«де D – діаметр обробки, мм.

Виходячи з цього, після перетворень отримаємо такий вираз» [35]:

$$W_T = \frac{1000 \cdot C_v \cdot K_v}{\pi \cdot T_H^m \cdot t^{xv} \cdot D} \quad (4.5)$$

За шорсткістю обробленої поверхні, яка під час точіння визначається в основному подачею. Виходячи з умови, що подача S на операції не повинна перевищувати граничну подачу, отримаємо обмеження щодо шорсткості [36]:

$$S \leq \frac{C_H R_z^y r^u}{t^v \phi^z \phi_1^z} \quad (4.6)$$

«де C_H – коефіцієнт що характеризує нормативні умови різання;

r – радіус при вершині різця;

R_z – шорсткість поверхні;

ϕ, ϕ_1 – відповідно головний і допоміжний кути в плані.

Обмеженнями режимів різання за необхідною точності є пружні деформації елементів технологічної системи під дією сил різання. У загальному випадку модель обмеження за пружною деформації має вигляд »[36]:

$$\Delta_{don} = \frac{P_y}{j} \quad (4.7)$$

«де Δ_{don} - Допустима пружна деформація по осі Y;

j – жорсткість технологічної системи;

P_y – сила різання, яка визначається за відомою з теорії різання формулою (для точіння і розточування).

За жорсткістю інструменту, оскільки через прогин різця під дією сил різання знижується точність обробки.

Кінематичні обмеження, зумовлені технічними можливостями верстата:

за частотою обертання шпинделя »[36]:

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}$$

За подачею супорта:

$$s_{\min} \leq s \leq s_{\max}$$

Цільова функція і система обмежень є нелінійними. Для розв'язання такої задачі необхідно застосовувати методи нелінійного програмування. Однак вигляд цільової функції й обмежень дає змогу суттєво спростити метод розв'язання. У логарифмічних координатах цільова функція й обмеження стають лінійними [7]:

$$ns_y \leq 1000C_v K_v / \pi D T^m t^k; \quad (4.8)$$

$$n^k s^k = F_{onm} r^k (\pi D / 1000)^k / k_0 (90 + \gamma)^k; \quad (4.9)$$

$$n^k s^k \leq 1000^n \Theta_{don} / C_t t^x (\pi D)^z; \quad (4.10)$$

$$n_{\min} \leq n, n \leq n_{\max}, s_{\min} \leq s, s \leq s_{\max}.$$

(4.11)

«де D – діаметр деталі що обробляється;

c_v, k_v – коефіцієнти і x_v, y_v ;

m – значення, які показують вплив глибини різання t , подачі s і період стійкості інструменту t та швидкість різання v ;

k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 – коефіцієнти та значення, які показуються ступінь наскільки впливає подача s , передній кут, радіусу вершини r а також момент ν на потужність при різанні;

c_t – не змінне значення;

$x_t, y_t, z_{t<}, z_t$ – коефіцієнти, які показують степінь впливу глибини різання t , подачі s і швидкості різання v на потужність різання;

$n_{\min}, n_{\max}, s_{\min}, s_{\max}$ – максимально допустимі параметри різання, що визначені кінематикою верстату»[33].

Після такого перетворення система обмежень разом із цільовою функцією являє собою формулювання задачі лінійного програмування, розв'язання якої значно простіше. Оптимальні режими різання зазвичай знаходяться на ЕОМ чисельними методами [36],

$$\left\{ \begin{array}{l} X1 + y_v X2 \leq b_1, \\ k_3 X1 + k_2 X2 \leq b_2, \\ n_t X1 + y_t X2 \leq b_5, \\ X1 \geq b_6, X1 \leq b_7, \\ X2 \geq b_8, X2 \leq b_9, \\ (X1 + X2) \rightarrow \max \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} b_1 = \ln(1000 C_v K_v / \pi D T^m t^x) \\ b_2 = \ln(F_{\text{дон}} r^k (\pi D / 1000)^k / k_0 (90 + \gamma)^k) \\ b_3 = \ln(1000^z \Theta_{\text{дон}} / C_t t^x (\pi D)^z) \\ b_4 = \ln(n_{\min}), b_5 = \ln(n_{\max}) \\ b_6 = \ln(s_{\min}), b_7 = \ln(s_{\max}) \\ X1 = \ln n; X2 = \ln s. \end{array} \right. \quad (4.12)$$

