

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Інженерії машин, споруд та технологій

(повна назва факультету)

Інжинірингу машинобудівних технологій

(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розроблення технології виготовлення вала КС6-07.608 з  
дослідженням процесу розточування перервних отворів

Виконав: студент VI курсу, групи МПМ-61  
спеціальності 131 “Прикладна механіка”

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Березіцький О.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Окіпний І.Б.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Ткаченко І.Г.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Окіпний І.Б.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2021

## РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи: “Розроблення технології виготовлення вала КС6-07.608 з дослідженням процесу розточування перервних отворів”.

У кваліфікаційній роботі проведено дослідження динаміки розточування перервних отворів. Розглянуто три основних випадки врізання протилежно розташованих на розточній оправці різців у перервну поверхню отвору заготовки. Виведено систему диференціальних рівнянь, яку розв’язано із використанням прикладного програмного забезпечення, що використовує підпрограму чисельного методу Рунге-Кутта із нульовими початковими координатами. При цьому розв’язок представлено у вигляді числових даних та графіків. Побудовано графіки, де показано залежності величини радіальної деформації розточної оправки в часі для різних випадків обробки.

Представлено результати експериментальних досліджень визначення відхилення від круглості циліндричного сектора перервної поверхні після розточування у заготовках із сталі 45 залежно від зміни трьох основних факторів: подачі одного розточного різця на один оберт оправки, глибини різання розточним різцем та швидкості різання розточним різцем.

Також вдосконалено технологічний процес виготовлення вала КС6-07.608. Проведено розрахунок заготовки, розроблено схеми базування, підібрано інструменти, обладнання, режими різання, спроектовано пристосування.

## ЗМІСТ

<b>Вступ .....</b>	<b>.....</b>
<b>1 Аналітична частина</b>	
1.1. Аналіз стану питання.....	.....
1.2. Службове призначення деталі.....	.....
1.3. Висновки та постановка задач.....	.....
<b>2 Науково-дослідна частина</b>	
2.1. Дослідження динаміки розточування перервних отворів.....	.....
2.2. Результати експериментальних досліджень відхилення від круглості циліндричного сектора перервної поверхні після розточування.....	.....
2.3. Висновки.....	.....
<b>3 Технологічно-конструкторська частина</b>	
3.1. Аналіз технологічності деталі.....	.....
3.2. Вибір способу одержання заготовки.....	.....
3.4. Формування технологічного процесу .....	.....
3.5. Визначення припусків на оброблення.....	.....
3.6. Визначення режимів різання.....	.....
3.7. Розрахунок пристосування.....	.....
<b>4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</b>	
4.1. Розробка заходів конструкторського і організаційного плану для боротьби із шумом.....	.....
4.2. Проведення рятувальних та інших невідкладних робіт на машинобудівному заводі при виникненні аварії.....	.....
Висновки.....	.....
Перелік посилань.....	.....

## ВСТУП

Вібрації інструментів або заготовок в процесі різання є одним із обмежуючих факторів продуктивності та ефективності операції механічної обробки. Оскільки розточна операція є однією із фінішних, вібрація інструменту призводить до погіршення якості обробленої поверхні, зниження стійкості інструменту, виникнення явища автоколивань. Тому режими різання повинні підбиратись так, щоб вдалось уникати нестабільних вібрацій в процесі розточування.

При не правильних конструктивних та технологічних параметрах системи виникає автоколивання і нестабільні вібрації. При цьому амплітуда коливань зростає при кожному переході інструменту під час розточування. Це може тривати до виникнення моменту руйнування різця або заготовки.

При стабільному процесі із вриванням інструменту з початковими коливаннями при декількох наступних обертах заготовки розточна оправка коливається періодично із відносно постійною амплітудою.

Проектування моделей, які симулюють процес розточування із врахуванням вібрації інструмента, дозволяють розуміти вплив режимів різання на процес різання, що надає можливість оператору верстата вибирати оптимальні режими різання для конкретної операції розточування. Прогнозування динаміки розточування також є необхідним при проектуванні верстатів, інструментальних державок та розточних оправок, тому подальші дослідження динамічних моделей розточування отворів є актуальним завданням.

Актуальним є також вдосконалення технологічного процесу виготовлення вала КС6-07.608 із проведенням розрахунків заготовки, розробленням схем базування, підбиранням інструментів, обладнання, режимів різання, проектуванням пристосування.

# 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

## 1.1. Аналіз стану питання

Вібрації інструментів або заготовок в процесі різання є одним із обмежуючих факторів продуктивності та ефективності операції механічної обробки. В процесі розточування отворів гнучкість розточної оправки є вищою за гнучкість заготовки через особливості конструкції. Відповідно розточна оправка характеризується більшими вібраціями. Оскільки розточна операція є однією із фінішних, вібрація інструменту призводить до погіршення якості обробленої поверхні, зниження стійкості інструменту, виникнення явища автоколивань. Тому режими різання повинні підбиратись так, щоб вдалось уникати нестабільних вібрацій в процесі розточування.

Проектування моделей, які симулюють процес розточування із врахуванням вібрації інструмента, дозволяють розуміти вплив режимів різання на процес різання, що надає можливість оператору верстата вибирати оптимальні режими різання для конкретної операції розточування. Прогнозування динаміки розточування також є необхідним при проектуванні верстатів, інструментальних державок та розточних оправок.

Значна кількість досліджень проведена щодо стабільності процесу розточування і їх можна розділити на дві основні групи. До першої групи відносяться інновації щодо підвищення ефективності розточування за рахунок використання пасивного, напівактивного та активного контролю без подальших досліджень впливу конструктивних та технологічних параметрів на процес розточування. Приклади таких інновацій включають використання розточних оправок з високим коефіцієнтами демпфування, виготовлених із вуглецевого волокна та епоксидної смоли [22], застосування пристроїв, які можна налаштовувати для поглинання вібрацій оправки [25], використання електрореологічних рідин для контролю жорсткості розточної оправки з метою уникнення явища автоколивання [26].

До другої групи відносяться дослідження, що намагаються прогнозувати перебіг процесу розточування у певній області режимів різання. У роботах [27], [31], [32] представлено прості співвідношення для визначення сил різання під час проточування і розточування із застосуванням емпіричних коефіцієнтів. При цьому прийнято процес різання як ортогональний без врахування нахилу ріжучої кромки інструмента. У роботі [28] запропоновано модель симуляції механіки процесу розточування із застосуванням геометричного підходу використання *B*-сплайн кривих.

В процесі розточування отворів можна виділити три основних групи коливань елементів технологічної системи [29]:

1. Вільні коливання, що виникають при врзанні різця у заготовку, або прискореними переміщеннями елементів верстата. Такі коливання поступово згасають.

2. Примусові коливання виникають під час прикладання періодичних сил до конструктивних елементів верстата. Основним джерелами таких коливань є врзання розточної оправки із декількома різцями та радіальне биття вершини розточного різця. Також такі коливання можуть передаватись через фундамент від інших верстатів.

3. Автоколивання є одними із важливих коливань, що впливають на процес різання. При врзанні різця у заготовку він піддається коливанню. Якщо такі режими різання, як глибина різання, подача та швидкість різання є неправильними такі початкові коливання можуть призвести до виникнення автоколивань. При коливанні різця змінюється також товщина стружки, що призводить до зміни величини сили різання. Нова сила різання створює нове відхилення ріжучого інструменту. Відповідно взаємодія між силою різання, відхилення інструмента, товщиною стружки створює замкнуте коло (рис. 1.1). При не правильних конструктивних та технологічних параметрах системи виникає автоколивання і нестабільні вібрації. При цьому амплітуда коливань зростає при кожному переході інструменту під час розточування. Це може тривати до виникнення моменту руйнування різця або заготовки.

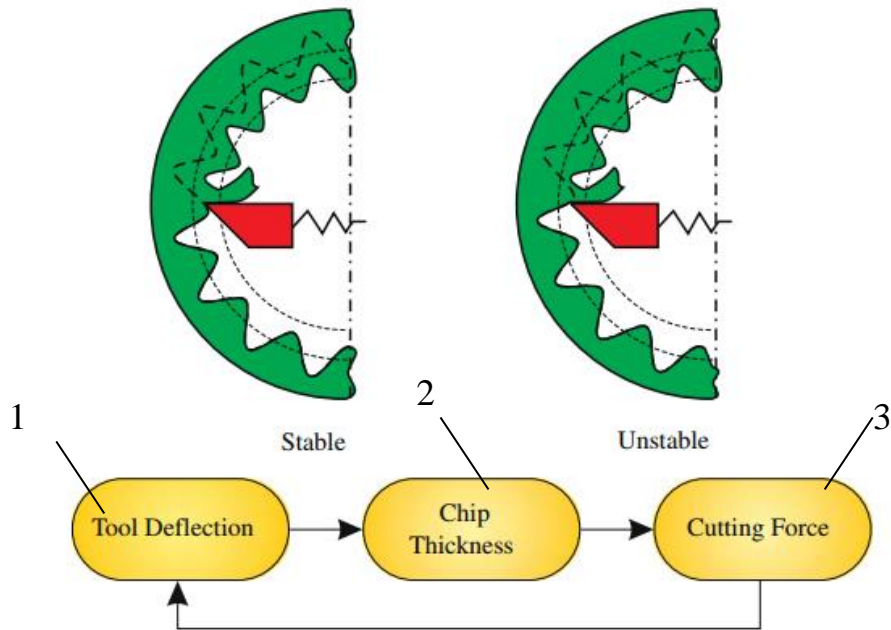


Рисунок 1.1 – Схема механізму виникнення автоколивань в процесі розточування отворів [29]: 1 - відхилення інструмента; 2 – товщина стружки; 3 – сила різання

У роботі [29] для моделювання миттєвого розміщення розточної оправки заготовку розділено на деяку кількість кутових елементів (рис. 2.1).

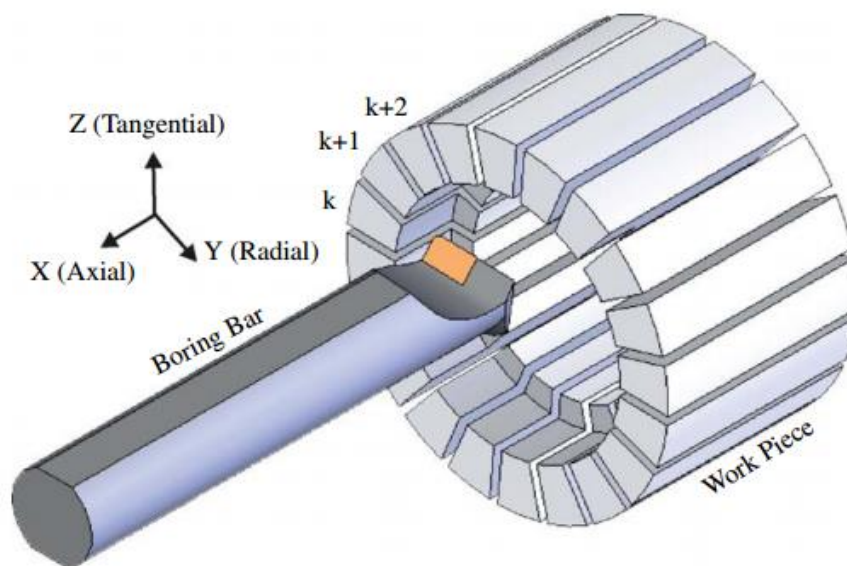


Рисунок 1.2 – Моделювання миттєвого розміщення розточної оправки із розділенням заготовки на кутові елементи [29]

При обертання заготовки із певною швидкістю ріжуча кромка інструмента послідовно врізається у ці кутові елементи. У будь-якому із цих елементів миттєве рівняння ріжучої кромки визначене на основі *B*-сплайн параметричних кривих, приклад якої представлено на рис. 1.3.

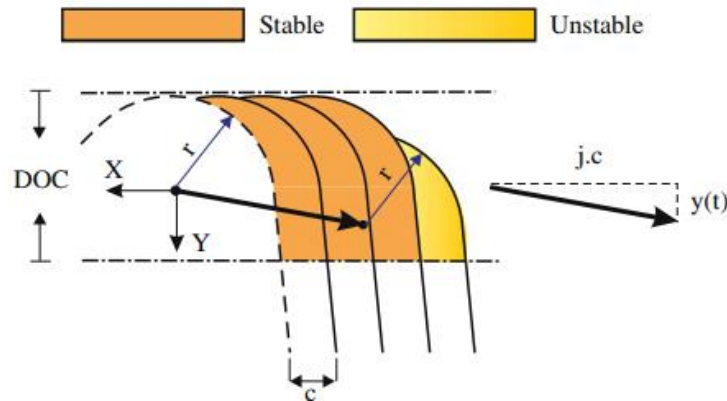


Рисунок 1.3 – Моделювання розміщення ріжучих кромки за допомогою *B*-сплайн параметричних кривих [29]

В результаті моделювання одержано графіки залежностей проекцій сили різання для стабільного та нестабільного (із виникненням автоколивань) процесів (рис. 1.4). При стабільному процесі із врізанням інструменту з початковими коливаннями при декількох наступних обертах заготовки розточна оправка коливається періодично із відносно постійною амплітудою. При не стабільному процесі спостерігається поступове зростання амплітуди коливань розточної оправки. При зростанні амплітуди коливань також змінюються кути різання відносно номінальних значень, що значно впливає на силу різання. При моделюванні режими різання були такими: подача – 0,14 мм/об, швидкість різання – 95 м/хв, діаметр розточування – 30,5 мм, глибина різання – 0,5 мм для стабільного процесу і 4 мм для нестабільного процесу.

У роботі [30] представлено динамічну модель процесу розточування перервної поверхні на основі використання диференціальних рівнянь руху приведеної системи з узагальненими координатами. Еквівалентну механічну систему представлено на рис. 1.5.



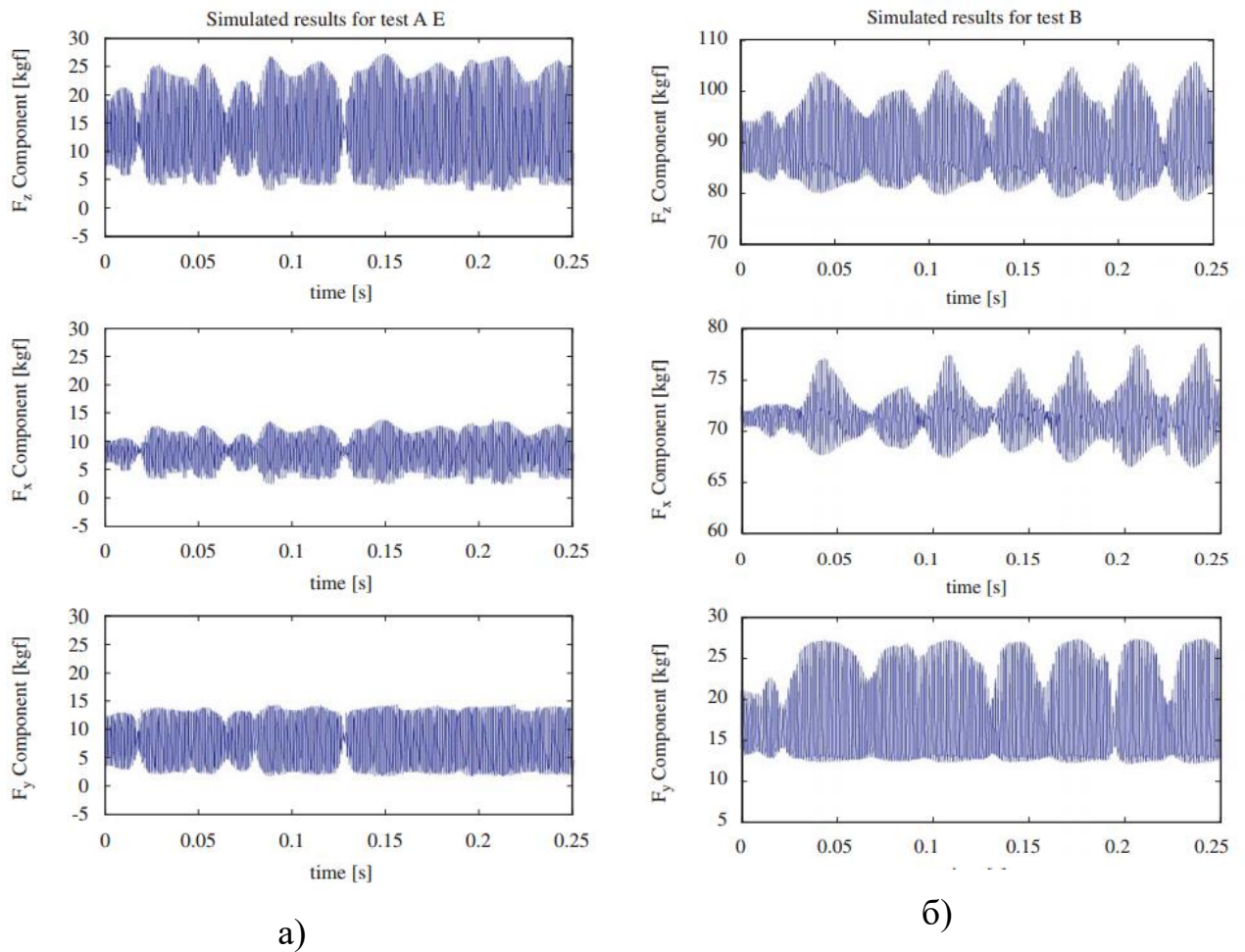


Рисунок 1.4 – Графіки моделювання залежностей проєкцій сили різання для стабільного а) та нестабільного б) процесів розточування [29]

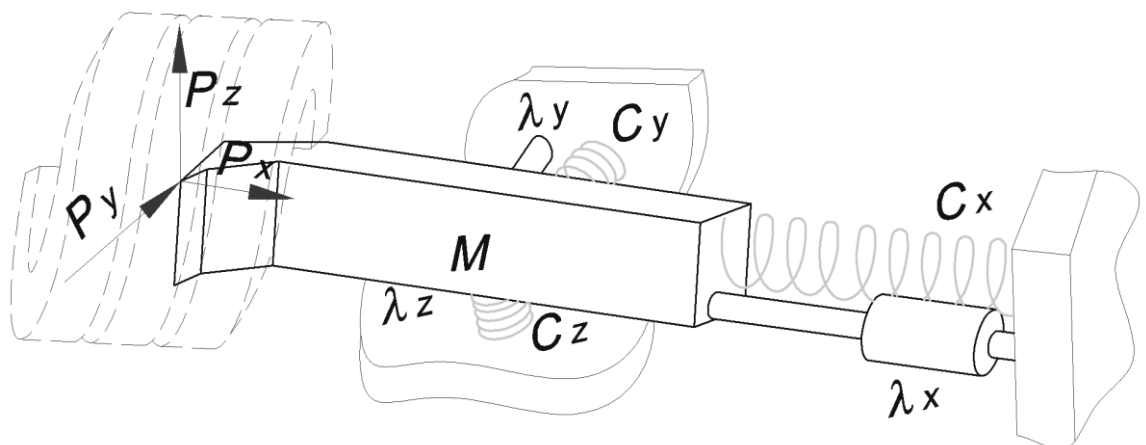


Рисунок 1.5 – Еквівалентна механічна система моделювання процесу розточування перервної поверхні [30]

При розточуванні переміщення елементів еквівалентної багатомасової системи представлено системою диференціальних рівнянь [30]:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \delta_x}{dt^2} m + \lambda_x \frac{d\delta_x}{dt} + c_x \delta_x = P_x; \\ \frac{d^2 \delta_y}{dt^2} m + \lambda_y \frac{d\delta_y}{dt} + c_y \delta_y = P_y; \\ \frac{d^2 \delta_z}{dt^2} m + \lambda_z \frac{d\delta_z}{dt} + c_z \delta_z = P_z. \end{cases} \quad (1.1)$$

При розв'язку системи диференціальних рівнянь (1.1) глибина різання розглядалась як змінний параметр для кожного із етапів різання [30]:

$$t_Y = \begin{cases} t_0 \left( \frac{x}{l_1} \right), & 0 < x < l_1, \text{ (врізання)} \\ t_0, & l_1 \leq x \leq l_2, \\ t_0 \left( 1 - \frac{x - l_2}{l - l_2} \right), & l_2 < x < l, \text{ (вихід)} \\ 0, & x \leq 0 \text{ або } x \geq l. \end{cases} \quad (1.2)$$

В результаті теоретичних досліджень побудовано графіки зміни тангенціальної та радіальної складових сили різання в часі при розточуванні перервного отвору (рис. 1.6).

