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 ШР9.419.417 з дослідженням процесу різання дисковою фрезою

Виконав: студент VI курсу, групи МПмз-61
спеціальності 131 “Прикладна механіка”
(шифр і назва спеціальності)

		Стаднійчук М.В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник		Сенчишин В.С.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Нормоконтроль		Дячун А.Є.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри		Окіпний І.Б.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Рецензент		
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2023

РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи: “Розроблення технології виготовлення вала ШР9.419.417 з дослідженням процесу різання дисковою фрезою”.

У кваліфікаційній роботі проведено дослідження динаміки різання циліндричної заготовки дисковою фрезою. Представлено схему динамічної моделі процесу різання циліндричної заготовки дисковою фрезою на фрезерно-відрізному верстаті. Дослідження деформацій та динамічних навантажень на конструктивні елементи різання циліндричної заготовки дисковою фрезою з достатньою для інженерних розрахунків точністю проведено на основі виведення системи диференціальних рівнянь, що визначають вплив зовнішніх навантажень на деформації елементів системи та їх розв’язку чисельними методами.

Для розв’язку системи диференціальних рівнянь з нульовими початковими умовами використано прикладне програмне забезпечення, що має підпрограму чисельного методу Рунге-Кутта. Розв’язок представлено у вигляді графіків зміни: кутової деформації, швидкості кутової деформації та динамічного навантаження дискової відрізної фрези в часі; лінійної деформації та швидкості деформації циліндричної заготовки в часі; кутової деформації оправки для кріплення дискової фрези в часі.

Представлено результати експериментальних досліджень відхилення від перпендикулярності торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою. Визначено, найбільший вплив на відхилення від перпендикулярності торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою має товщина фрези. Менший вплив має діаметр циліндричної заготовки і найменший - подача на зуб фрези. Виведено рівняння регресії залежності відхилення від перпендикулярності торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою від параметрів процесу.

Вдосконалено технологічний процес виготовлення вала ШР9.419.417.

ЗМІСТ

Вступ .....

1 Аналітична частина

1.1. Аналіз стану питання.....

1.2. Висновки та постановка завдань.....

2 Науково-дослідна частина

2.1. Дослідження динаміки різання циліндричної заготовки дисковою фрезою.....

2.2. Результати експериментальних досліджень відхилення від перпендикулярності торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою.....

2.3. Висновки.....

3 Технологічно-конструкторська частина

3.1. Службове призначення деталі.....

3.2. Вибір способу одержання заготовки.....

3.3. Формування технологічного процесу .....

3.4. Визначення припусків на оброблення.....

3.5. Визначення режимів різання.....

3.6. Розрахунок пристосування.....

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Висновки.....

Перелік посилань.....

Додатки

ВСТУП

Процес різання дисковими фрезами широко використовується у сучасному машинобудуванні, зокрема при розрізанні прокату різної форми для виготовлення одиничних заготовок а також для формування різноманітних канавок на поверхнях деталей машин.

Особливістю різання циліндричної заготовки дисковою фрезою є те, що при різанні заготовок великого діаметра застосовуються відрізні дискові фрези із радіусом, що майже в два рази перевищує діаметр заготовки, при цьому ширина таких фрез є порівняно малою з метою скорочення витрат матеріалів у стружку та енергоресурсів за рахунок зменшення сил різання. Використання фрез великого діаметра із малою товщиною знижує їх жорсткість, а відповідно і точність та шорсткість торцевої зрізаної поверхні заготовки. Також в процесі різання змінюється жорсткість заготовки за рахунок зменшення площі поперечного перерізу заготовки у площині різання, що впливає на амплітуду коливань заготовки при дії сил різання, а відповідно – на якість обробленої поверхні.

Основною вимогою використання таких інструментів є забезпечення точності поверхні після різання, підвищення продуктивності, забезпечення значної стійкості інструменту та стабільності процесу різання із використанням верстатів з ЧПК. Тому дослідження процесу різання дисковими фрезами є актуальним завданням.