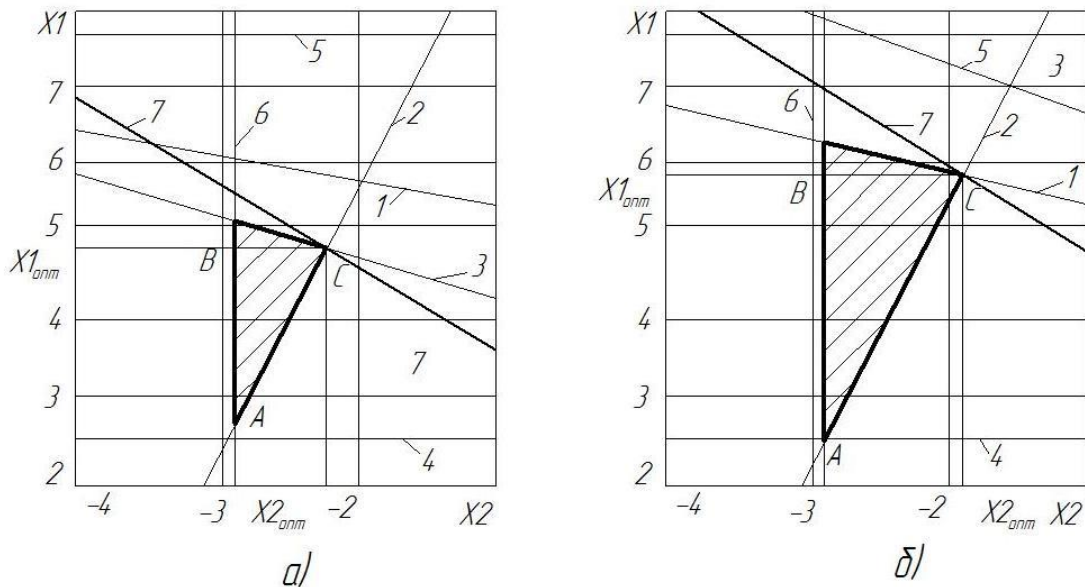


Рисунок 4.8 Графік для вибору найбільш сприятливих режимів при точінні з урахуванням обмежень щодо якості поверхні та сили різання

На рисунку 4.8а трикутник ABC показує оптимальні режими виходячи з обмеження щодо якості поверхні. На рисунку 4.8б трикутник ABC показує оптимальні режими виходячи з обмеження щодо потужності різання.

Враховуючи довідникові дані параметрів роботи обладнання обираємо такі режими: $n_{opt} = 315 \text{ об/хв}$; $s_{opt} = 0,15 \text{ мм/об}$.

4.6. Вплив параметрів заточування різця на якість поверхні та силу різання

При токарній обробці шорсткість поверхні є важливим критерієм для більшості деталей. З точки зору якості, серед багатьох важливим фактором є геометрія обробленої поверхні. Шорсткість поверхні визначається як варіації висоти зубців на обробленій поверхні і зазвичай вимірюється в мікронах. Шорсткість поверхні використовується для характеристики якості поверхні.. Під час обробки різанням, такі параметри як швидкість різання, швидкість подачі, заточка і вид інструменту мають найбільший вплив на кінцеву шорсткість поверхні. Коефіцієнт шорсткості буде зростати, якщо ці параметри підібрані неправильно.

«Якість поверхонь є поширеним дефектом в деталях після механічної обробки. Під час виробництва можуть виникати незначні відмінності в текстурі

поверхні. Середні результати були використані в якості представлення шорсткості обробленої поверхні (R_a). На рисунках (4.9, 4.10) показано, що середня шорсткість поверхні збільшується зі збільшенням подачі при постійній швидкості різання. Найкраще значення R_a вимірюється в оброблюваних поверхнях при наступних умовах різання: подача = 0,72 мм/об, глибина різання = 0,5 мм і швидкість різання 175,92 м/хв. Оптимальний параметр заточки інструменту в плані φ становить 45° , до 55° »[34].