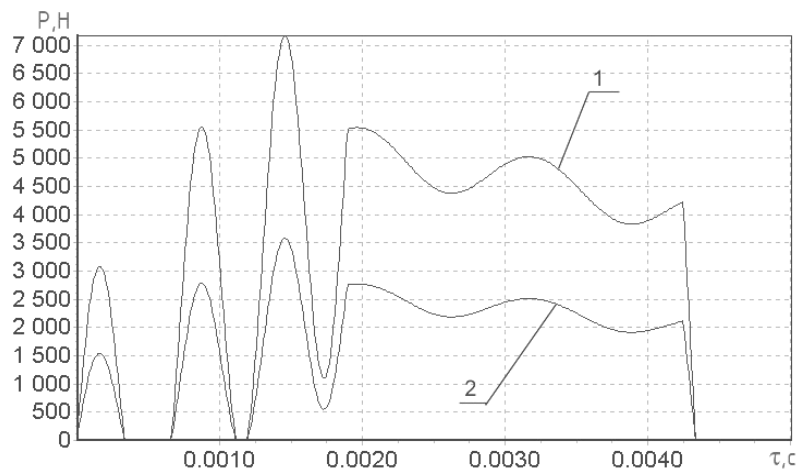


Рисунок 1.6 – Графіки зміни тангенціальної та радіальної складових сили різання в часі при розточуванні перервного отвору [30]

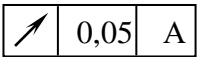
## 1.2. Службове призначення деталі

Деталь “Вал” КС6-07.608 входить у конструкцію редуктора, що використовується для передачі обертового руху завдяки зубчастим зачепленням. Зубчасті колеса кріпляться сегментними шпонками на поверхнях  $\varnothing 28d11_{(-0,195)}$ ;  $\varnothing 14h11_{(-0,11)}$  даної деталі. Виготовляється із сталі 45-2-б.

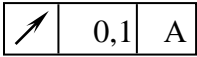
До основних поверхонь деталі віднесено такі поверхні: зовнішні циліндричні поверхні  $\varnothing 30k6^{(+0,015)}$ , Ra 1,25, які забезпечують посадку підшипників кочення; зовнішні циліндричні поверхні  $\varnothing 28d11_{(-0,195)}$  Rz 20;  $\varnothing 14h11_{(-0,11)}$  Rz 20 – призначені для базування зубчастих коліс за допомогою сегментних шпонок, які встановлюються в шпонкові пази  $5P9_{(-0,031)}$  Rz 20;  $3P9_{(-0,031)}$  Rz 20. Зовнішні циліндричні поверхні  $\varnothing 30b12_{(-0,37)}$  Rz 80;  $\varnothing 30h14_{(-0,52)}$  Rz 80 – призначені для базування ущільнень, а також для встановлення компенсаційних втулок та кілець, які забезпечують відповідний осьовий натяг в з’єднаннях.

Результати аналізу технічних вимог до деталі представлено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Аналіз технічних вимог

Позначення поверхні (поверхонь)	Зміст технічної вимоги	Метод виконання	Метод контролю
1	2	3	4
1	Зовнішня циліндрична поверхня $\varnothing 30k6^{(+0,015)}$ ; Ra 1,25 	Чистове шліфування з установкою в центрах	Взірці шорсткості Калібр-скоба ( $\varnothing 30$ ) Індикатор
2, 15	Зовнішня циліндрична поверхня $\varnothing 30b12_{(-0,37)}$ ; Rz 80	Напівчистове точіння	Калібр-скоба ( $\varnothing 30$ )
3	Торцева поверхня $37 \pm 0,3$ Rz 80	Чорнова підрізка торця	Штангенциркуль

Закінчення таблиці 1.1

1	2	3	4
4	Квадрат 21h12 <sub>(-0,21)</sub> Rz 80	Фрезерування однократне	Калібр-скоба (21) Штангенциркуль
5, 16	Фаска зовнішня 1×45°; Rz 80	Точіння однократне	Шаблон фасочний 1×45°
6	Торцева поверхня 17±0,2 Rz 80	Чорнова підрізка торця	Штангенциркуль
7	Зовнішня циліндрична поверхня ∅ 14h11 <sub>(-0,11)</sub> ; Rz 20	Напівчистове точіння	Калібр-скоба (∅14)
8	Фаска зовнішня 0,6×45°; Rz 80	Точіння однократне	Шаблон фасочний 0,6×45°
9, 19	Торцева поверхня 205±0,5 Rz 80	Чорнова підрізка торця або фрезерування	Калібр-скоба (l=205)
10	Шпонковий паз 3P9 <sub>(-0,006/-0,031)</sub> , Rz 20 10,2h12 <sub>(-0,18)</sub> , Rz 40 ∅ 13; R0,16	Фрезерування пазовою фрезою	Глибиномір b=3 мм; t <sub>1</sub> =3,8 мм
20	Шпонковий паз 5P9 <sub>(-0,006/-0,031)</sub> , Rz 20 20h12 <sub>(-0,21)</sub> , Rz 40 ∅ 25; R0,25	Фрезерування пазовою фрезою	Глибиномір спеціальний b=5 мм; t <sub>1</sub> =8 мм
11, 13	Торцева поверхня 85h11 <sub>(-0,22)</sub> , Ra 2,5	Шліфування напівчистове	Калібр-скоба (85) Взірці шорсткості
14	Зовнішня циліндрична поверхня ∅ 30h14 <sub>(-0,52)</sub> ; Rz 80	Однократне точіння	Калібр-скоба (∅30)
12	Зовнішня циліндрична поверхня ∅ 36	Не обробляється	Штангенциркуль
17	Зовнішня циліндрична поверхня ∅ 28d11 <sub>(-0,065/-0,195)</sub> ; Rz 20 	Напівчистове точіння з установкою в центрах	Калібр-скоба (∅28) Індикатор
18	Фаска зовнішня 1,6×45°; Rz 80	Точіння однократне	Шаблон фасочний 1,6×45°

### **1.3. Висновки та постановка задач**

В результаті аналізу літературних джерел встановлено, що вібрації інструментів або заготовок в процесі різання є одним із обмежуючих факторів продуктивності та ефективності операції механічної обробки. Оскільки розточна операція є однією із фінішних, вібрація інструменту призводить до погіршення якості обробленої поверхні, зниження стійкості інструменту, виникнення явища автоколивань. Тому режими різання повинні підбиратись так, щоб вдалось уникати нестабільних вібрацій в процесі розточування.

При не правильних конструктивних та технологічних параметрах системи виникає автоколивання і нестабільні вібрації. При цьому амплітуда коливань зростає при кожному переході інструменту під час розточування. Це може тривати до виникнення моменту руйнування різця або заготовки.

При стабільному процесі із вриванням інструменту з початковими коливаннями при декількох наступних обертах заготовки розточна оправка коливається періодично із відносно постійною амплітудою. При нестабільному процесі спостерігається поступове зростання амплітуди коливань розточної оправки. При зростанні амплітуди коливань також змінюються кути різання відносно номінальних значень, що значно впливає на силу різання.

Проектування моделей, які симулюють процес розточування із врахуванням вібрації інструмента, дозволяють розуміти вплив режимів різання на процес різання, що надає можливість оператору верстата вибирати оптимальні режими різання для конкретної операції розточування. Прогнозування динаміки розточування також є необхідним при проектуванні верстатів, інструментальних державок та розточних оправок, тому подальші дослідження динамічних моделей розточування отворів є актуальним завданням.

У кваліфікаційній роботі потрібно вирішити такі завдання:

1. Провести дослідження динаміки розточування перервних отворів.

2. Розробити схему ідеалізованої системи для дослідження динаміки розточування перервних отворів.

3. Вивести та розв'язати числовим методом систему диференціальних рівнянь, що описують коливання елементів еквівалентної багатомасової системи конструктивних елементів процесу розточування.

4. Провести експериментальні дослідження для визначення відхилення від круглості циліндричного сектора перервної поверхні після розточування у заготовках із сталі 45 залежно від зміни трьох основних факторів: подачі одного розточного різця на один оберт оправки, глибини різання розточним різцем та швидкості різання розточним різцем.

5. Вдосконалити відомий технологічний процес виготовлення вала КС6-07.608.

## 2 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

### 2.1. Дослідження динаміки розточування перервних отворів

В процесі виготовлення або ремонту деталей машин виникає необхідність розточування отворів різноманітної форми, зокрема із перервними поверхнями, що включають різноманітні канавки та поперечні отвори.

Особливість взаємного впливу поверхні перервного отвору та різців на розточній оправці створює передумови дослідження динаміки процесу розточування перервних отворів. Процес розточування перервних отворів характеризується періодичними ударами між різцями розточної оправки та перервною поверхнею отвору в місцях канавок або поперечних отворів. Тому такий процес різання пов'язаний із складними ударними процесами і цей процес можливо дослідити на основі формування динамічної моделі, що забезпечує визначення деформації елементів розробленої дещо ідеалізованої приведеної системи, до складу якої входять такі елементи: розточні різці, розточна оправка, шпиндель верстата, заготовка із попередньо обробленим перервним отвором.

Процес розточування перервних отворів можна віднести до перехідних динамічних процесів. Приведену систему (рис. 2.1), до якої включено розточні різці, розточну оправку, шпиндель верстата, заготовку із попередньо обробленим перервним отвором замінено ідеалізованою механічною моделлю, що складається із зосереджених мас. Такі маси пов'язані пружними зв'язками з постійними в часі коефіцієнтами жорсткості.

На рисунку 2.1 зображено маси елементів ідеалізованої системи для дослідження динаміки розточування перервних отворів:  $I_3$  – момент інерції розточної оправки;  $I_4$  – приведений момент інерції заготовки із попередньо обробленим перервним отвором;  $I_5$  – момент інерції шпинделя верстата;  $m_1$  – маса першого розточного різця;  $m_2$  – маса другого розточного різця;  $m_3$  – маса розточної оправки.





жорсткості першого розточного різця у напрямках осей  $x$  та  $y$  відповідно;  $k_{32x}$ ,  $k_{32y}$  - приведені лінійні жорсткості другого розточного різця у напрямках осей  $x$  та  $y$  відповідно.

Також на рисунку 2.1 відображено приведені коефіцієнти демпфування:  $\beta_{35}$  - коефіцієнт демпфування між розточною оправкою та шпинделем верстата,  $\beta_4$  - коефіцієнт демпфування заготовки із попередньо обробленим перервним отвором, що закріплена у затискному пристрої верстата;  $\beta_{3x}$ ,  $\beta_{3y}$  - коефіцієнти демпфування коливань розточної оправки у напрямках осей  $x$  та  $y$  відповідно;  $\beta_{31x}$ ,  $\beta_{31y}$  - коефіцієнти демпфування коливань першого розточного різця у напрямках осей  $x$  та  $y$  відповідно;  $\beta_{32x}$ ,  $\beta_{32y}$  - коефіцієнти демпфування коливань другого розточного різця у напрямках осей  $x$  та  $y$  відповідно.

На заготовку із попередньо обробленим перервним отвором, що закріплена у затискному пристрої верстата з моментом інерції  $I_4$  в процесі розточування перервного отвору діють тангенціальні сили різання  $P_{x1}(t)$ ,  $P_{x2}(t)$ , радіальні сили різання  $P_{y1}(t)$ ,  $P_{y2}(t)$  та сила ударів  $P_u(t)$  між різцями та заготовкою.

На перший розточний різець із масою  $m_1$  діють тангенціальна сили різання  $P_{x1}(t)$ , радіальна сила різання  $P_{y1}(t)$  та сила удару  $P_u(t)$  в момент зіткнення із перервною поверхнею заготовки.

На другий розточний різець із масою  $m_2$  діють тангенціальна сили різання  $P_{x2}(t)$ , радіальна сила різання  $P_{y2}(t)$  та сила удару  $P_u(t)$  в момент зіткнення із перервною поверхнею заготовки.

Під час періодичного врізання розточного різця у перервну поверхню заготовки зростає глибина різання  $t_p$  а також виникає їх ударна взаємодія, при закінченні різання глибина різання  $t_p$  зменшується до нуля, тому відповідно тангенціальні сили різання  $P_{x1}(t)$ ,  $P_{x2}(t)$  та радіальні сили різання  $P_{y1}(t)$ ,  $P_{y2}(t)$  спочатку зростають до максимального значення, яке деякий час не змінюється, а при закінченні різання зменшуються до нуля. Максимальні значення

тангенціальних та радіальних сил різання визначаються за відомими емпіричними залежностями [20]:

$$P_x = 10 \cdot C_{Px} \cdot t_p^x \cdot S^y \cdot V^n \cdot K_x, \quad (2.1)$$

$$P_y = 10 \cdot C_{Py} \cdot t_p^x \cdot S^y \cdot V^n \cdot K_y, \quad (2.2)$$

де враховано глибину різання  $t_p$ , подачу  $S$ , швидкість різання  $V$ , степені та поправочні коефіцієнти, одержані в результаті експериментальних досліджень.

Час, на протязі якого відбувається різання поверхні отвору одним розточним різцем:

$$t_K = \frac{\alpha}{\omega_p}, \quad (2.3)$$

де  $\omega_p$  – частота обертання розточної оправки, рад/с.

$\alpha$  - кут повороту розточної оправки, при якому відбувається різання поверхні отвору одним розточним різцем, рад.

Кут повороту розточної оправки, при якому відбувається різання поверхні отвору одним розточним різцем визначаємо за формулою:

$$\alpha = 2\pi - \frac{zb}{R}, \quad (2.4)$$

де  $R$  – радіус розточування поверхні отвору, мм;

$z$  - кількість розривів на поверхні отвору;

$b$  – ширина розриву поверхні, мм.

На основі рівнянь (2.4) і (2.3) одержано:

$$t_K = \frac{1}{\omega_p} \left( 2\pi - \frac{zb}{R} \right). \quad (2.5)$$

Час між ударами одного розточного різця та поверхні отвору:

$$t_1 = \frac{2\pi}{z\omega_p}. \quad (2.6)$$

Час між ударами декількох розточних різців та поверхні отвору:

$$t_1 = \frac{2\pi}{zk\omega_p}. \quad (2.7)$$

де  $k$  - кількість різців на розточній оправці.

Кути повороту  $\varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$  та лінійні переміщення елементів ідеалізованої системи:  $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3$  вибрано як розрахункові узагальнені координати [32].