Актуальним є також розроблення технологічного процесу виготовлення вала ШР9.419.417.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Аналіз стану питання

Процес різання дисковими фрезами широко використовується у сучасному машинобудуванні, зокрема при розрізанні прокату різної форми для виготовлення одиничних заготовок а також для формування різноманітних канавок на поверхнях деталей машин (рис. 1.1). Основною вимогою використання таких інструментів є забезпечення точності поверхні після різання, підвищення продуктивності, забезпечення значної стійкості інструменту та стабільності процесу різання із використанням верстатів з ЧПК. Тому дослідження процесу різання дисковими фрезами є актуальним завданням.

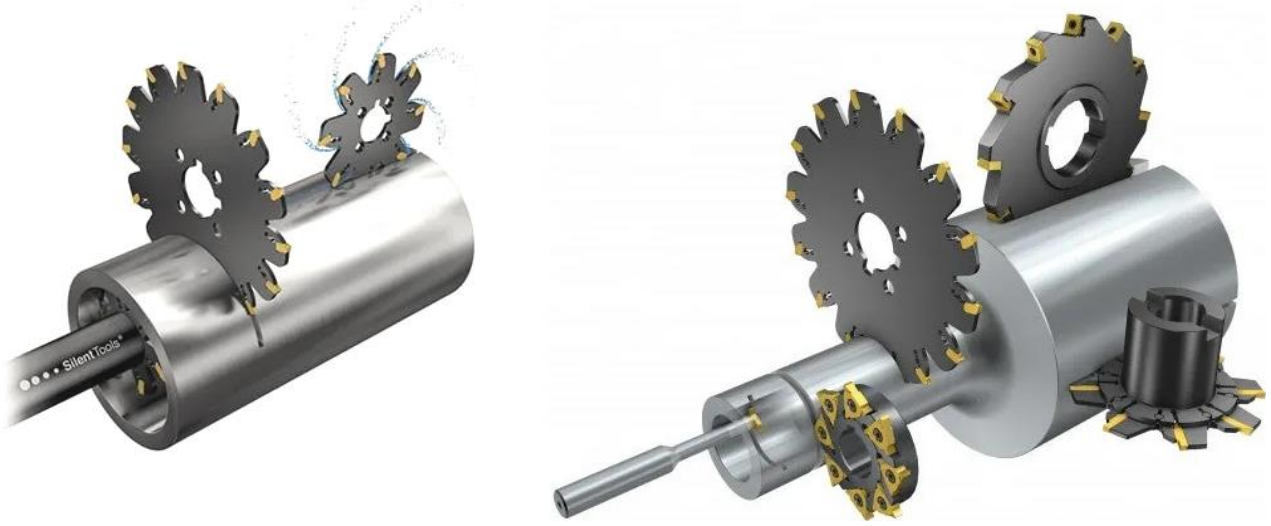


Рисунок 1.1 – Процеси різання дисковими фрезами [12]

Особливістю формування канавок і відрізання заготовок дисковими фрезами є те, що процес різання виконується одночасно декількома зубами, супроводжується ударними навантаженнями в умовах обмеженого простору з ускладненими умовами відведення стружки і виникненням вібрацій інструменту та заготовки.

Значний вклад у розвиток теоретичних основ та практичного застосування

дискових фрез зробили науковці: Н.С. Равська, В.Г. Панчук, П.Р. Родін, Н. А. Нощенко, О. М. Розенберг, С. В. Майданюк, О. В. Рублюк, А.Є. Бабенко та інші.

Основною причиною відмов при застосуванні тонких дискових фрез є руйнування і зношування ріжучих пластин, руйнування ріжучих зубів і диска фрези, що зумовлено дією динамічних навантажень в процесі різання а також утрудненим відведенням стружки.