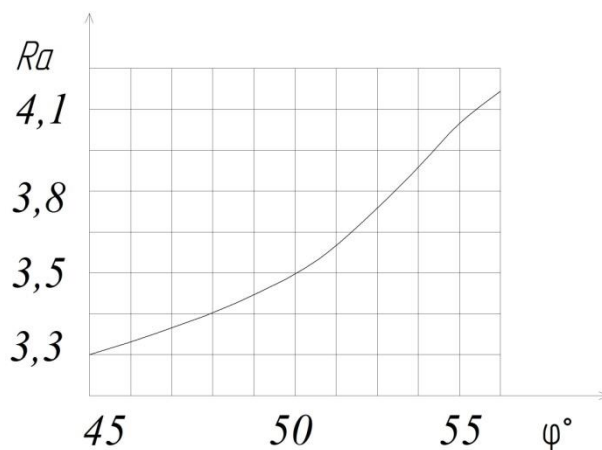


Рисунок 4.9 Залежність параметрів заточування різця та якості деталі для сталі 45

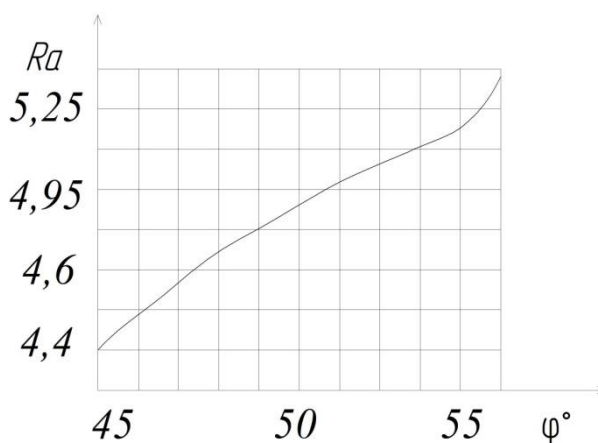


Рисунок 4.10 Залежність параметрів заточування різця та якості деталі для сталі 40X

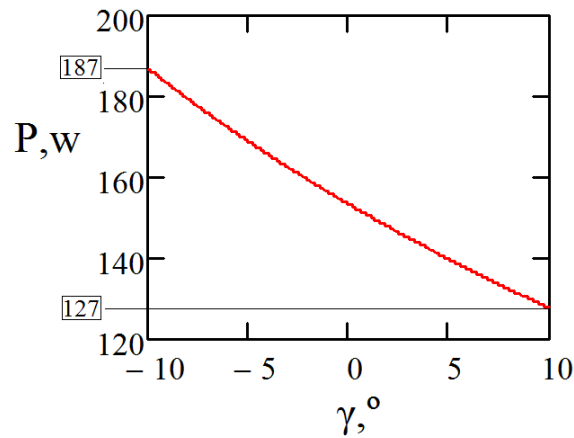


Рисунок 4.11 Залежність потужності необхідної для різання від параметрів заточування інструменту

Висновки. У даному розділі було вивчено вплив геометрії ріжучого інструменту та режимів різання на силу різання при токарній обробці сталі 45 та сталі 40Х. Встановлено, що найменша сила різання, 141 кгс/см^2 для сталі 45 буде при заточці інструменту з параметрами, кут в плані $\alpha - 25^\circ$ кут в плані $\varphi - 45^\circ$. Найбільша сила різання, 151 кгс/см^2 , буде при заточці інструменту з параметрами, кут в плані $\alpha - 25^\circ$ кут в плані $\varphi - 45^\circ$. Для сталі 40Х найменша сила різання, 146 кгс/см^2 досягається при заточці інструменту з параметрами, кут в плані $\alpha - 25^\circ$ кут в плані $\varphi - 45^\circ$.

Найбільша сила різання, 155 кгс/см^2 , буде при заточці інструменту з параметрами, кут в плані $\alpha - 25^\circ$ кут в плані $\varphi - 45^\circ$. Вплив режимів різання та силу різання показав такі результати: для сталі 45 та сталі 40Х найменша сила різання, 136 кгс/см^2 , досягається при подачі швидкості подачі $0,09 \text{ мм/об}$ та швидкості обертання шпинделя 1000 об/хв . Дослідження якості поверхні показали, що зі збільшенням кута в плані φ до 55° шорсткість поверхні Ra збільшується.

ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної роботи магістра проведено аналіз науково-практичних закономірностей процесу різання матеріалу та впливу геометричних параметрів інструменту на процес різання під час точіння. Визначено основні параметри інструменту, які найбільше впливають на якість поверхні.