Кінетична енергія приведеної механічної системи:

$$T = \frac{I_3 \cdot \dot{\varphi}_3^2}{2} + \frac{I_4 \cdot \dot{\varphi}_4^2}{2} + \frac{I_5 \cdot \dot{\varphi}_5^2}{2} + \frac{m_1 \cdot \dot{x}_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot \dot{x}_2^2}{2} + \frac{m_3 \cdot \dot{x}_3^2}{2} + \frac{m_1 \cdot \dot{y}_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot \dot{y}_2^2}{2} + \frac{m_3 \cdot \dot{y}_3^2}{2}. \quad (2.8)$$

Потенціальна енергія приведеної механічної системи:

$$\Pi = \frac{C_{35} \cdot (\varphi_5 - \varphi_3)^2}{2} + \frac{C_4 \cdot \varphi_4^2}{2} + \frac{k_{31x} \cdot (x_3 - R\varphi_3 - x_1)^2}{2} + \frac{k_{32x} \cdot (x_3 - R\varphi_3 - x_2)^2}{2} + \frac{k_{3x} \cdot x_3^2}{2} + \frac{k_{3y} \cdot y_3^2}{2} + \frac{k_{31y} \cdot (y_3 - y_1)^2}{2} + \frac{k_{32y} \cdot (y_3 - y_2)^2}{2}. \quad (2.9)$$

Функція розсіювання приведеної механічної системи:

$$\Phi = \frac{\beta_{35} \cdot (\dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_3)^2}{2} + \frac{\beta_4 \cdot \dot{\varphi}_4^2}{2} + \frac{\beta_{31x} \cdot (\dot{x}_3 - R\dot{\varphi}_3 - \dot{x}_1)^2}{2} + \frac{\beta_{3x} \cdot \dot{x}_3^2}{2} + \frac{\beta_{32x} \cdot (\dot{x}_3 - R\dot{\varphi}_3 - \dot{x}_2)^2}{2} + \frac{\beta_{3y} \cdot \dot{y}_3^2}{2} + \frac{\beta_{31y} \cdot (\dot{y}_3 - \dot{y}_1)^2}{2} + \frac{\beta_{32y} \cdot (\dot{y}_3 - \dot{y}_2)^2}{2}. \quad (2.10)$$

Рівняння Лагранжа другого роду для визначення коливань елементів

приведеної системи:

- крутних

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_n} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_n} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\varphi}_n} = R(P_{x1} + P_{x2} + P_u). \quad (2.11)$$

- лінійних:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_n} + \frac{\partial \Pi}{\partial x_n} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_n} = P_{x1} + P_{x2} + P_u, \quad (2.12)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_n} + \frac{\partial \Pi}{\partial y_n} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{y}_n} = P_{y1} + P_{y2} + P_u. \quad (2.13)$$

На основі рівнянь (2.8), (2.9) та (2.11) виведено систему диференціальних рівнянь, що описують коливання елементів еквівалентної багатомасової системи:

$$\begin{aligned} I_3 \cdot \ddot{\varphi}_3 + C_{35} \cdot (\varphi_3 - \varphi_5) + \beta_{35} (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_5) - k_{31x} \cdot (x_3 - R\varphi_3 - x_1)R - k_{32x} \cdot (x_3 - R\varphi_3 - x_2)R - \\ - \beta_{31x} \cdot (\dot{x}_3 - R\dot{\varphi}_3 - \dot{x}_1)R - \beta_{32x} \cdot (\dot{x}_3 - R\dot{\varphi}_3 - \dot{x}_2)R = R(P_{x1} + P_{x2} + P_u); \\ I_4 \cdot \ddot{\varphi}_4 + C_4 \cdot \varphi_4 + \beta_4 \cdot \dot{\varphi}_4 = R(P_{x1} + P_{x2} + P_u); \\ I_5 \cdot \ddot{\varphi}_5 + C_{35} \cdot (\varphi_5 - \varphi_3) + \beta_{35} (\dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_3) = -M_s; \\ m_1 \cdot \ddot{x}_1 - k_{31x} \cdot (x_3 - R\varphi_3 - x_1) - \beta_{31x} \cdot (\dot{x}_3 - R\dot{\varphi}_3 - \dot{x}_1) = P_{x1} + P_u; \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 - k_{32x} \cdot (x_3 - R\varphi_3 - x_2) - \beta_{32x} \cdot (\dot{x}_3 - R\dot{\varphi}_3 - \dot{x}_2) = P_{x2} + P_u; \\ m_3 \cdot \ddot{x}_3 + k_{31x} \cdot (x_3 - R\varphi_3 - x_1) + \beta_{31x} \cdot (\dot{x}_3 - R\dot{\varphi}_3 - \dot{x}_1) + \\ + k_{32x} \cdot (x_3 - R\varphi_3 - x_2) + \beta_{32x} \cdot (\dot{x}_3 - R\dot{\varphi}_3 - \dot{x}_2) + k_{3x} \cdot x_3 + \beta_{3x} \cdot \dot{x}_3 = 0; \\ m_1 \cdot \ddot{y}_1 - k_{31y} \cdot (y_3 - y_1) - \beta_{31y} \cdot (\dot{y}_3 - \dot{y}_1) = P_{y1} + P_u; \\ m_2 \cdot \ddot{y}_2 - k_{32y} \cdot (y_3 - y_2) - \beta_{32y} \cdot (\dot{y}_3 - \dot{y}_2) = P_{y2} + P_u; \\ m_3 \cdot \ddot{y}_3 + k_{3y} \cdot y_3 + \beta_{3y} \cdot \dot{y}_3 + k_{31y} \cdot (y_1 - y_3) + \beta_{31y} \cdot (\dot{y}_1 - \dot{y}_3) + \\ + k_{32y} \cdot (y_2 - y_3) + \beta_{32y} \cdot (\dot{y}_2 - \dot{y}_3) = 0. \end{aligned} \quad (2.14)$$

де  $M_s$  – крутний момент на шпинделі верстата.

Для розв'язку системи рівнянь (2.14) прийнято граничні умови в момент контакту між розточним різцем та заготовкою із попередньо обробленим перервним отвором, при цьому для часу  $t=0$  для числового розрахунку прийнято початкові умови:

$$\begin{aligned}\varphi_3(0) = 0, \varphi_4(0) = 0, \varphi_5(0) = 0, x_1(0) = 0, x_2(0) = 0, x_3(0) = 0, \\ y_1(0) = 0, y_2(0) = 0, y_3(0) = 0, \\ \dot{\varphi}_3(0) = 0, \dot{\varphi}_4(0) = 0, \dot{\varphi}_5(0) = 0, \dot{x}_1(0) = 0, \dot{x}_2(0) = 0, \dot{x}_3(0) = 0, \\ \dot{y}_1(0) = 0, \dot{y}_2(0) = 0, \dot{y}_3(0) = 0.\end{aligned}\tag{2.15}$$

При дослідженні динаміки розточування перервного отвору розглянуто три основних випадки:

1. Врізання протилежно розташованих на розточній оправці різців у перервну поверхню отвору заготовки проходить одночасно, внаслідок чого зрівноважуються радіальні сили різання на двох різцях. Графіки зміни радіальних сил різання  $P_{y1}(t)$ ,  $P_{y2}(t)$  та сили ударів  $P_u(t)$  між різцями та поверхнею отвору в часі для двох розточних різців першого випадку представлено на рис. 2.2.

2. Врізання другого різця у перервну поверхню отвору заготовки проходить під час різання першим різцем поверхні отвору. Графіки зміни радіальних сил різання  $P_{y1}(t)$ ,  $P_{y2}(t)$  та сили ударів  $P_u(t)$  між різцями та поверхнею отвору в часі для двох розточних різців другого випадку представлено на рис. 2.3.

3. Врізання другого різця у перервну поверхню отвору заготовки проходить під час розміщення першого різця навпроти розриву поверхні отвору, коли не проходить процес різання. Графіки зміни радіальних сил різання  $P_{y1}(t)$ ,  $P_{y2}(t)$  та сили ударів  $P_u(t)$  між різцями та поверхнею отвору в часі для двох розточних різців третього випадку представлено на рис. 2.4.

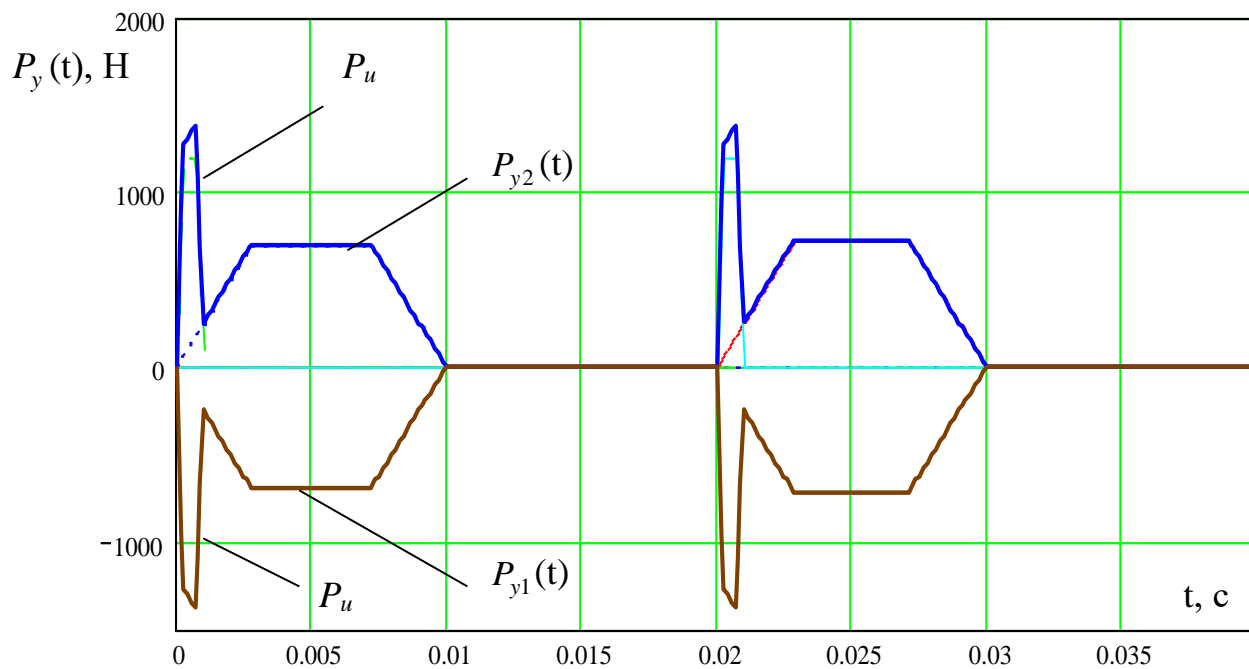


Рисунок 2.2 - Графіки зміни радіальних сил різання  $P_{y1}(t)$ ,  $P_{y2}(t)$  та сили ударів  $P_u(t)$  між різцями та поверхнею отвору в часі для двох розточних різців першого випадку

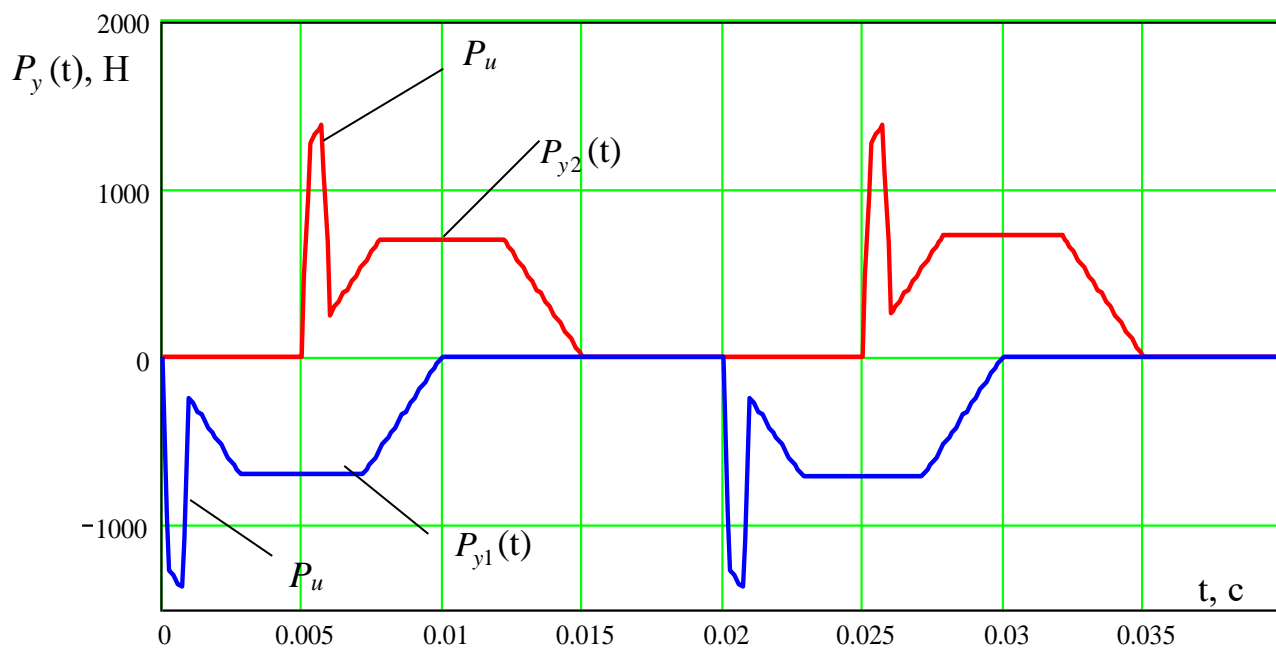


Рисунок 2.3 - Графіки зміни радіальних сил різання  $P_{y1}(t)$ ,  $P_{y2}(t)$  та сили ударів  $P_u(t)$  між різцями та поверхнею отвору в часі для двох розточних різців другого випадку

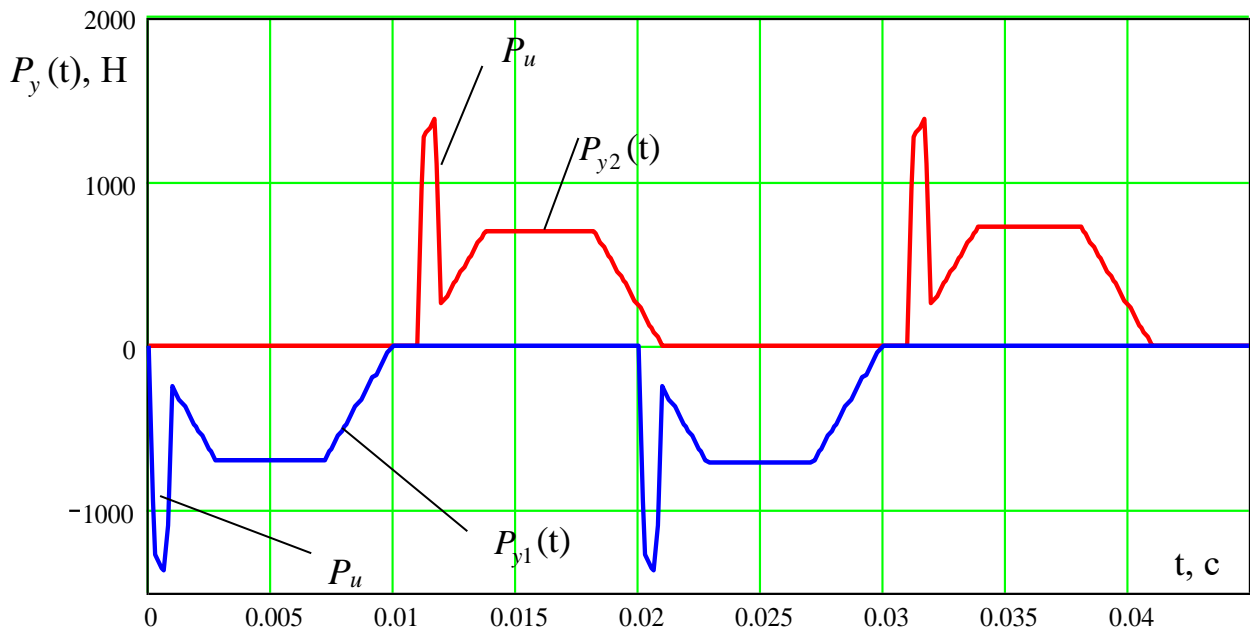


Рисунок 2.4 - Графіки зміни радіальних сил різання  $P_{y1}(t)$ ,  $P_{y2}(t)$  та сили ударів  $P_u(t)$  між різцями та поверхнею отвору в часі для двох розточних різців третього випадку

В результаті використання розробленого алгоритму та підпрограми побудовано графіки, де показано залежності величини радіальної деформації розточної оправки для випадку коли врізання другого різця у перервну поверхню отвору заготовки проходить під час різання першим різцем поверхні отвору (рис. 2.5), залежності величини радіальної деформації розточної оправки для випадку коли врізання другого різця у перервну поверхню отвору заготовки проходить під час розміщення першого різця навпроти розриву поверхні отвору (рис. 2.6), залежності величини швидкості радіальної деформації розточної оправки для випадку коли врізання другого різця у перервну поверхню отвору заготовки проходить під час різання першим різцем поверхні отвору (рис. 2.7), залежності величини швидкості радіальної деформації розточної оправки для випадку коли врізання другого різця у перервну поверхню отвору заготовки проходить під час розміщення першого різця навпроти розриву поверхні отвору (рис. 2.8), зміни кута деформації розточної оправки в часі (рис. 2.9), зміни швидкості деформації розточної оправки в часі (рис. 2.10).



Рисунок 2.5 - Графік зміни величини радіальної деформації розточної оправки для випадку коли врізання другого різця у перервну поверхню отвору заготовки проходить під час різання першим різцем поверхні отвору в напрямку осі  $u$  в часі

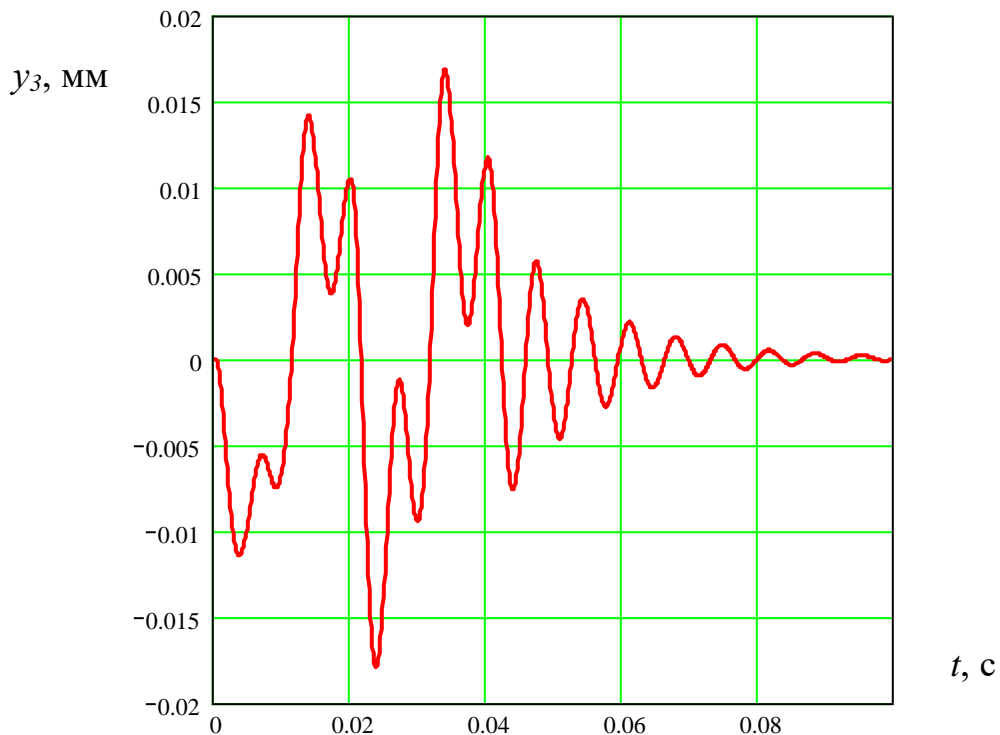


Рисунок 2.6 - Графік зміни величини радіальної деформації розточної оправки для випадку коли коли врізання другого різця у перервну поверхню отвору заготовки проходить під час розміщення першого різця навпроти розриву поверхні отвору в напрямку осі  $u$  в часі