На сайті компанії Sandvik [12] вказано, що однією із проблем процесу різання дисковою фрезою канавок є відведення стружки із зони різання. Неправильне відведення стружки знижує продуктивність та ефективність процесу різання канавки або розрізання заготовок, знижує якість оброблених поверхонь, може викликати руйнування інструменту, особливо при механічній обробці вузьких та глибоких канавок. Для вирішення цієї проблеми запропоновано дискові фрези серії CoroMill® QD із внутрішнім підведенням мастильно-охолоджуючої рідини під тиском. Завдяки формі ріжучих пластин утворюється вузька стружка, яка вимивається мастильно-охолоджуючою рідиною із обробленої канавки, що дозволяє зберігати цінні інструменти та виробничий час. Такі інструменти дозволяють нарізати канавки із співвідношенням глибини канавки до ширини канавки, що дорівнює до 15 із забезпеченням хорошої якості поверхні. Компанією Sandvik виготовляються відрізні фрези дискового типу (рис. 1.2 а) та з оправкою (рис. 1.2 б).

а) б)

Рисунок 1.2 – Відрізні фрези дискового типу а) та з оправкою б) [12]

Фрези дискового типу виготовляються діаметром від 63 мм до 160 мм із канавками для підведення мастильно-охолоджуючої рідини, та діаметром від 63 мм до 315 мм без канавок для підведення мастильно-охолоджуючої рідини. Мінімальний діаметр відрізні фрез з оправкою становить 63 мм.

Компанією Seco [15] розроблено різні серії дискових відрізних фрез, зокрема фрези серії 335.19 (рис. 1.3) дозволяють нарізати канавки або відрізати заготовки із шириною канавки від 4 мм до 12 мм. Діаметр фрез становить від 40 мм до 250 мм. Радіус заокруглення при вершинах ріжучих пластин від 0,2 мм до 6 мм.

а) б)

Рисунок 1.3 – Відрізні дискові фрези а) та ріжуча пластина б) компанії Seco [15]

У статті [18] проведено дослідження зміни сил різання при відрізанні заготовок дисковими фрезами із такими геометричними параметрами: кут нахилу різальної кромки від -30º до 30º, головний кут в плані від 50º до 90º, частота обертання фрези від 16 об/хв до 64 об/хв, діаметр фрези від 200 мм до 315 мм; товщина фрези від 1,6 мм до 3,2 мм, кількість зубів фрези від 40 шт. до 180 шт.

В результаті комп’ютерного моделювання побудовані графіки залежності сили різання при відрізанні дисковою фрезою від геометричних параметрів

фрези (рис. 1.4)

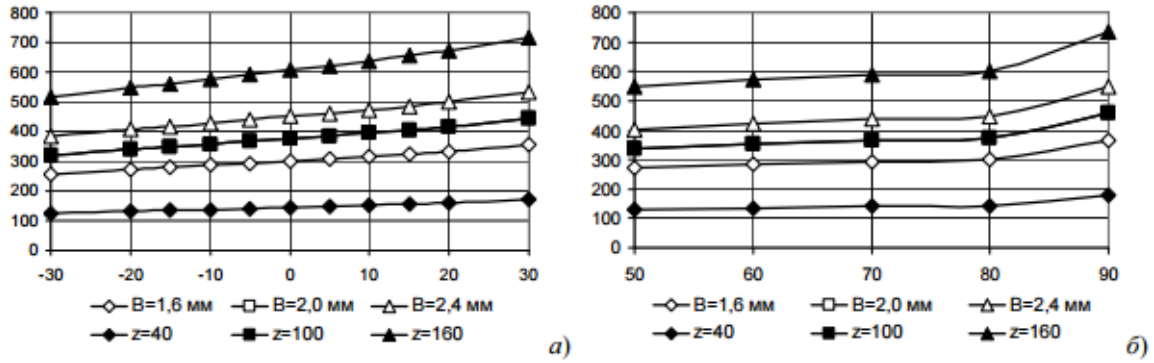


Рисунок 1.4 – Графіки залежності сили різання при відрізанні дисковою фрезою від кута нахилу різальної кромки а) та головного кута в плані [18]

Також у статті [18] розглянуто особливості зміни сили різання в часі (рис. 1.5), що зумовлено одночасним періодичним врізанням та виходом декількох зубів фрези у заготовку а також похибкою закріплення фрези на оправку.