Проведено аналіз новітніх методів визначення сил різання, що діють на інструмент під час різання, визначено недоліки та переваги кожного методу. Експериментальна лабораторія для вимірювання сил різання під час точіння була вдосконалена шляхом модифікації конструкції для одночасного вимірювання трьох компонентів сил різання під час точіння.

Експериментально визначено вплив геометрії різального інструменту на силу різання під час точіння сталі 45 та сталі 40Х. Визначено оптимальні параметри заточування інструменту для забезпечення мінімальних зусиль різання.

Надано рекомендації щодо вибору режиму різання, який забезпечує найбільш економічні результати з точки зору мінімізації продуктивності процесу обробки та забезпечення якості поверхні.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Андронов, О. Ю. Підвищення надійності збірних твёрдосплавних різців важких токарних верстатів [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.03.01 / Андронов Олександр Юрійович; Національний технічний університет України "Київський Політехнічний Інститут". – НТУ«КПІ», 2010. – 26 с.
2. Priyadarshini, Amrita. Influence of the Johnson Cook Material Model Parameters and Friction Models on Simulation of Orthogonal cutting process [Text] / Amrita Priyadarshini, Suriya K. Pal, Arun K. Samantaray // Journal of Machining and Forming. – Technologies Indian Institute of Technology, Kharagpur, 2012. – № 4.1\2 – P. 59 – 83.
3. Ozel, Tugrul. Finite element simulation of high speed machining Ti-6Al-4V alloy using modified material models [Text] / Tugrul Ozel and Mohammad Sima // Transactions of NAMRI/SME Manufacturing Automation Research Laboratory Department of Industrial and Systems Engineering. – Rutgers University, 2010. – Volume 38. – P. 49 – 56.
4. Duarte, Fabian. Arbitrary Lagrangian- Eulerian method for Navier-Stokes equations with moving boundaries [Text] / Fabian Duarte, Raul Gormaz, Srinivasan Natesan // Computer Methods in Applied Mechanics Engineering. – 2004. – № 193. – P. 4819-4836.
5. Akarca, S. S. A Smoothed-Particle Hydrodynamics (SPH) Model for Machining of 1100 Aluminium [Text] / S.S.Akarca, W.J.Altenhof, A. T.Alpas // 10-th International LS-DYNA Users Conference Metal Forming. – Detroit, 2004. – P. 12-1 – 12-8.
6. Залого, В. О. Скінченноеlementна модель процесу різання. Підтвердження її адекватності експерименту [Текст] / В.О.Залого, Д.В.Криворучко, С.С. Некрасов // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: збірник наукових праць. – Вип. 5. – Житомир : ЖІТІ, 2007. – С. 60- 72.

7. Бучинський М. Я., Горик О. В., Чернявський А. М., Яхін С. В. Основи творення машин / [За редакцією О. В. Горика, доктора технічних наук, професора, заслуженого працівника народної освіти України]. — Харків : Вид-во «НТМТ», 2017. — 448 с.

8. Branca, T.A.; Colla, V.; Algermissen, D.; Granbom, H.; Martini, U.; Morillon, A.; Pietruck, R.; Rosendahl, S. Reuse and recycling of byproducts in the steel sector: Recent achievements paving the way to circular economy and industrial symbiosis in Europe. *Metals* 2020, 10, 345.

8. Дзюра В.О. Наукові основи забезпечення параметрів якості робочих поверхонь деталей машин у вигляді тіл обертання. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 «Технологія машинобудування» (з технічних наук). Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2021. 413 с.

9. Теорія різання [Електронний ресурс]: Підручник для студентів спеціальності 131 – Прикладна механіка / О. В. Глоба, В. В. Вовк, Д. А. Красновид, В. І. Солодкий. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 248 с..

10. Wan, M.; Yin, W.; Zhang, W.H. Study on the correction of cutting force measurement with table dynamometer. *Procedia CIRP* 2016, 56, 119–123.

11. Власенко А. М. Матеріалознавство та технологія металів : підручник для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти / А.М.Власенко. – Київ : Літера ЛТД, 2019. – 224 с.

12. Говорун Т.П., Гапонова О.П., Марченко С.В. Матеріалознавство та технологія матеріалів (у схемах і завданнях): навч. посіб. Суми: СумДУ, 2020. 163 с.

13. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів. Модуль №1 «Матеріалознавство»: методичні рекомендації до виконання практичних та самостійних робіт для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Молодший бакалавр» початкового рівня (короткий цикл) спеціальності 208 «Агроінженерія» денної форми навчання. / П.М. Полянський, Г.О. Іванов,

С.М. Степанов, О.В. Баранова. Миколаїв : МНАУ, 2021. 60 с.

14. Пахаренко В.Л., Марчук М.М., Пахаренко О.В. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство (обробка металів різанням): Рівне : 2018. 252 с.

15. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Технологічні основи машинобудування» для студентів всіх форм навчання / Укл.: О.В. Алексеєнко, Г.В. Пухальська. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. 62 с.

16. Войтенко, П. І., Одосій З.М. Технологія машинобудування : практикум. Ч. 1. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2019. 63 с.

17. Войтенко, П. І., Одосій З.М. Технологія машинобудування : практикум. Ч. 2. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2019. 51 с.

18. Одосій З.М., Панчук В.Г., Войтенко П.І., Копей В.Б. Технологія машинобудування : лабораторний практикум. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2019. 90 с.

19. Лапач С.М. Теорія планування експериментів: Виконання розрахунково-графічної роботи: навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Технологія машинобудування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 86 с.

20. Білушак Г. І., Чабанюк Я. М. Теорія ймовірностей і математична статистика. Практикум. – Львів, 2001. – 418 с.

21. J.D. Kim, D.S. Kim, Development of a combined-type tool dynamometer with a piezo-film accelerometer for an ultraprecision lathe, J. Mater. Process. Tech. 71 (1997) 360–366

22. S.K. Birla, Sensors for adaptive control and machine diagnostics, Proc. Mach. Tool Task Force Conf., vol. 4, 1980, pp. 7–12.

23. S.E. Oraby, Mathematical modelling and in-process monitoring techniques for cutting tools, University of Sheffield, Ph.D. Thesis, 2000.

24. U. Seker, A. Kurt, I. C, iftc,i, Design and construction of a dynamometer for measurement of cutting forces during machining with linear motion, Mater. Design 23 (2002) 355–360.

25. N.H. Cook, E.G. Loewen, M.C. Shaw, Machine-tool dynamometers, Am. Mach. (1954).
26. I. Korkut, A dynamometer design and its construction for milling operation, Mater. Design 24 (2003) 631–637.
27. S.E. Oraby, D.R. Hayhurst, High-capacity compact-three component cutting force dynamometer, Int. J. Mach. Tools. Manuf. 30 (4) (1990) 549–559
28. K. Hoffmann, The strain gauge, a universal tool of the experimental stress analysis, vd 73004 e, Hottinger Baldwin Messtechnik, Darmstadt, 1973.
29. M.C. Shaw, Metal Cutting Principles, Clarendon Press, Oxford, 2010.
30. Рудь В.Д., Божко Т.Є., Голодюк Р.П., Харчук П.М., Савюк І.В. / Патент на винахід // Тензометричний токарний динамометр. 25.03.2015, Бюл. №6.
31. Rizal, M.; Ghani, J.A.; Nuawi, M.Z.; Haron, C.H.C. Development and Testing of an Integrated Rotating Dynamometer on Tool Holder for Milling Process. Mech. Syst. Signal Process. 2015, 52, 559–576.
32. Теорія різання. Розрахунок режимів різання : практикум / Булига Ю. В., Веселовська Н. Р., Міськов В. П. – Вінниця : ВНТУ, 2019. – 67 с.
33. Korbut E. V. Procesy zuzycia wedlug schematu “narzedzie tnace – stopu tytanu”/ E. V. Korbut, E. Wajs, O. V. Radko, V. F. Labunec, W. W. Zagrebelny // Obrobka metalu, 2015. – № 1. – С. 36–39.
34. Залога В. О. Сучасні інструментальні матеріали у машинобудуванні: навч. посіб. / В. О. Залога, В. Д. Гончаров, О. О. Залога. – Суми: СумДУ, 2013. – 371 с.
35. Методичні вказівки до навчальних практикумів №3 та №4 для студентів заочного відділення спеціальності 131 «Прикладна механіка» (освітня програма «Технології машинобудування») частина друга. /Укл. С.І Дядя, В.М. Паміров, В.М. Томілін – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – с.25.
36. Толбатов Ю. А. Математична статистика та задачі оптимізації в алгоритмах і програмах: навч. посіб. / Ю. А. Толбатов. – К.: Вища школа, 2010. – 399 .