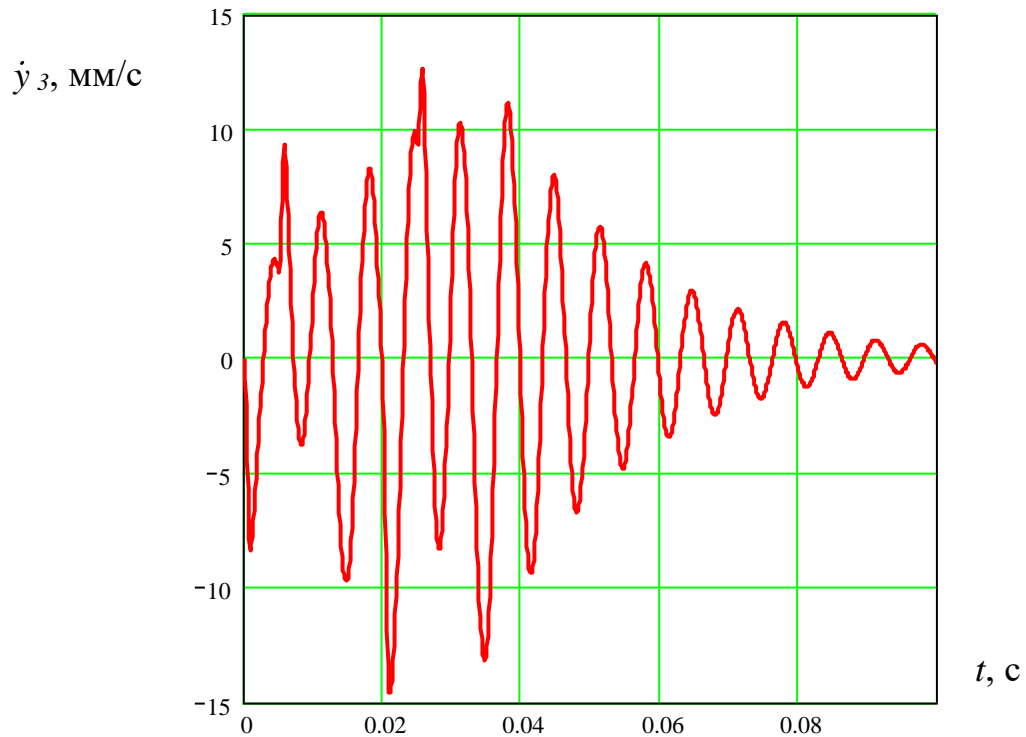


Рисунок 2.7 - Графік зміни величини швидкості радіальної деформації розточної оправки для випадку коли врізання другого різця у перервну поверхню отвору заготовки проходить під час різання першим різцем поверхні отвору в напрямку осі  $u$  в часі

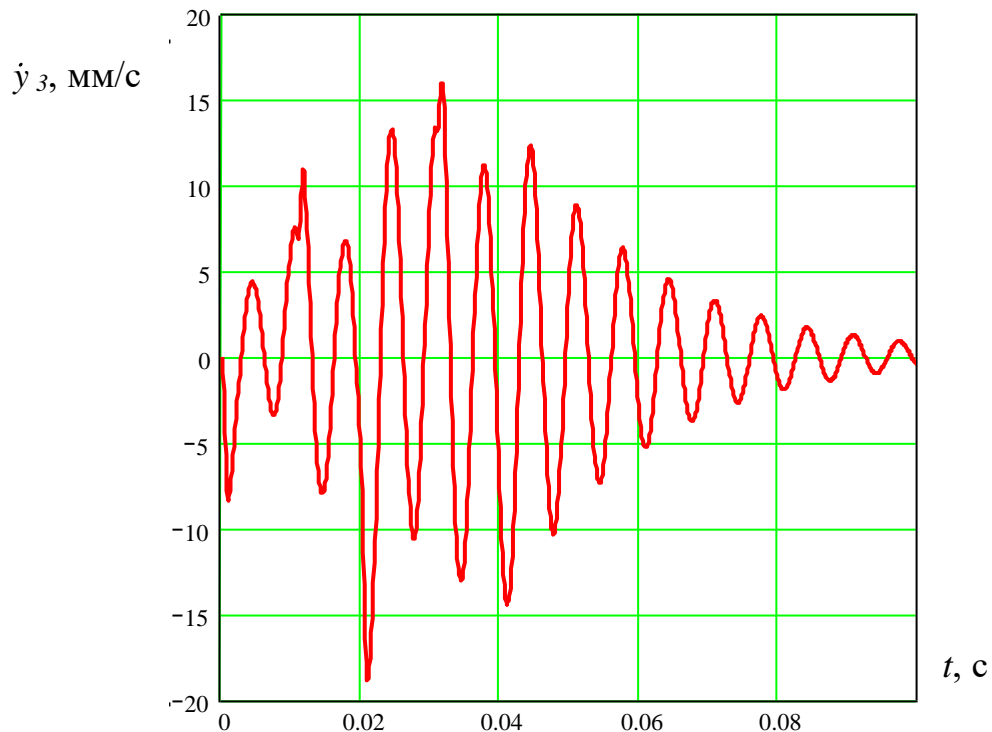


Рисунок 2.8 - Графік зміни швидкості величини радіальної деформації розточної оправки для випадку коли коли врізання другого різця у перервну поверхню отвору заготовки проходить під час розміщення першого різця навпроти розриву поверхні отвору в напрямку осі  $u$  в часі

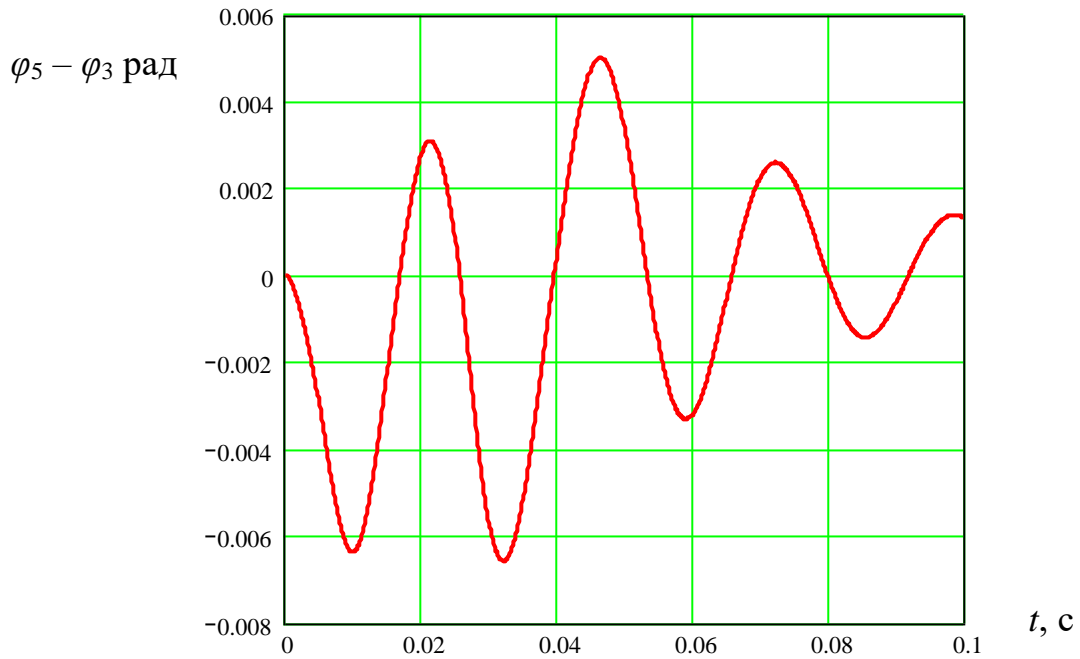


Рисунок 2.9 - Графік зміни кута деформації розточної оправки в часі

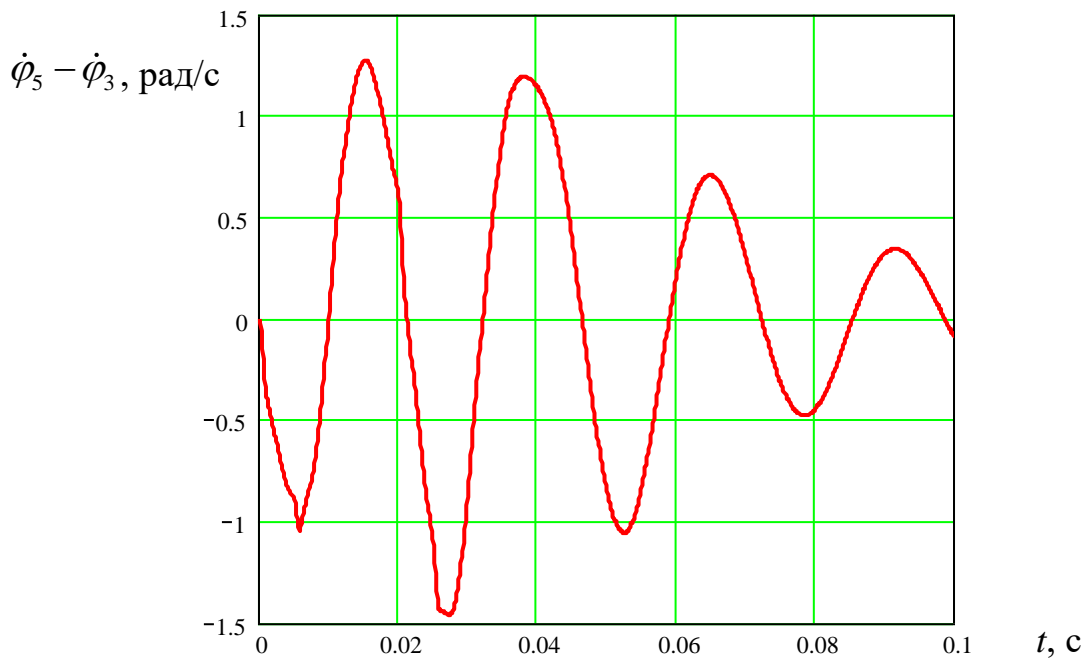


Рисунок 2.10 - Графік зміни швидкості деформації розточної оправки в часі

Складові системи рівнянь (2.14) визначались на основі аналітичних методів а також на основі даних експериментальних досліджень щодо приведених коефіцієнтів жорсткості та коефіцієнтів демпфування. На основі побудованих графіків (рис. 2.5 – рис. 2.10) встановлено, що для випадку коли врізання другого різця у перервну поверхню отвору заготовки проходить під час різання

першим різцем поверхні отвору максимальна величина радіальної деформації розточної оправки становить 0,015 мм, а швидкість деформації – 14 мм/с. Для випадку коли врізання другого різця у перервну поверхню отвору заготовки проходить під час розміщення першого різця навпроти розриву поверхні отвору максимальна величина радіальної деформації розточної оправки становить 0,0175 мм, а швидкість деформації – 18 мм/с. Для випадку, коли врізання протилежно розташованих на розточній оправці різців у перервну поверхню отвору заготовки проходить одночасно ці величини рівні нулю. Отже, ідеальним варіантом є процес різання із одночасним врізанням різців. У випадку коли не можливо забезпечити цей варіант, кращим варіантом є випадок коли врізання другого різця у перервну поверхню отвору заготовки проходить під час різання першим різцем поверхні отвору.

Найбільший кут деформації розточної оправки складає 0,004 рад., при цьому максимальна швидкість деформації становить 1,4 рад/с.

## **2.2. Результати експериментальних досліджень відхилення від круглості циліндричного сектора перервної поверхні після розточування**

У кваліфікаційній роботі представлено результати експериментальних досліджень відхилення від круглості циліндричного сектора перервної поверхні після розточування.

Дослідження включало такі етапи:

1. Вибір розточного верстата, заготовок із попередньо сформованими отворами з перервними поверхнями, які потрібно розточити, засобів вимірювання відхилення від круглості розточеної поверхні.

2. Проведення експериментальних досліджень для визначення відхилення від круглості циліндричного сектора перервної поверхні після розточування у заготовках із сталі 45 залежно від зміни трьох основних факторів: подачі одного розточного різця на один оберт оправки, глибини різання розточним різцем та швидкості різання розточним різцем.

Для розточування перервних циліндричних отворів використовувався вертикально-розточний верстат, розточна оправка із двома твердосплавними розточними різцями, розташованими симетрично відносно вісі обертання оправки. Заготовка закріплювалась у спеціальному пристрої. Діаметр розточеного отвору становив 100 мм.

Відхилення від круглості циліндричного сектора перервної поверхні після розточування визначали на основі запису круглограм та їх статистичного оброблення. Статистична обробка одержаних результатів проводилась із використанням прикладного програмного забезпечення.

Для встановлення впливу основних змінних технологічних факторів на відхилення від круглості (параметр оптимізації  $\Delta R$ ) циліндричного сектора перервної поверхні отворів, сформованих у заготовках із сталі 45 (незалежних факторів  $x_i$ ) після розточування проведено відповідні експериментальні дослідження. Фактори змінювались на трьох рівнях. Попередні експерименти встановили, що основними змінними факторами, які впливають на відхилення від круглості циліндричного сектора перервної поверхні отворів після розточування оправкою з двома різцями є: подача одного розточного різця на один оберт оправки  $S$ , глибина різання розточним різцем  $t$  та швидкість різання розточним різцем  $V$ , тобто  $\Delta R = f(S, t, V)$ .

Функцію, що описує залежність відхилення від круглості циліндричного сектора перервної поверхні отворів після розточування  $\Delta R = f(S, t, V)$ , представлено у вигляді полінома другого порядку як результат обробки статистичних даних експерименту та визначення коефіцієнтів рівняння регресії. Граничні величини змінних факторів експерименту представлено у таблиці 2.1, до яких віднесено:

- подача одного розточного різця на один оберт оправки  $S$ , яку кодували індексом  $x_1$ ;
- глибина різання розточним різцем  $t$ , яку кодували індексом  $x_2$ ;
- швидкість різання розточним різцем  $V$ , яку кодували індексом  $x_3$ .

Таблиця 2.1 - Граничні величини змінних факторів експерименту при дослідженні відхилення від круглості циліндричного сектора перервної поверхні отворів після розточування

Фактори	Позначення		Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натур.(кодовані)		
	натур.	код.				
Подача одного розточного різця на один оберт оправки	$S$ , мм/об	$x_1$	0,15	0,4 (+1)	0,25 (0)	0,1 (-1)
Глибина різання розточним різцем	$t$ , мм	$x_2$	0,2	0,5 (+1)	0,3 (0)	0,1 (-1)
Швидкість різання розточним різцем	$V$ , м/хв	$x_3$	15	90 (+1)	75 (0)	60 (-1)

Значення коефіцієнтів рівняння регресії представлено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Значення коефіцієнтів рівняння регресії

Коеф.	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$
Сталь 45	0,023	0,0035	0,0031	$-7 \cdot 10^{-4}$	0,00138	$-1,25 \cdot 10^{-4}$	$-1,25 \cdot 10^{-4}$	$2,65 \cdot 10^{-4}$	$-7,75 \cdot 10^{-4}$	$-7,75 \cdot 10^{-4}$

Загальний вигляд рівняння регресії відхилення від круглості циліндричного сектора перервної поверхні отворів після розточування залежно від зміни: подачі одного розточного різця на один оберт оправки  $S$ , глибини різання розточним різцем  $t$  та швидкості різання розточним різцем  $V$ , тобто  $\Delta R_{(x_1, x_2, x_3)} = f(S, t, V)$  згідно експериментальних досліджень у кодованих величинах дорівнює:

- під час розточування перервних отворів у заготовках із сталі 45:

$$\Delta R_{(x_1, x_2, x_3)} = 0,023 + 0,0035x_1 + 0,0031x_2 - 7 \cdot 10^{-4}x_3 + 0,00138x_1x_2 - 1,25 \cdot 10^{-4}x_1x_3 - 1,25 \cdot 10^{-4}x_2x_3 + 2,65 \cdot 10^{-4}x_1^2 - 7,75 \cdot 10^{-4}x_2^2 - 7,75 \cdot 10^{-4}x_3^2, \quad (2.16)$$

де  $x_1$  - кодоване значення подачі одного розточного різця на один оберт

оправки;  $x_2$  - кодоване значення глибини різання розточним різцем;  $x_3$  - кодоване значення швидкості різання розточним різцем.

Виведені коефіцієнти рівняння (2.16) є значущими.

Рівняння регресії (2.16) після перетворень представлено у натуральних величинах:

- під час розточування перервних отворів у заготовках із сталі 45:

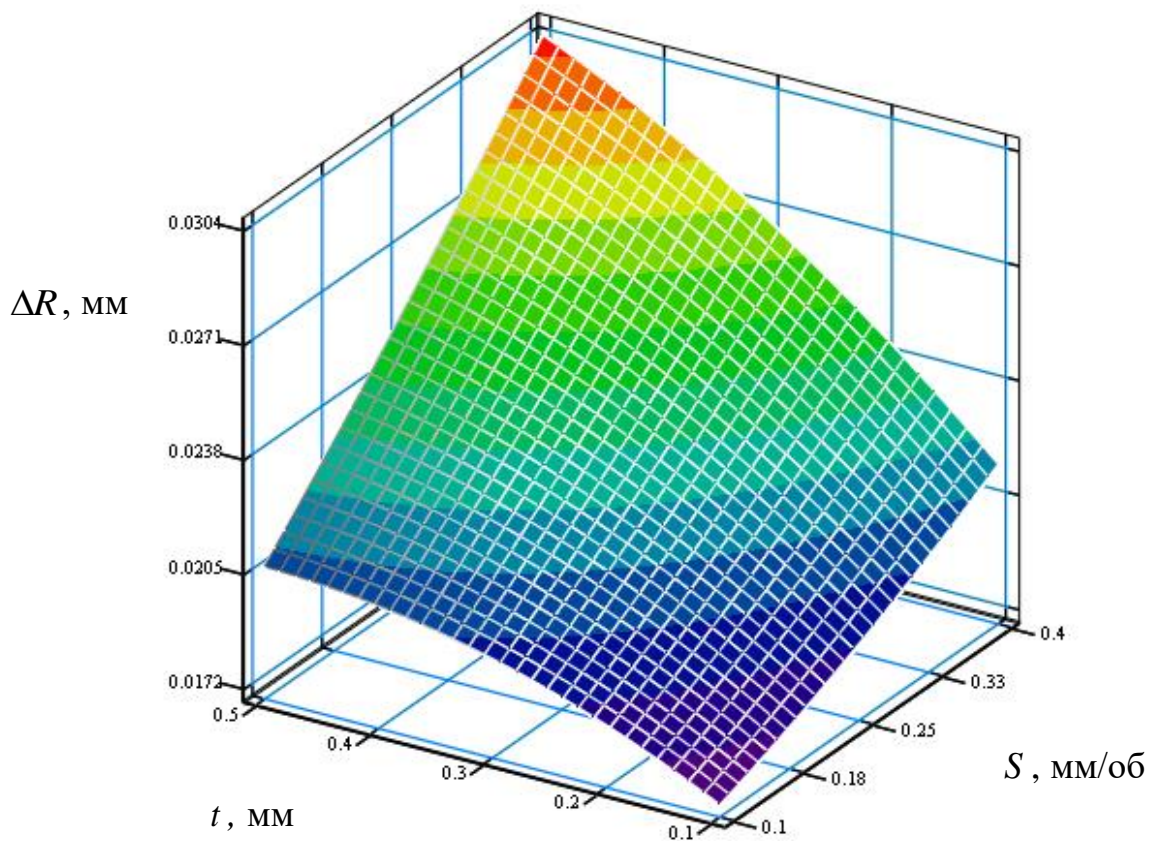
$$\Delta R_{(S,t,V)} = -0,003043 + 0,00786S + 0,0189t + 4,99 \cdot 10^{-4}V + 0,0458St - 5,55 \cdot 10^{-5}SV - 4,16 \cdot 10^{-5}tV + 0,01177S^2 - 0,0195t^2 - 3,47 \cdot 10^{-6}V^2. \quad (2.17)$$