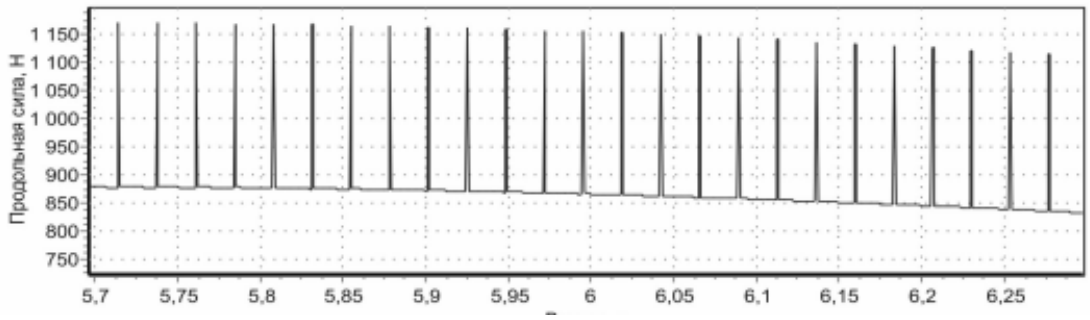


Рисунок 1.5 – Графік зміни сили різання дисковою відрізною фрезою в часі [18]

У статті [19] розроблено методику розрахунку сили різання при відрізанні дисковою фрезою. Схема дії сил на зуби дискової відрізної фрези показана на рис. 1.6. Особливістю розробленої методики є те, що кожна із складових сил різання складається із суми елементарних сил різання при поділі ділянки різання фрезою на елементарні ділянки із врахуванням пластичності оброблюваного матеріалу.

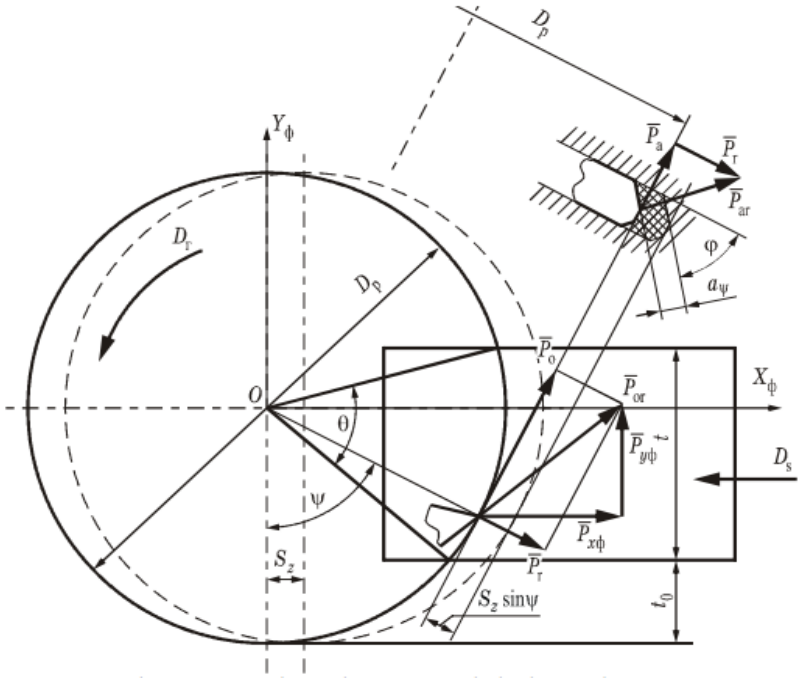


Рисунок 1.6 – Схема дії сил на зуби дискової відрізної фрези [19]

Точність процесу фрезерування дисковою фрезою визначається траєкторією руху ріжучих зубів, що складається із трьох основних компонентів: подача фрези, обертання зубів фрези та коливання усієї системи. У загальному амплітуда коливань є набагато меншою ніж допуски на механічну обробку, тому не береться до уваги при плануванні траєкторії руху інструменту та виборі режимів різання. Проте, якщо динамічна жорсткість фрезерної системи є низькою, величина таких вібрацій може досягати соті і навіть десяті частини міліметра, чим не можна нехтувати. У такому випадку відбуваються автоколивання інструменту, погіршується геометрична точність та шорсткість оброблених поверхонь. Тому дослідження динаміки фрезерування широко вивчається як у наукових колах так і у виробництві, починаючи із 1950 років.