Одержані кодовані та натуральні рівняння регресії (2.16) і (2.17) можна використовувати для прогнозування відхилення від круглості циліндричного сектора перервної поверхні отворів після розточування двома різцями у таких граничних величинах змінних незалежних факторів:

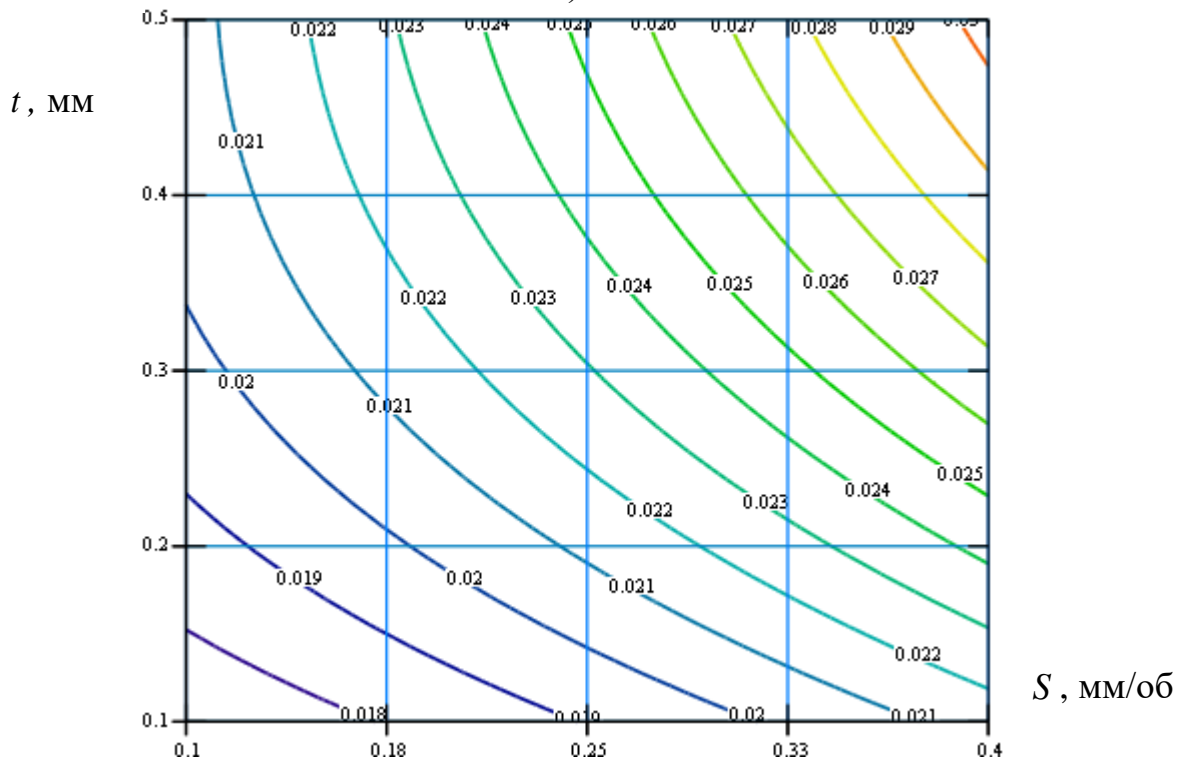
$$0,1 \leq S \leq 0,4 \text{ (мм/об); } 0,1 \leq t \leq 0,5 \text{ (мм); } 60 \leq V \leq 90 \text{ (м/хв).}$$

На графіках рисунків 2.11 – 2.15 представлено трьохмірні та двохмірні залежності відхилення від круглості циліндричного сектора перервної поверхні отворів, сформованих у заготовках із сталі 45 після розточування.

Із одержаних рівнянь регресії (2.16), (2.17) та графіків на рисунках 2.11-2.15 зроблено висновки, що найбільший вплив на відхилення від круглості  $\Delta R$  циліндричного сектора перервної поверхні отворів, сформованих у заготовках із сталі 45 після розточування має подача одного розточного різця на один оберт оправки  $S$ , а найменший вплив має швидкість різання розточним різцем  $V$ . При збільшенні подачі одного розточного різця на один оберт оправки  $S$  та глибини різання розточним різцем  $t$  відхилення від круглості  $\Delta R$  циліндричного сектора перервної поверхні отворів після розточування зростає, а при збільшенні швидкості різання розточним різцем  $V$  – зменшується.

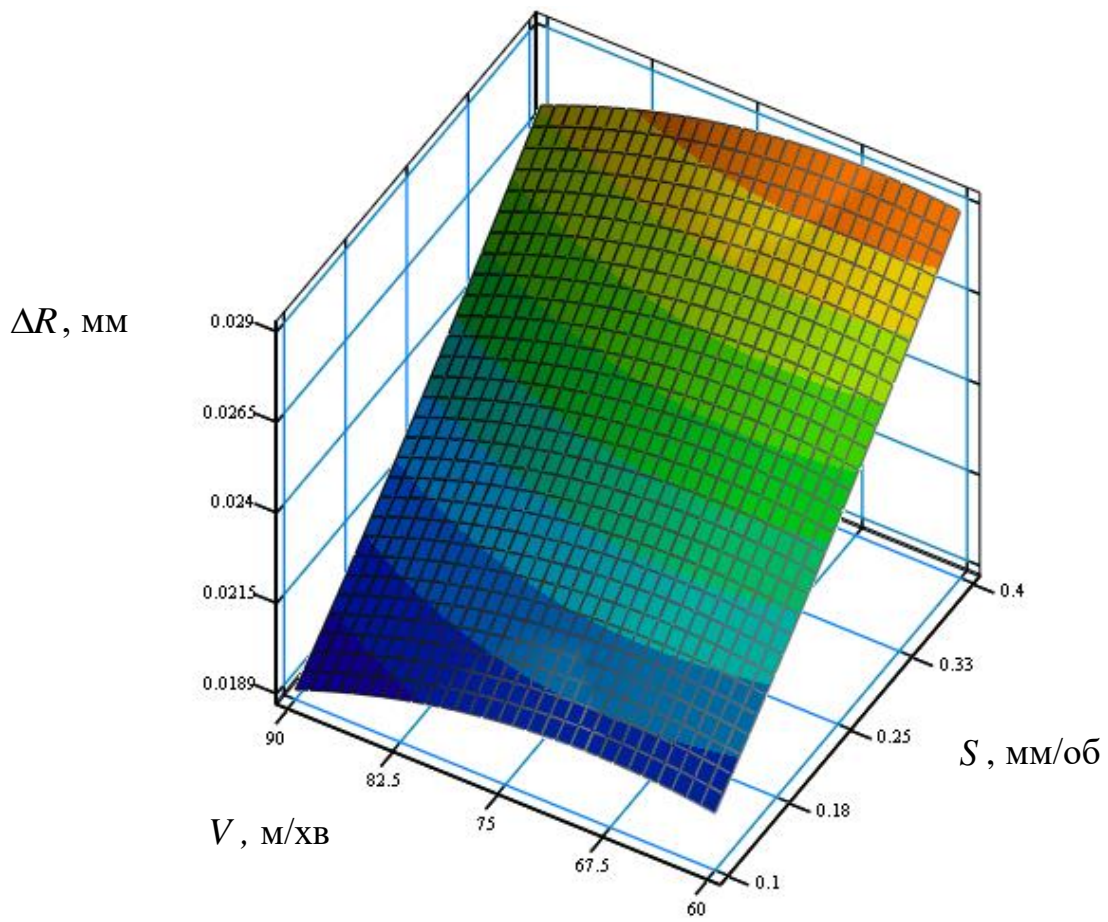


а)

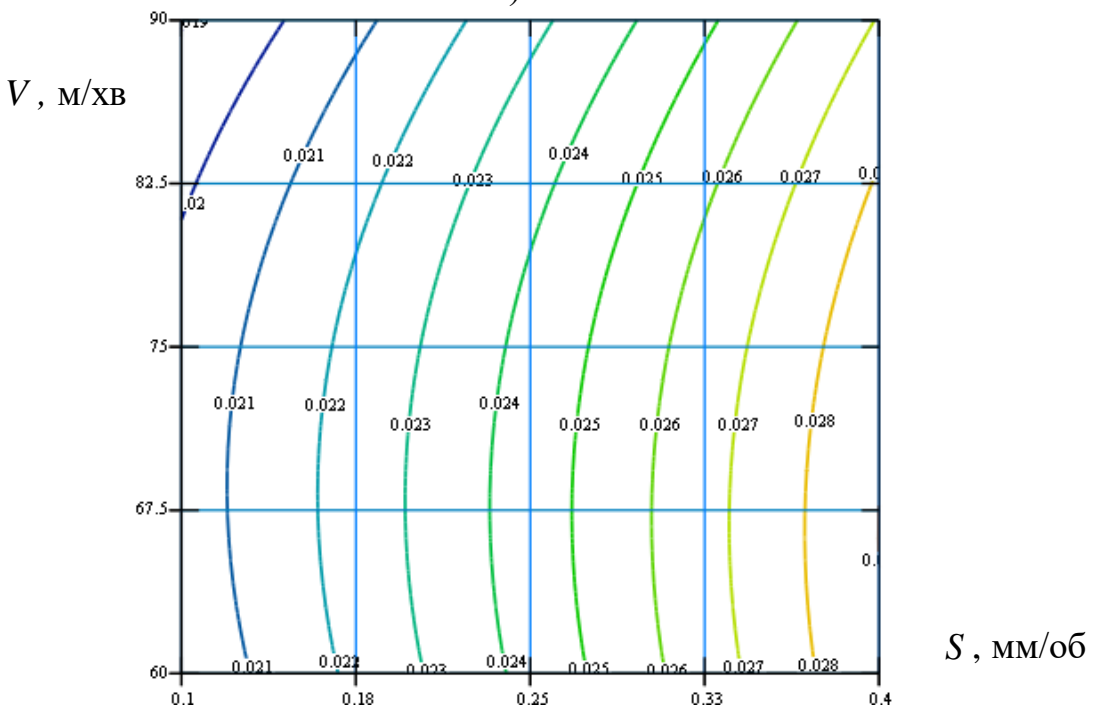


б)

Рисунок 2.11 - Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності відхилення від круглості  $\Delta R$  циліндричного сектора перервної поверхні отворів, сформованих у заготовках із сталі 45 після розточування від подачі одного розточного різця на один оберт оправки  $S$  та глибини різання розточним різцем  $t$  ( $V=75$  м/хв)



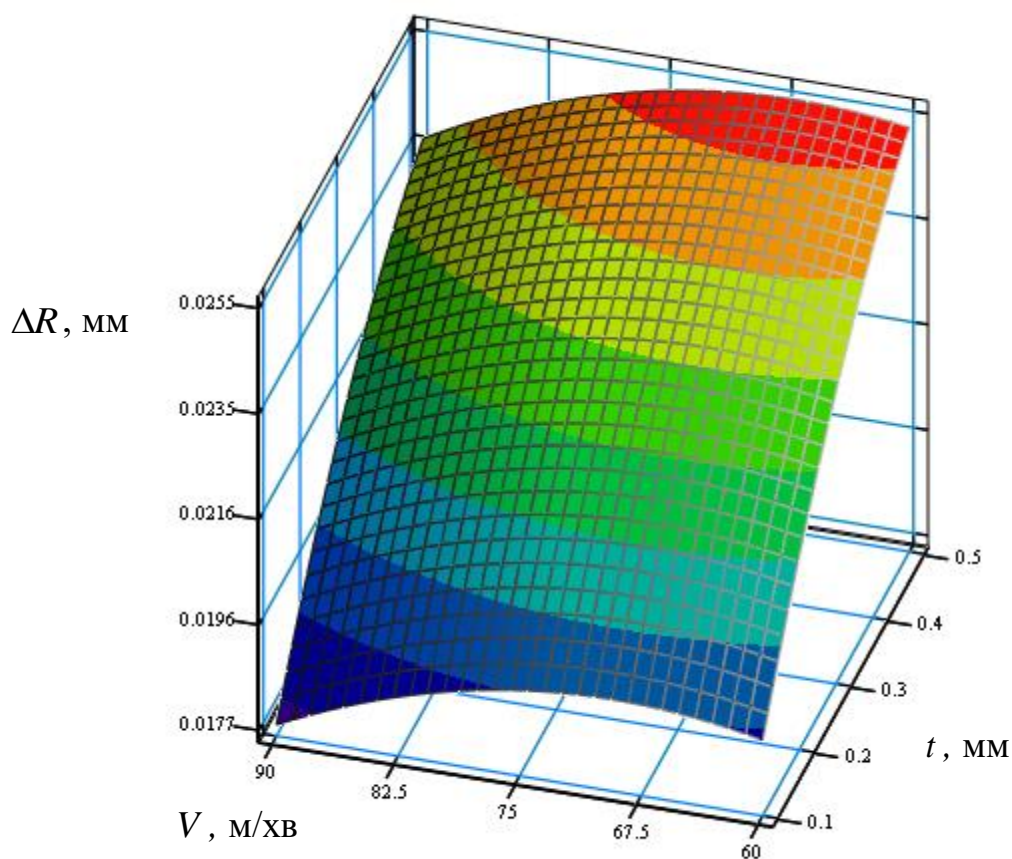
а)



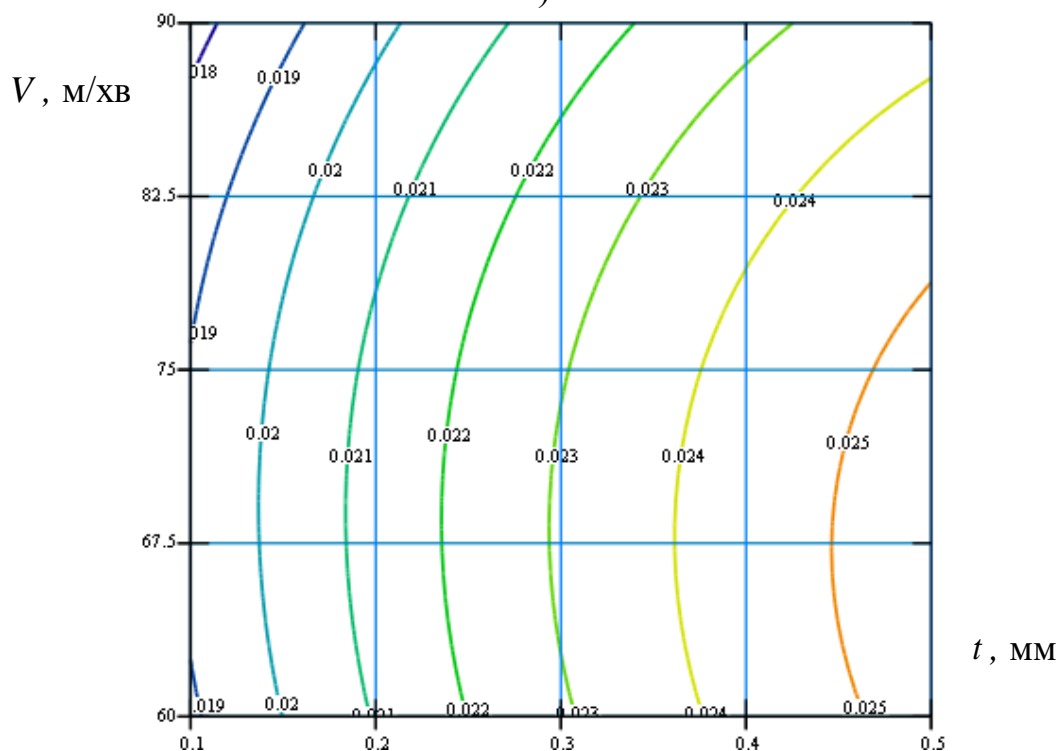
б)

Рисунок 2.12 - Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності відхилення від круглості  $\Delta R$  циліндричного сектора перервної поверхні отворів, сформованих у заготовках із сталі 45 після розточування від подачі одного розточного різця на один оберт оправки  $S$  та швидкості різання розточним різцем  $V$  ( $t=0,3$  мм)





a)



б)

Рисунок 2.13 - Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності відхилення від круглості  $\Delta R$  циліндричного сектора перервної поверхні отворів, сформованих у заготовках із сталі 45 після розточування від глибини різання розточним різцем  $t$  та швидкості різання розточним різцем  $V$  ( $S=0,25$  мм/об)

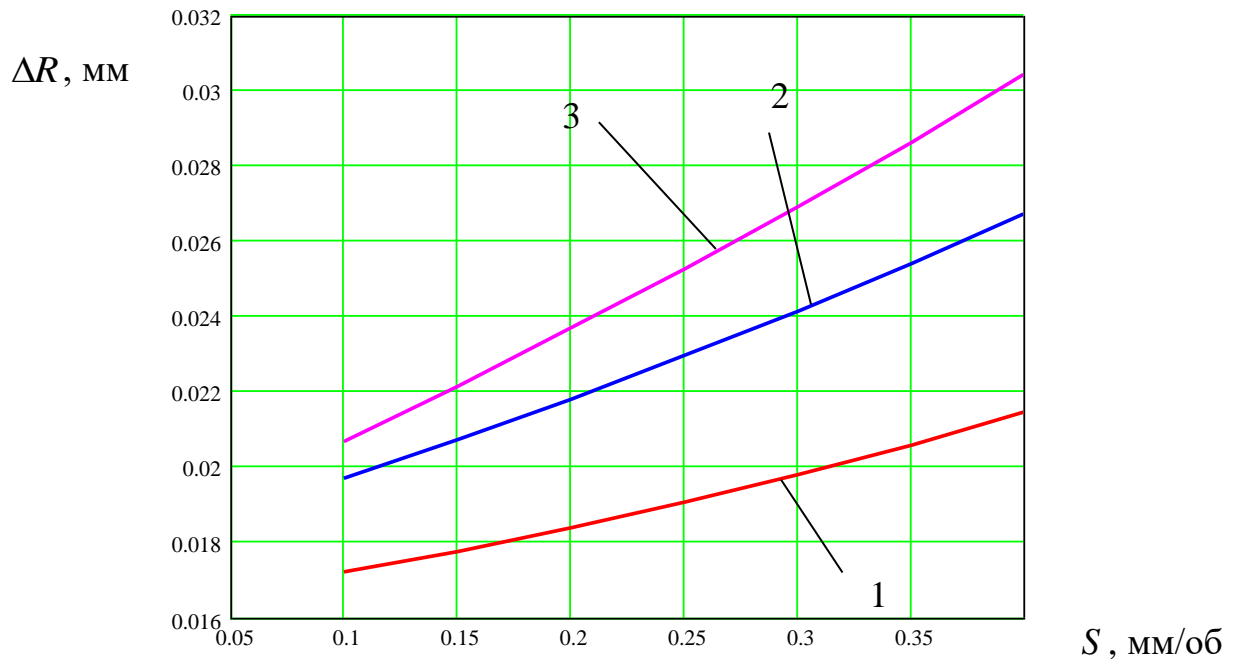


Рисунок 2.14 – Графіки залежності відхилення від круглості  $\Delta R$  циліндричного сектора перервної поверхні отворів, сформованих у заготовках із сталі 45 після розточування від подачі одного розточного різця на один оберт оправки  $S$ ,  $V=75$  м/хв: 1)  $t=0,1$  мм; 2)  $t=0,3$  мм; 3)  $t=0,5$  мм

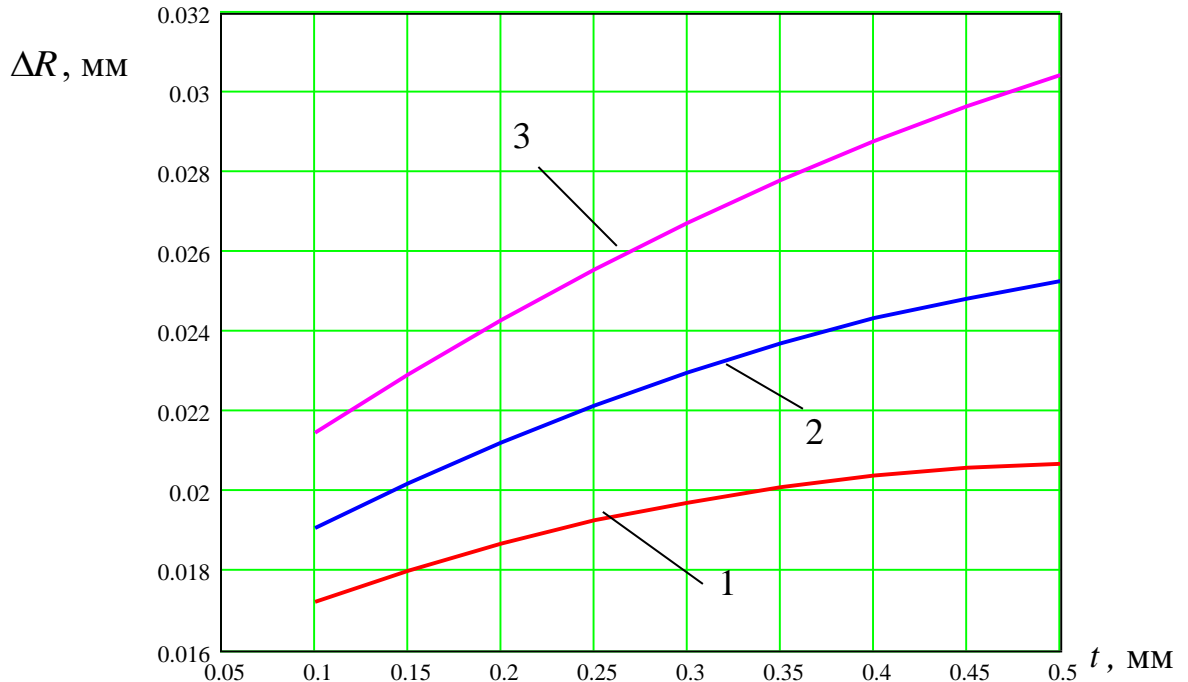


Рисунок 2.15 – Графіки залежності відхилення від круглості  $\Delta R$  циліндричного сектора перервної поверхні отворів, сформованих у заготовках із сталі 45 після розточування від глибини різання розточним різцем  $t$ ,  $V=75$  м/хв: 1)  $S=0,1$  мм/об; 2)  $S=0,25$  мм/об; 3)  $S=0,4$  мм/об

Максимальне значення відхилення від круглості  $\Delta R$  циліндричного сектора перервної поверхні отворів після розточування становить 0,031 мм, а мінімальне - 0,016 мм. Збільшення подачі одного розточного різця на один оберт оправки  $S$  від 0,1 мм/об до 0,4 мм/об призводить до зростання відхилення від круглості  $\Delta R$  на 19%. Збільшення глибини різання розточним різцем  $t$  від 0,1 мм до 0,5 мм призводить до зростання відхилення від круглості  $\Delta R$  на 15%, а збільшення швидкості різання розточним різцем  $V$  від 60 до 90 м/хв призводить до зменшення відхилення від круглості  $\Delta R$  на 7%.

### 2.3. Висновки

В розділі проведено дослідження динаміки розточування перервних отворів. Виведено систему диференціальних рівнянь. При цьому розв'язок представлено у вигляді числових даних та графіків. На основі побудованих графіків встановлено, що для випадку коли врізання другого різця у перервну поверхню отвору заготовки проходить під час різання першим різцем поверхні отвору максимальна величина радіальної деформації розточної оправки становить 0,015 мм, а швидкість деформації – 14 мм/с. Для випадку коли врізання другого різця у перервну поверхню отвору заготовки проходить під час розміщення першого різця навпроти розриву поверхні отвору максимальна величина радіальної деформації розточної оправки становить 0,0175 мм, а швидкість деформації – 18 мм/с. Для випадку, коли врізання протилежно розташованих на розточній оправці різців у перервну поверхню отвору заготовки проходить одночасно ці величини рівні нулю. Отже, ідеальним варіантом є процес різання із одночасним врізанням різців. У випадку коли не можливо забезпечити цей варіант, кращим варіантом є випадок коли врізання другого різця у перервну поверхню отвору заготовки проходить під час різання першим різцем поверхні отвору.

Найбільший кут деформації розточної оправки складає 0,004 рад., при цьому максимальна швидкість деформації становить 1,4 рад/с.

Представлено результати експериментальних досліджень відхилення від круглості циліндричного сектора перервної поверхні після розточування. Зроблено висновки, що найбільший вплив на відхилення від круглості  $\Delta R$  циліндричного сектора перервної поверхні отворів, сформованих у заготовках із сталі 45 після розточування має подача одного розточного різця на один оберт оправки  $S$ , а найменший вплив має швидкість різання розточним різцем  $V$ . При збільшенні подачі одного розточного різця на один оберт оправки  $S$  та глибини різання розточним різцем  $t$  відхилення від круглості  $\Delta R$  циліндричного сектора перервної поверхні отворів після розточування зростає, а при збільшенні швидкості різання розточним різцем  $V$  – зменшується.

Максимальне значення відхилення від круглості  $\Delta R$  циліндричного сектора перервної поверхні отворів після розточування становить 0,031 мм, а мінімальне - 0,016 мм. Збільшення подачі одного розточного різця на один оберт оправки  $S$  від 0,1 мм/об до 0,4 мм/об призводить до зростання відхилення від круглості  $\Delta R$  на 19%. Збільшення глибини різання розточним різцем  $t$  від 0,1 мм до 0,5 мм призводить до зростання відхилення від круглості  $\Delta R$  на 15%, а збільшення швидкості різання розточним різцем  $V$  від 60 до 90 м/хв призводить до зменшення відхилення від круглості  $\Delta R$  на 7%.

### 3 ТЕХНОЛОГІЧНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

#### 3.1. Аналіз технологічності деталі

Визначення показників технологічності вала КС6-07.608 ґрунтуються на числових даних, приведених в таблиці 1.1.

Розрахунок коефіцієнта точності обробки вала КС6-07.608:

$$K_{\text{т.ч.}} = 1 - \frac{1}{T_{\text{сп}}}, \quad (3.1)$$

$$T_{\text{сп}} = \frac{\sum T_i \cdot n_i}{\sum n_i} = \frac{15 \cdot 1 + 14 \cdot 9 + 12 \cdot 1 + 11 \cdot 4 + 9 \cdot 2 + 6 \cdot 1}{20} = 11,05;$$

$$K_{\text{т.ч.}} = 1 - \frac{1}{11,05} = 0,91.$$

Якщо  $K_{\text{т.ч.}} = 0,91 > 0,8$ , то вал КС6-07.608 є технологічним.

Розрахунок коефіцієнта шорсткості поверхонь вала КС6-07.608:

$$K_{\text{ш}} = \frac{1}{B_{\text{сп}}}, \quad (3.2)$$

$$B_{\text{сп}} = \frac{\sum B_i \cdot n_i}{\sum n_i} = \frac{7 \cdot 1 + 6 \cdot 2 + 5 \cdot 4 + 3 \cdot 12 + 2 \cdot 1}{20} = 3,85,$$

$$K_{\text{ш}} = \frac{1}{3,85} = 0,26.$$

Якщо  $K_{\text{ш}} = 0,26 > 0,16$ , то вал КС6-07.608 є технологічним.

Розрахунок коефіцієнта уніфікації конструктивних елементів вала КС6-07.608:

$$K_{\text{у.е.}} = \frac{N_{\text{у.е.}}}{N_{\text{е}}} = \frac{20}{20} = 1,0. \quad (3.3)$$

Якщо  $K_{\text{у.е.}} = 1,0 > 0,6$ , то вал КС6-07.608 є технологічним.

На основі одержаних розрахунків встановлено, що деталь “Вал” КС6-07.608 є технологічною і немає потреби щодо зміни її конструкції, технічних вимог, матеріалу.

### 3.2. Вибір способу одержання заготовки

Для виготовлення заготовки вала КС6-07.608, враховуючи його матеріал, можна використовувати прокат та способи об’ємного пластичного деформування. Тому у роботі розглянуто два способи виготовлення заготовки:

1) Прокат  $\frac{B-36 \text{ ГОСТ } 2590-88}{45-2-б \text{ ГОСТ } 1050-88}$ ;

2) Штамповка на кривошипному гарячостампувальному пресі.

Ступінь складності штамповки [7]:

$$C = \frac{m_{ш}}{m_{\phi}}. \quad (3.4)$$

Маса штамповки [7]:

$$m_{ш} = m_{д} \cdot k_p = 1,2 \cdot 1,3 = 1,56 \text{ кг}.$$

Маса описаної фігури:

$$m_{\phi} = V_{\phi} \cdot \rho, \quad (3.5)$$

$$V_{\phi} = \frac{\pi \times d^2}{4} \times H = \frac{3,14 \times 36^2 \times 205}{4} = 208665 \text{ мм}^3 = 208,7 \text{ см}^3.$$

$$m_{\phi} = 208,7 \cdot 1,05 \cdot 7,8 = 1,71 \text{ кг}.$$

Група складності штамповки:  $C = \frac{1,56}{1,71} = 0,91.$

Масу заготовки визначаємо як добуток об’єму заготовки та густини матеріалу заготовки:

$$Q = V_3 \cdot \rho. \quad (3.6)$$

Об'єм заготовки із прокату:

$$V = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot H}{4};$$

$$V_1 = \frac{\pi \cdot 36^2 \cdot 209}{4} = 212,7 \text{ см}^3.$$

Розрахунки припусків для вала КС6-07.608 проведено із використанням відомих методик і табличних даних довідників (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Припуски вала КС6-07.608

Оброблювана поверхня, її розмір, точність	Параметр шорсткості деталі, мкм	Допуск заготовки, мм	Загальний припуск, мм	Розмір заготовки із граничними відхиленнями
1	2	3	4	5
1) Прокат $\frac{\text{В-36 ГОСТ 2590-88}}{45-2-б ГОСТ 1050-88}$ ;				
Торцева поверхня 205±0,5 мм	Rz 80	1,5	2 × 2 = 4	209±0,75
Зовнішня циліндрична поверхня Ø 36	Rz 160	1,1	–	Ø 36 $^{+0,4}_{-0,7}$
2) Штамповка на кривошипному гарячощтампувальному пресі				
Квадрат 24 $^{+0,28}_{-0,52}$	Rz 80	2,0	1,3 × 2 = 2,6	□ 26,6 $^{+1,3}_{-0,7}$
Зовнішня циліндрична поверхня Ø 14h11(–0,11)	Rz 20	2,0	1,6 × 2 = 3,2	Ø 17,2 $^{+1,3}_{-0,7}$
Зовнішня циліндрична поверхня Ø 28d11 (–0,065/–0,195)	Rz 20	2,0	1,6 × 2 = 3,2	Ø 31,2 $^{+1,3}_{-0,7}$
Зовнішня циліндрична поверхня Ø 36	Rz 160	2,8	–	Ø 36 $^{+1,8}_{-1,0}$
Торцева поверхня 37±0,3	Rz 80	2,0	1,3	35,7 $^{+1,3}_{-0,7}$
Торцева поверхня 35±0,3	Rz 80	2,0	1,3	33,7 $^{+1,3}_{-0,7}$
Торцева поверхня 17±0,2	Rz 80	2,0	1,3	15,7 $^{+1,3}_{-0,7}$
Торцева поверхня 205±0,5	Rz 80	2,8	1,7 × 2 = 3,4	208,4 $^{+1,8}_{-1,0}$

Об'єм заготовки, одержаної штампуванням:

$$V_1 = \frac{\pi \cdot 17,2^2 \cdot 15,7}{4} = 3717,6 \text{ мм}^3 = 3,7 \text{ см}^3,$$

$$V_2 = 26,6^2 \cdot 20 = 14151,2 \text{ мм}^3 = 14,15 \text{ см}^3,$$

$$V_3 = \frac{\pi \cdot 36^2 \cdot 138,6}{4} = 141077,6 \text{ мм}^3 = 141,1 \text{ см}^3,$$

$$V_4 = \frac{\pi \cdot 31,2^2 \cdot 33,7}{4} = 25764,9 \text{ мм}^3 = 25,7 \text{ см}^3.$$

$$V_{\text{заг2}} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4.$$

$$V_{\text{заг}} = 3,7 + 14,15 + 141,1 + 25,7 = 184,65 \text{ см}^3.$$

На основі попередніх розрахунків визначаємо маси заготовок:

– прокат:

$$Q_1 = 212,7 \cdot 7,8 = 1659,3 \text{ Г} = 1,66 \text{ кг}.$$

– штамповка:

$$Q_2 = 184,65 \cdot 7,8 = 1440,27 \text{ Г} = 1,44 \text{ кг}.$$

Коефіцієнт використання матеріалу:

$$K_{\text{в.м.}} = \frac{q}{Q}, \quad (3.7)$$

– прокат:

$$K_{\text{в.м.1}} = \frac{1,2}{1,66} = 0,72.$$

– штамповка:

$$K_{\text{в.м.2}} = \frac{1,2}{1,44} = 0,83.$$

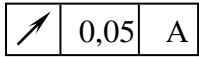
Порівнюючи коефіцієнти використання матеріалу та вартості заготовок для виготовлення вала використовуємо прокат.



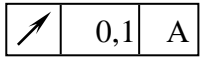
### 3.4. Формування технологічного процесу

Порівняння двох маршрутів механічної обробки вала КС6-07.608 із вибором оптимального надано в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Порівняння двох маршрутів механічної обробки вала КС6-07.608

№ пов.	Вид поверхні, позначення	Вихідні параметри деталі		Варіанти методів, маршрутів обробки поверхонь	
		Квалітет (ступінь точності)	Шорсткість, мкм	1	2
1	2	3	4	5	6
1	Зовнішня циліндрична поверхня $\varnothing 30k6 (+0,005)$ ; 	k6	Ra 1,25	Напівчистове точіння Напівчистове шліфування Чистове шліфування	Напівчистове точіння Чистове точіння Чистове шліфування
2, 15	Зовнішня циліндрична поверхня $\varnothing 30b12 (-0,16)$	b12	Rz 80	Напівчистове точіння	
3	Торцева поверхня $37 \pm 0,3$	IT14/2	Rz 80	Чорнова підрізка торця	
4	Квадрат $21h12(-0,21)$	h12	Rz 80	Фрезерування однократне	
5, 16	Фаска зовнішня $1 \times 45^\circ$	IT14/2	Rz 80	Точіння однократне	
6	Торцева поверхня $17 \pm 0,2$	IT14/2	Rz 80	Чорнова підрізка торця	
7	Зовнішня циліндрична поверхня $\varnothing 14h11(-0,11)$	h11	Rz 20	Напівчистове точіння	
8	Фаска зовнішня $0,6 \times 45^\circ$	IT14/2	Rz 80	Точіння однократне	
9, 19	Торцева поверхня $205 \pm 0,5$	IT14/2	Rz 80	Чорнова підрізка торця	Фрезерування

Закінчення таблиці 3.3

1	2	3	4	5	6
20	Шпонковий паз 5P9 ( $^{-0,006}$ ), 20h12( $_{-0,21}$ ), Rz 40 Ø 25; R0,25	P9	Rz 20	Фрезерування пазовою фрезою	
11, 13	Торцева поверхня 85h11( $_{-0,22}$ )	h11	Ra 2,5	Шліфування напівчистове	
14	Зовнішня циліндрична поверхня Ø 30h14( $_{-0,52}$ )	h14	Rz 80	Однократне точіння	
12	Зовнішня циліндрична поверхня Ø 36	h15	Rz 160	Не обробляється	
17	Зовнішня циліндрична поверхня Ø 28d11 ( $_{-0,195}^{0,065}$ ); 	d11	Rz 20	Напівчистове точіння з установкою в центрах	
18	Фаска зовнішня 1,6×45°	IT14/2	Rz 80	Точіння однократне	

Оптимальний маршрут обробки вала КС6-07.608.

005 Фрезерно-відрізна

Відрізати заготовку на фрезерно-відрізному верстаті.

010 Фрезерно-центрувальна

1. Фрезерувати торці 9, 19 послідовно.

2. Центрувати два центрові отвори послідовно на фрезерно-центрувальному верстаті.

015 Токарно-копіювальна

1. Точити попередньо поверхні 17, 15, 14, витримуючи розміри Ø31,5h14( $_{-0,62}$ ) ; l = 58,8 мм по копію.

2. Точити попередньо поверхню 17, витримуючи розміри Ø 28d11( $_{-0,195}^{0,065}$ ) ; l = 35 мм, остаточно поверхню 15, витримуючи розміри Ø 30h14( $_{-0,52}$ ) ;

1 = 10 мм, попередньо поверхню 14 з підрізкою торця 13, витримуючи розміри  $\varnothing 30,19h10_{(-0,10)}$ ; 1 = 14,6 мм, по копіру; точити фаску 16, витримуючи розмір  $1,6 \times 45^\circ$  і фаску 18, витримуючи розмір  $1 \times 45^\circ$  з поперечного супорта одночасно.

3. Перевірити розміри:  $\varnothing 31,5h14_{(-0,62)}$ ; 1 = 58,8 мм;  $\varnothing 28d11_{(-0,065)}^{(-0,195)}$ ; 1 = 35 мм;  $\varnothing 30h14_{(-0,52)}$ ; 1 = 10 мм;  $\varnothing 30,19h10_{(-0,10)}$ ; 1 = 14,6 мм;  $1,6 \times 45^\circ$ ;  $1 \times 45^\circ$ .

Контроль 30%.

020 Токарно-копіювальна

1. Точити попередньо поверхню 7, витримуючи розміри  $\varnothing 26h14_{(-0,52)}$ ; 1 = 17 мм; попередньо поверхні 1, 2, 4, витримуючи розміри  $\varnothing 31,5h14_{(-0,62)}$ ; 1 = 48,8 мм по копіру.

2. Точити попередньо поверхню 7, витримуючи розміри  $\varnothing 16h14_{(-0,43)}$ ; 1 = 17 мм; остаточно поверхні 4 і 2, витримуючи розміри  $\varnothing 30b12_{(-0,37)}^{(-0,16)}$ ; 1 = 47 мм; попередньо поверхню 1 з підрізкою торця 11, витримуючи розміри  $\varnothing 30,19h10_{(-0,10)}$ ; 1 = 14,6 мм по копіру.

3. Точити остаточно поверхню 7, витримуючи розміри  $\varnothing 14h11_{(-0,11)}$ ; 1 = 17 мм по копіру, точити фаску 8, витримуючи розмір  $0,6 \times 45^\circ$  і фаску 5, витримуючи розмір  $1 \times 45^\circ$  з поперечного супорта одночасно.

4. Перевірити розміри:  $\varnothing 26h14_{(-0,52)}$ ; 1 = 17 мм;  $\varnothing 31,5h14_{(-0,62)}$ ; 1 = 48,8 мм;  $\varnothing 16h14_{(-0,43)}$ ;  $\varnothing 30b12_{(-0,37)}^{(-0,16)}$ ; 1 = 47 мм;  $\varnothing 30,19h10_{(-0,10)}$ ; 1 = 14,6 мм;  $\varnothing 14h11_{(-0,11)}$ ; 1 = 17 мм;  $0,6 \times 45^\circ$ ;  $1 \times 45^\circ$ .

Контроль 30%.

025 Фрезерна напівавтоматна

1. Фрезерувати дві сторони поверхні 4 одночасно.
2. Поворот на  $90^\circ$ .
3. Фрезерувати наступні дві сторони поверхні 4 одночасно.

На консольно-фрезерному напівавтоматі.

030 Шпонково-фрезерна

Фрезерувати шпонковий паз 10 на шпонково-фрезерному напівавтоматі.

035 Шпонково-фрезерна

Фрезерувати шпонковий паз 20 на шпонково-фрезерному напівавтоматі.

040 Круглошліфувальна

1. Шліфувати попередньо поверхню 14 з шліфуванням торця 13.

2. Шліфувати остаточно поверхню 14 на круглошліфувальному напівавтоматі.

Операція 045 Круглошліфувальна

1. Шліфувати попередньо поверхню 1 з шліфуванням торця 11.

2. Шліфувати остаточно поверхню 1 на круглошліфувальному напівавтоматі.

050 Контроль.

### 3.5. Визначення припусків на оброблення

Розрахунки припусків для вала КС6-07.608 проведено із використанням відомих методик і табличних даних довідників (таблиця 3.4).

Таблиця 3.4 – Розрахункові припуски

Технологічні операції і переходи обробки поверхонь деталі	Квалітет (ступінь точності)	Шорсткість, мкм	Допуск, мм	Припуск, мм	Операційні (проміжні) розміри із граничними відхиленнями
1	2	3	4	5	6
Торцеві поверхня 205±0,5 мм					
Фрезерування	14	Rz 80	0,5	–	205±0,5
Заготовка	15	Rz 160	1,5	2 × 2 = 4	209±0,75
Торцева поверхня 85h11(-0,22), Ra 2,5					
Шліфування напівчистове	11	Ra 2,5	0,22	0,4 × 2 = 0,8	85 <sub>-0,22</sub>
Напівчистове точіння	12	Rz 20	0,35	0,8 × 2 = 1,6	85,8 <sub>-0,35</sub>
Заготовка	14	Rz 80	0,87	1,2 × 2 = 2,4	87,4 <sub>-0,87</sub>
Зовнішня циліндрична поверхня Ø 28d11 (-0,065) <sub>-0,195</sub> ; Rz 20					
Напівчистове точіння	11	Rz 20	0,1	1,75 × 2 = 3,5	Ø 28 <sub>-0,195</sub> <sup>-0,065</sup>
Чорнове точіння (зняття напуску)	14	Rz 80	0,62	2,25 × 2 = 4,5	Ø 31,5 <sub>-0,62</sub>

### Закінчення таблиці 3.4

1	2	3	4	5	6
Заготовка	15	Rz 160	1,4	$4,0 \times 2 = 8,0$	$\varnothing 36^{+0,4}_{-0,7}$
Зовнішня циліндрична поверхня $\varnothing 14h11(-0,11)$					
Напівчистове точіння	11	Rz 20	0,11	$1,0 \times 2 = 2,0$	$\varnothing 14_{-0,11}$
Чорнове точіння (зняття напуску)	14	Rz 80	0,43 0,52	$5,0 \times 2 = 10,0$ $5,0 \times 2 = 10,0$	$\varnothing 16_{-0,43}$ $\varnothing 26_{-0,52}$
Заготовка	15	Rz 160	1,4	$11,0 \times 2 = 22,0$	$\varnothing 36^{+0,4}_{-0,7}$
Зовнішня циліндрична поверхня $\varnothing 30b12(-0,16_{-0,37})$					
Напівчистове точіння	11	Rz 20	0,11	$0,75 \times 2 = 1,5$	$\varnothing 30^{-0,16}_{-0,37}$
Чорнове точіння (зняття напуску)	14	Rz 80	0,62	$2,25 \times 2 = 4,5$	$\varnothing 31,5_{-0,62}$
Заготовка	15	Rz 160	1,4	$3,0 \times 2 = 6,0$	$\varnothing 36^{+0,4}_{-0,7}$

### 3.6. Визначення режимів різання

Режими різання для конкретних операцій, ріжучі та допоміжні інструменти, моделі обладнання представлено в додатках.

Розрахунки режимів різання для операцій обробки вала КС6-07.608 проведено із використанням відомих методик і табличних даних довідників (таблиця 3.5).

Таблиця 3.5 – Таблиця режимів різання для операцій обробки вала КС6-07.608

Номер, назва операції, зміст переходу	t, мм	L, мм	i	T <sub>м</sub> , хв	S, мм/об	n, об/хв	V, м/хв	S <sub>м</sub> , мм/хв	T <sub>о</sub> , хв	N, кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
005 Фрезерно-відрізна										
Перехід 2 Відрізати заготовку, витримуючи розмір $209 \pm 0,75$	2,0	100	1	502	0,035 мм/ зуб	22	36	–	1,90	0,27

## Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
010 Фрезерно-центрувальна										
Перехід 2 Фрезерувати торці 9, 19, витримуючи розмір 205±0,5 послідовно	2,0	240	2	122	1,7	502	252	–	0,67	1,37
Перехід 3 Центрувати два центрові отвори, витримуючи розміри ∅2,5; l=6 мм послідовно	1,25	10	2	152	0,04	902	12,7	–	0,77	0,59
015 Токарно-копіювальна										
Перехід 2 Точити попередньо поверхні 17, 15, 14, витримуючи розміри ∅31,5h14 <sub>(-0,62)</sub> ; l = 58,8 мм по копіру	2,25	61,8	1	117	0,4	1254	126	–	0,14	2,4
Перехід 3 Точити попередньо поверхню 17, витримуючи розміри ∅ 28d11 <sub>(-0,065)</sub> ; l = 35 мм, остаточно поверхню 15, витримуючи розміри ∅ 30h14 <sub>(-0,52)</sub> ; l = 10 мм, попередньо поверхню 14 з підрізкою торця 13, витримуючи розміри ∅ 30,19h10 <sub>(-0,10)</sub> ; l = 14,6 мм, по копіру; точити фаску 16, витримуючи розмір 1,6×45° і фаску 18, витримуючи розмір 1×45° з поперечного супорта одночасно	1,75 (коп. суп.)	62,6	1	117	0,3	2044	194	–	0,1	5,1
	1,6 (поп. суп.)	4,2	1	117	0,15		184	–		
020 Токарно-копіювальна										

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<p>Перехід 2</p> <p>Точити попередньо поверхню 7, витримуючи розміри <math>\varnothing 26h14_{(-0,52)}</math>;  <math>l = 17</math> мм; попередньо поверхні 1, 2, 4, витримуючи розміри <math>\varnothing 31,5h14_{(-0,62)}</math>;  <math>l = 48,8</math> мм по копіру</p>	5,0	61,8	1	117	0,4	807	67	–	0,18	4,65
<p>Перехід 3</p> <p>Точити попередньо поверхню 7, витримуючи розміри <math>\varnothing 16h14_{(-0,43)}</math>;  <math>l = 17</math> мм; остаточно поверхні 4 і 2, витримуючи розміри <math>\varnothing 30b12_{(-0,16)}^{(-0,37)}</math>;  <math>l = 47</math> мм; попередньо поверхню 1 з підрізкою торця 11, витримуючи розміри <math>\varnothing 30,19h10_{(-0,10)}</math>;  <math>l = 14,6</math> мм по копіру.</p>	5,0	62,6	1	117	0,3	2044	102,6	–	0,12	5,4
<p>Перехід 4</p> <p>Точити остаточно поверхню 7, витримуючи розміри <math>\varnothing 14h11_{(-0,11)}</math>;  <math>l = 17</math> мм по копіру, точити фаску 8, витримуючи розмір <math>0,6 \times 45^\circ</math> і фаску 5, витримуючи розмір <math>1 \times 45^\circ</math> з поперечного супорта одночасно</p>	1,0 (коп. суп.)	20			0,3		91			
	1,0 (поп. суп.)	3	1	117		2044		–	0,03	2,65
Операція 025 Фрезерна напівавтоматна										





Закінчення таблиці 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Шліфувати остаточно поверхню 14, витримуючи розміри $\varnothing 30k6$ ; $l = 85,4h11_{(-0,22)}$	0,031	15	1	–	$S_{\Pi} = 0,005$ мм/об $S_o = 16$ мм/об	319	$V_{s,кол.}$ 30 м/хв $V_{s,позд}$ 5 м/хв	–	0,027	–
Операція 045 Круглошліфувальна										
Перехід 2 Шліфувати попередньо поверхню 1 з шліфуванням торця 11, витримуючи розміри $\varnothing 30,062h8$ ; $l = 85h11_{(-0,22)}$	0,064	15	1	–	$S_{\Pi} = 0,025$ мм/об $S_o = 24$ мм/об	128	$V_{s,кол.}$ 12 м/хв $V_{s,позд}$ 3 м/хв	–	0,017	8,4
Перехід 3 Шліфувати остаточно поверхню 1, витримуючи розміри $\varnothing 30k6$ ; $l = 85h11_{(-0,22)}$	0,031	15	1	–	$S_{\Pi} = 0,005$ мм/об $S_o = 16$ мм/об	318	$V_{s,кол.}$ 30 м/хв $V_{s,позд}$ 5 м/хв	–	0,027	–

Розрахунки технічних норм часу виготовлення вала КС6-07.608 проведено із використанням відомих методик і табличних даних довідників (таблиця 3.6).

Таблиця 3.6 – Норми часу виготовлення вала КС6-07.608

Номер та назва операції	$T_o$ , хв	Допоміжний час, $T_d$ хв			Оперативний час, $T_{оп}$ , хв	Час обслуговування, $T_{об}$ , хв		$T_{відп}$ , хв	$T_{штг}$ , хв
		$T_{в.з.}$	$T_y$	$T_B$		$T_{тех.об.}$	$T_{орг.об.}$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
005 Фрезерно-відрізна	1,89								2,85
010 Фрезерно-центрувальна	1,38								2,08
015 Токарно-копіювальна	0,22	0,08	0,26	0,168	0,72	0,0044	0,012	0,05	0,786

Закінчення таблиці 3.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
020 Токарно-копіювальна	0,32								0,43
025 Фрезерна напівавтоматна	0,12								0,18
030 Шпонково-фрезерна	0,36								0,54
035 Шпонково-фрезерна	0,35								0,53
040 Круглошліфувальна	0,041								0,064
045 Круглошліфувальна	0,041								0,064

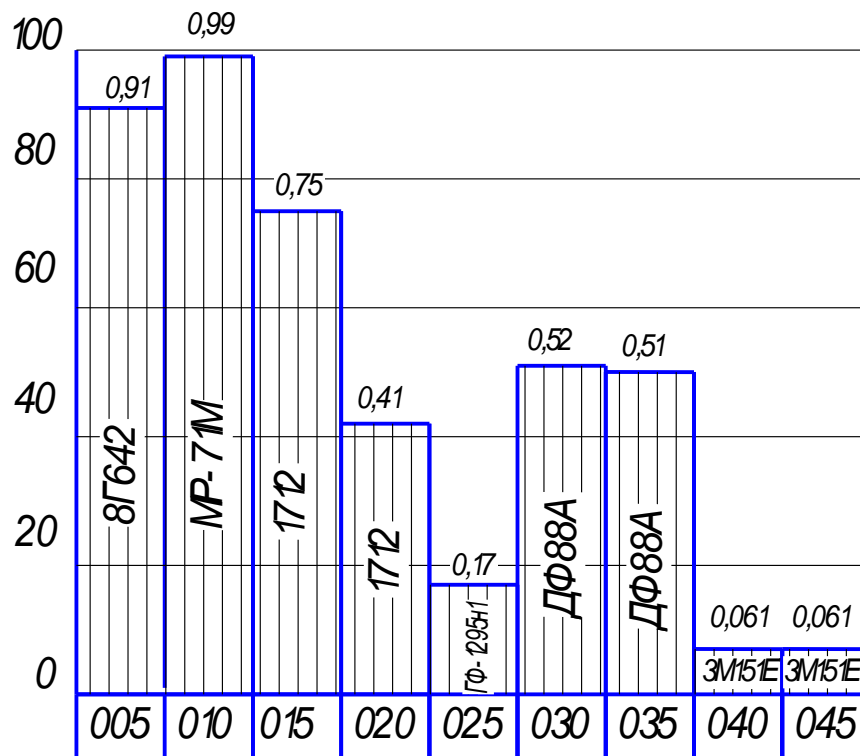


Рисунок 3.3 – Графік завантаження обладнання

### 3.7. Розрахунок пристосування

Для фрезерування квадрата 21<sub>0,21</sub> у валі КС6-07.608 на 025 горизонтально-фрезерній операції розроблено спеціальний пристрій, що представлений у

графічній частині із розрахунковою схемою на рис. 3.4. Проведемо розрахунок необхідної сили затиску заготовки для цієї операції.

Заготовка базується в пристосуванні по зовнішній циліндричній поверхні  $\varnothing 36 \begin{pmatrix} +0,4 \\ -0,7 \end{pmatrix}$  мм у затискній цанзі та по центрувальному отвору.

Умова рівноваги при дії моментів різання  $M_{\text{різ}}$  та моментів сил тертя, що виникають при затиску заготовки прихватами [23]:

$$KM_{\text{різ}} = \sum M_{\text{тр}}, \quad (3.8)$$

де  $K$  - коефіцієнт запасу.

Момент різання при фрезеруванні:

$$M_{\text{різ}} = P_z \cdot R_3, \quad (3.9)$$

де  $R_3 = 10,5$  мм – радіус фрезерування.

Моменти тертя, що виникають при затиску заготовки цангою [23]:

$$\sum M_{\text{тр}} = Q \cdot R \cdot f_1, \quad (3.10)$$

де  $f_1 = 0,2$ ;  $R = 18$  мм.

Із рівнянь (3.8) – (3.10) одержано силу затиску у цанзі:

$$Q = \frac{K \cdot P_z \cdot R_3}{f_1 \cdot R}. \quad (3.11)$$

Сила різання, що виникає при фрезеруванні:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^n \cdot z}{D^q \cdot n^w} \cdot K_{\text{мп}}, \quad (3.12)$$

де  $C_p = 261$ ;  $x = 0,9$ ;  $y = 0,8$ ;  $n = 1,1$ ;  $q = 1,1$ ;  $w = 0,1$  [20];

$t = 4,5$  мм;  $S_z = 0,1$  мм/зуб;  $B = 20$  мм;  $z = 4$ ;  $D = 20$  мм;  $n = 760$  хв<sup>-1</sup>;

$K_{M_p}$  – поправочний коефіцієнт.

$$K_{M_p} = \left( \frac{\sigma_B}{750} \right)^n, \quad (3.13)$$

$$\sigma_B = 550 \text{ МПа};$$

$$n = 0,3 \text{ [20];}$$

$$K_{M_p} = \left( \frac{550}{750} \right)^{0,3} = 0,9 \text{ [20].}$$

Отже,

$$P_z = \frac{10 \cdot 261 \cdot 4,5^{0,9} \cdot 0,1^{0,8} \cdot 20^{1,1} \cdot 4}{120^{1,1} \cdot 760^{0,1}} \cdot 0,9 = 413,8 \text{ Н.}$$

Коефіцієнт запасу  $K$  [20]:

$$K = 1,5 \cdot 1,0 \cdot 1,6 \cdot 1,0 \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 3,12.$$

Отже, сила затиску у цанзі для виконання операції:

$$Q = \frac{3,12 \cdot 413,8 \cdot 10,5}{0,2 \cdot 18} = 3765 \text{ Н.}$$

Перевірочний розрахунок сили затиску:

$$Q \leq W \cdot i - F_o, \quad (3.14)$$

де  $W$  – сила, що виникає на штоці пневмокамери.

Сила тяги пневмокамери із врахуванням підсилення за допомогою цанги [23]:

$$W = \frac{F_{шт}}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2} + \varphi\right)} - Q_1 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2} + \varphi\right) - 3F_n, \quad (3.15)$$

де  $F_n$  – сила стиснення пружини, Н,  $F_n = 50$  Н.

Сила стискання пелюстка цанги [14]:

$$Q_1 = 0,17 \cdot 10^3 \frac{t \cdot d^3 \cdot S_{\max}}{l^3}, \quad (3.16)$$

де  $l = 48$  мм;  $t = 4$  мм;  $d = 60$  мм;  $S_{\max} = 0,08 \dots 0,12$  мм.

Тоді

$$Q_1 = 0,17 \cdot 10^3 \frac{4 \cdot 60^3 \cdot 0,1}{48^3} = 133 \text{ Н.}$$

Сила, що виникає на штоці пневмокамери [14]:

$$F_{\text{шт}} = \frac{\pi}{16} \cdot (D + d)^2 \cdot p \cdot \eta, \quad (3.17)$$

$$F_{\text{шт}} = \frac{3,14}{16} \cdot (0,1 + 0,082)^2 \cdot 0,4 \cdot 10^6 \cdot 0,9 = 2340 \text{ Н.}$$

Тоді

$$W = \frac{2340}{\text{tg}\left(\frac{15}{2} + 8\right)} - 133 \text{tg}\left(\frac{15}{2} + 8\right) - 3 \cdot 50 = 8249 \text{ Н.}$$

Розглядаємо умову закріплення заготовки:

$$W > Q.$$

В нашому випадку  $W = 8249 \text{ Н} > Q = 3765 \text{ Н}$ .

Висновок: умова затиску заготовки вала КС6-07.608 на 025 горизонтально-фрезерній операції забезпечується.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1. Розробка заходів конструкторського і організаційного плану для боротьби із шумом

Боротьба із шумом на виробництві є однією з найскладніших проблем, оскільки джерела шуму різноманітні й потребують комплексу заходів технічного, організаційного і медичного характеру на всіх стадіях проектування, будівництва, експлуатації машин і устаткування. Відомі три основні напрямки боротьби з шумом:

1. Зменшення рівня шуму у джерелі виникнення, застосування раціональних конструкцій, нових матеріалів і технологічних процесів.
2. Звукоізоляція устаткування за допомогою глушників, резонаторів, кожухів, захисних конструкцій, оздоблення стін, стелі, підлоги тощо.
3. Використання засобів індивідуального захисту.

Дуже часто як супутній фактор шуму на робочих місцях виникає вібрація, тому система профілактичних засобів зниження шуму є комплексною проблемою загального захисту працюючих від механічних коливань.

Технологічні заходи охоплюють характеристику і розміщення устаткування і машин, вимоги до розрахунку характеристик шуму на стадії проектування, обмеження шуму звукопоглинаючих конструкцій і екранів, фільтровентиляційних установок, заміну технологічних процесів і механізмів на менш шумні, обладнання звукоізолюючих кабін операторів, дистанційне керування обладнанням, автоматизацію виробничих процесів зі зменшенням кількості операторів тощо.

Планувальні заходи передбачають ізоляцію шумних цехів від тихих приміщень, збільшення відстані між ними (на стадії проектування виробництва), розташування шумних цехів з підвітряного боку і торцем до фасаду інших будівель. Зелені насадження навколо шумних цехів і шумозахисна зона так само сприяють поглинанню шуму.

У виробничих умовах поряд із звукоізоляцією широко застосовують засоби звукопоглинання. З метою поглинання шуму приміщеннями цехів малого об'єму (400—500 м<sup>3</sup>) їх оздоблюють пористими матеріалами.

Позитивний ефект звукопоглинання дає застосування мінеральних плит, матів з базальтового волокна, штукатурки пінистої або зернистої структури тощо. У приміщеннях великого об'єму ефективні звукопоглинаючі бар'єри і об'ємні поглиначі (куби, конуси тощо), які підвішують над шумними агрегатами для зниження рівня шуму на 5-12 дБ. Застосування звукопоглинаючих матеріалів у комплексі із заміною устаткування в окремих випадках знижує рівень шуму до нормативного (ткацькі цехи).

У боротьбі з аеродинамічним шумом (вихлопи і всмоктування повітря пневматичними інструментами, компресорами, вентиляторами тощо) застосовують глушники різної конструкції, які поглинають шум вихлопу або всмоктування повітря, газів і парів. Вибір типу глушника залежить від рівня і спектрального складу шуму. Для гасіння високочастотного шуму застосовують активні глушники, в основу яких покладено принцип звукової енергії, для гасіння низькочастотного шуму — реактивні глушники, що працюють як акустичний фільтр. Якщо немає змоги забезпечити дотримання вимог технічного характеру, важливого значення набувають організаційно-профілактичні заходи — застосування індивідуальних засобів захисту органів слуху.

Засоби індивідуального захисту від шуму — протишуми використовують тоді, коли технічні засоби не забезпечують його зниження до безпечного рівня. Тип засобу протишуму вибирають за рівнем і спектром шуму. Застосовують десятки варіантів вкладишів (втулки, тампони тощо), навушники і шоломи для ізоляції зовнішнього слухового ходу від шуму різного спектрального складу. До протишумових вкладишів, які вставляють у слуховий хід, належать заглушки у вигляді тампонів, гумові ковпачки, циліндри із спеціального пінопласту, пластичні вкладиші (виготовлені індивідуально за формою слухового ходу), а також вкладиші одноразового використання. Ефективними вважаються вкладиші із суміші волокон органічної бактерицидної вати і ультратонких полімерних волокон — беруши.

Зручними щодо експлуатації і гігієни є протишумові навушники. Протишумові шоломи — громіздкі й дорогі, їх використовують при дуже високих рівнях шуму в комбінації з навушниками і протишумовими

костюмами. Використання засобів протишуму дає змогу уникнути не тільки зниження слуху, а й порушення функцій нервової системи.

Зменшення тривалості контакту з шумом, застосування раціонального режиму праці та відпочинку, періодичного короткочасного відпочинку від шуму протягом робочого дня, суміщення професій в умовах шуму і його відсутності значно знижують негативний вплив шуму. Для профілактики несприятливого впливу імпульсного шуму рекомендується заповнювати паузи між імпульсами рівним фоновим шумом. При цьому різниця між рівнями фону та імпульсного шуму не повинна перевищувати 20 дБ. З метою підготовки працівника до чергового імпульсу шуму використовують світлові застережні сигнали.

#### **4.2. Проведення рятувальних та інших невідкладних робіт на машинобудівному заводі при виникненні аварії**

Сутність рятувальних та інших невідкладних робіт — це усунення безпосередньої загрози життю та здоров'ю людей, відновлення життєзабезпечення населення, запобігання або значне зменшення матеріальних збитків. Мета проведення рятувальних робіт – порятунок людей і надання медичної допомоги постраждалим, ліквідація аварій. Рятувальні та інші невідкладні роботи включають також усунення пошкоджень, які заважають проведенню рятувальних робіт, створення умов для наступного проведення відновлювальних робіт.

До рятувальних робіт відносяться:

- розвідка маршруту руху сил, визначення обсягу та ступеня руйнувань, розмірів зон зараження, швидкості і напрямку розповсюдження зараженої хмари чи пожежі;
- локалізація та гасіння пожеж на маршруті руху сил та ділянках робіт;
- визначення об'єктів і населених пунктів, яким безпосередньо загрожує небезпека;
- визначення потрібного угруповання сил і засобів запобігання і локалізації



небезпеки;

- пошук уражених та звільнення їх з-під завалів, пошкоджених та палаючих будинків, із загазованих та задимлених приміщень;

- розкриття завалених захисних споруд та рятування з них людей;

- надання потерпілим першої допомоги та евакуація їх (при необхідності) у лікувальні заклади;

- вивіз або вивід населення із небезпечних місць у безпечні райони;

- організація комендантської служби, охорона матеріальних цінностей і громадського порядку;

- відновлення життєздатності населених пунктів і об'єктів;

- пошук, розпізнавання і поховання загиблих;

- санітарна обробка уражених;

- соціально-психологічна реабілітація населення.

До невідкладних робіт відносяться:

- прокладання колонних шляхів та улаштування проїздів (проходів) у завалах та на зараженій території;

- локалізація аварій на водопровідних, енергетичних, газових і технологічних мережах;

- ремонт та тимчасове відновлення роботи комунально-енергетичних систем і мереж зв'язку для забезпечення рятувальних робіт;

- зміцнення або руйнування конструкцій, які загрожують обвалом і безпечному веденню робіт;

Рятувальні та інші невідкладні роботи здійснюються у три етапи. На першому етапі вирішуються завдання:

- щодо екстреного захисту населення;

- з запобігання розвитку чи зменшення впливу наслідків;

- з підготовки до виконання рятувальних робіт.

Основними заходами щодо екстреного захисту населення є:

- оповіщення про небезпеку;

- використання засобів захисту;

- додержання режимів поведінки;
- евакуація з небезпечних у безпечні райони;
- здійснення санітарно-гігієнічної, протиепідемічної профілактики і надання медичної допомоги;

- локалізація аварій;
- зупинка чи зміна технологічного процесу виробництва;
- попередження (запобігання) і гасіння пожеж,

На другому етапі проводяться:

- пошук потерпілих;
- витягання потерпілих з-під завалів, з палаючих будинків, пошкоджених транспортних засобів;

- евакуація людей із зони лиха, аварії, осередку ураження;
- надання медичної допомоги;
- санітарна обробка людей;
- знезараження одягу, майна, техніки, території;
- проведення інших невідкладних робіт, що сприяють і забезпечують здійснення рятувальних робіт.

На третьому етапі вирішуються завдання щодо забезпечення життєдіяльності населення у районах, які потерпіли від наслідків надзвичайних ситуацій:

- відновлення чи будівництво житла;
- відновлення енерго-, тепло-, водо-, газопостачання, ліній зв'язку;
- організація медичного обслуговування;
- забезпечення продовольством і предметами першої необхідності;
- знезараження харчів, води, фуражу, техніки, майна, території;
- соціально-психологічна реабілітація;
- відшкодування збитків;
- знезараження майна, території, техніки.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі представлено дослідження динаміки розточування перервних отворів. Виведено систему диференціальних рівнянь. При цьому розв'язок представлено у вигляді числових даних та графіків. На основі побудованих графіків встановлено, що для випадку коли врізання другого різця у перервну поверхню отвору заготовки проходить під час різання першим різцем поверхні отвору максимальна величина радіальної деформації розточної оправки становить 0,015 мм, а швидкість деформації – 14 мм/с. Для випадку коли врізання другого різця у перервну поверхню отвору заготовки проходить під час розміщення першого різця навпроти розриву поверхні отвору максимальна величина радіальної деформації розточної оправки становить 0,0175 мм, а швидкість деформації – 18 мм/с. Для випадку, коли врізання протилежно розташованих на розточній оправці різців у перервну поверхню отвору заготовки проходить одночасно ці величини рівні нулю. Отже, ідеальним варіантом є процес різання із одночасним врізанням різців. У випадку коли не можливо забезпечити цей варіант, кращим варіантом є випадок коли врізання другого різця у перервну поверхню отвору заготовки проходить під час різання першим різцем поверхні отвору.

Найбільший кут деформації розточної оправки складає 0,004 рад., при цьому максимальна швидкість деформації становить 1,4 рад/с.

Представлено результати експериментальних досліджень відхилення від круглості циліндричного сектора перервної поверхні після розточування. Зроблено висновки, що найбільший вплив на відхилення від круглості  $\Delta R$  циліндричного сектора перервної поверхні отворів, сформованих у заготовках із сталі 45 після розточування має подача одного розточного різця на один оберт оправки  $S$ , а найменший вплив має швидкість різання розточним різцем  $V$ . При збільшенні подачі одного розточного різця на один оберт оправки  $S$  та глибини різання розточним різцем  $t$  відхилення від круглості  $\Delta R$  циліндричного сектора перервної поверхні отворів після розточування зростає, а при

збільшенні швидкості різання розточним різцем  $V$  – зменшується.

Максимальне значення відхилення від круглості  $\Delta R$  циліндричного сектора перервної поверхні отворів після розточування становить 0,031 мм, а мінімальне - 0,016 мм. Збільшення подачі одного розточного різця на один оберт оправки  $S$  від 0,1 мм/об до 0,4 мм/об призводить до зростання відхилення від круглості  $\Delta R$  на 19%. Збільшення глибини різання розточним різцем  $t$  від 0,1 мм до 0,5 мм призводить до зростання відхилення від круглості  $\Delta R$  на 15%, а збільшення швидкості різання розточним різцем  $V$  від 60 до 90 м/хв призводить до зменшення відхилення від круглості  $\Delta R$  на 7%.

Вдосконалено технологічний процес виготовлення вала КС6-07.608. Проведено розрахунок заготовки, розроблено схеми базування, підібрано інструменти, обладнання, режими різання, спроектовано пристосування.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кухарський О. М., Кушак І. В. Методичний посібник до курсового проекту по курсу “Технологія машинобудування”. Тернопіль, 2001. 58 с.
2. Классификатор ЕСКД. Иллюстрированный определитель деталей. Классы 71,72,73,74,75,76 (в отдельных книгах). М.: Издательство стандартов, 1986. 235 с.
3. Орлова П. Н., Скороходова Е. А. Краткий справочник металлиста. М.: Машиностроение, 1986. 456 с.
4. Боженко Л. І. Технологія виробництва заготовок у машинобудуванні. Київ: НМК ВО, 1990. 264 с.
5. Дьячков В. Б. Специальные металлорежущие станки общемашиностроительного применения: справочник. М.: Машиностроение, 1983. 328 с.
6. Косилова А. Г., Мещеряков Р. К. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. М. : Машиностроение, 1985. Т. 2. 496 с.
7. Кухарський, О. М., Кузьмін М. І. Визначення припусків табличним методом. Тернопіль : Видавництво ТДТУ, 2004. 135 с.
8. Паливода Ю. Є., Кухарський О. М. Визначення припусків розрахунково-аналітичним методом, Тернопіль, 2003. 81 с.
9. Косилова А.Г., Мещеряков Р. К. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. М. : Машиностроение, 1985. Т. 1. 1986. 656 с.
10. Барановский Ю. В. Режимы резания металлов. М.: Машиностроение, 1972. 258 с.
11. Паливода Ю. Є., Ткаченко І. Г., Капаціла Ю. Б., Гевко Ів. Б. Технологія оброблення корпусних деталей : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2016. 156 с.
12. Горбачевич А. Ф. Курсовое проектирование по технологии машиностроения. Минск: Вышэйшая школа, 1975. 288 с.
13. Итин А. М., Родичев Ю. Я. Наладка и эксплуатация токарных многошпиндельных полуавтоматов. М. : Машиностроение, 1977. 136 с.

14. Ансеров М. А. Приспособления для металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1966. 650 с.
15. Горошкин А. К. Приспособления для металлорежущих станков. Справочник. М.: Машиностроение, 1965. 461 с.
16. Кухарський О. М. Методичні вказівки на тему “Проектування калібра-пробки, калібра-скоби” для виконання конструкторської частини дипломного проекту. Тернопіль, 2005.
17. Жидецький В. Ц., Джигирей В. Ц., Мельников О. В. Основи охорони праці : навчальний посібник. Львів: Афіша, 2000. 350 с.
18. Жидецький В. Ц. Практикум із охорони праці : навчальний посібник. Львів: Афіша, 2000. 349 с.
19. Паливода Ю. Є., Ткаченко І. Г., Капаціла Ю. Б. Технологія оброблення валів : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2016. 198 с.
20. Паливода Ю.Є., Дячун А.Є., Лещук Р.Я. Інструментальні матеріали, режими різання і технічне нормування механічної обробки : навчальний посібник. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. 240 с.
21. Березіцький О.В. Результати експериментальних досліджень розточування перервних поверхонь / О.В. Березіцький, А.Є. Дячун, В.Т. Сисюк // Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій": 24-25 листопада 2021 р.: тези доп. Тернопіль: вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. С. 31.
22. Dai Gil Lee, Hui Yun Hwang, Jin Kook Kim, Design and manufacture of a carbon fiber epoxy rotating boring bar, Composite Structures 60 (2003) 115–124.
23. Дячун А. Є. Методичний посібник з виконання курсового проекту з дисципліни «Технологія обробки типових деталей та складання машин» / А. Є. Дячун, Ю. Б. Капаціла, Ю. Є. Паливода, І. Г. Ткаченко. Тернопіль : ТНТУ, 2016. 75 с.
24. Дичковський М. Г. Технологічна оснастка. Проектно-конструкторські розрахунки пристосувань: навч. посіб. Тернопіль : ТДТУ, 2001. 277 с.

25. H. Moradi, F. Bakhtiari-Nejad, M.R. Movahhedy, Tunable vibration absorber design to suppress vibrations: an application in boring manufacturing process, *Journal of Sound and Vibration* 318 (2008) 93–108.

26. Min Wang, Renyuan Fei, Chatter suppression based on nonlinear vibration characteristic of electrorheological fluids, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39 (1999) 1925–1934.

27. G. Subramani, R. Suvada, S.G. Kapoor, R.G. DeVor, W. Meingast, A model for the prediction of force system for cylinder boring process, in: *Proceedings of the XV NAMRC, 1987*, pp. 439–446.

28. N.Z. Yussefian, B. Moetakef-Imani, H. El-Mounayri, The prediction of cutting force for boring process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48 (2008) 1387–1394.

29. B. Moetakef-Imani, N.Z. Yussefian, Dynamic simulation of boring process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49 (2009) 1096–1103.

30. Гудь В.З. Технологічне забезпечення виготовлення нежорстких гвинтових заготовок: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Гудь Віктор Зіновійович ; Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя. - Т., 2006. - 212 с.

31. Hevko I., Diachun A., Lyashuk O., Vovk Y., Hupka A. (2021) Study of Dynamic and Power Parameters of the Screw Workpieces with a Curved Profile Turning. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham.* [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7\\_38](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_38).

32. Study of Dynamic and Power Parameters of the Screw Workpieces with a Curved Profile Turning / Ivan Hevko, Andrii Diachun, Oleg Lyashuk, Yuriy Vovk, Andriy Hupka // *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange. IV. DSMIE 2021.* - Springer, Cham., 2021. - p. 385-394.

33. Луців І.В. Розробка алгоритмів створення багатолезового оснащення адаптивного типу для обробки поверхонь обертання / І.В. Луців, Р.Я.Лещук // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць.* – Краматорськ, вип. №26, 2009. С.164 - 171.

34. Луців І.В. Динамічні характеристики підсистем верстатного оснащення адаптивного типу / І.В. Луців, Р.Я.Лещук // Вісник Тернопільського державного технічного університету, 2009, Том 14, №4. С.144-149.

35. Гевко І.Б Техніко-економічне обґрунтування процесу механічної обробки з використанням комбінованого свердла-мітчика / І.Б.Гевко, Р.Я., Лещук, І.І.Стойко, Н.М.Марчук, М.Д.Сіправська // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст.–Вип. 40.–Луцьк, 2018. С.21-31.