Дослідженню динаміки фрезерування адресовано значну частину праць, проте через складність такого процесу та особливостей використання дискових фрез при формуванні канавок необхідні додаткові дослідження. У працях Martellotti, Tlusty [21], DeVor [22] розглянуто геометричні параметри процесу фрезерування а також механічні моделі сил різання. У вказаних роботах заготовка та інструментальна система прийняті як жорсткі елементи, тому

вплив структурних вібрацій на сили різання не розглядались. При існуванні структурних вібрацій в процесі фрезерування відносний рух між інструментом та заготовкою впливає на товщину шару стружки що зрізається. При цьому відбувається відбуваються коливання сил різання, що призводить до додаткових коливань структури інструмент-заготовка та зміни товщини стружки. Такий процес має закриту динаміку. Що призводить до автоколивань.

У роботах Tobias, Tlusty розроблено теорії, що дозволяють прогнозувати режими фрезерування, при яких не виникають автоколивання при відомих значеннях жорсткості системи, напрямку сил різання і переміщень інструменту та заготовки. Однак процес фрезерування має складну геометрію із змінним напрямком сил різання та жорсткості елементів. У роботах проведено моделювання коливань фрези в часі з визначенням режимів виникнення автоколивань та втрати контакту між інструментом та заготовкою.

У роботі [23] розроблено модель процесу фрезерування дисковою фрезою із врахуванням складної геометрії інструменту та вібрацій заготовки та інструменту у будь-якому напрямку. Заготовка та елементи інструменту представлені дискретними еквівалентними масами, жорсткостями та коефіцієнтами демпфування у схематичній динамічній моделі (рис. 1.7)

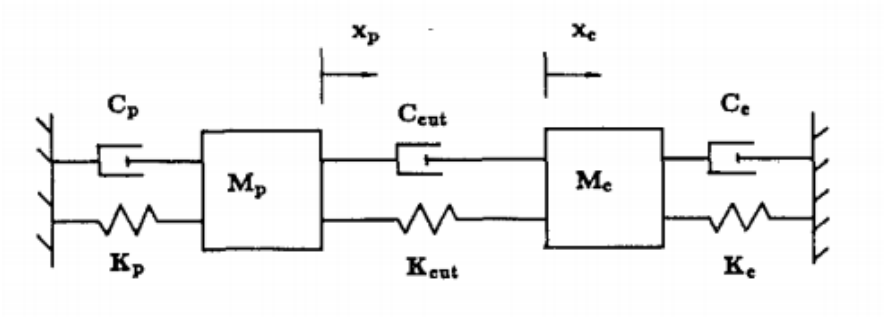


Рисунок 1.7 – Схематична динамічна модель процесу фрезерування [23]

Структурні параметри процесу представлено у матричній формі з метою представлення декількох степенів вільності у площині різання. Заготовка та інструмент взаємодіють між собою через жорсткість різання (K_{cut}) та демпфування процесу різання (C_{cut}), що також представлені у матричній формі. Величини жорсткості та демпфування різання є змінними при зміні товщини

зрізуваного шару заготовки та місця розташування ріжучих кромок зубів заготовки що залежать від вібрацій. Параметри процесу змінюються в часі та мають нелінійний характер, що ускладнює аналітичний розв'язок. У роботі [23] розроблено новий підхід щодо моделювання механіки та кінематики процесу фрезерування. Модель дозволяє прогнозувати топографію обробленої поверхні, сили різання в напрямку подачі зубів фрези в у напрямку нормалі, одночасну величину вібрацій інструмента та заготовки. Представлено розрахунок динамічної зміни шару металу, що зрізається з метою визначення сили різання та шорсткості обробленої поверхні.

Багатьма авторами запропоновано різноманітні схеми контролю вібрацій під час фрезерування, серед яких є оптимізація режимів різання, проектування і вдосконалення геометрії інструменту, використання спеціальних пристроїв.

Рівняння динаміки процесу фрезерування можна представити диференціальним рівнянням [25]:

$$M\ddot{Q}(t) + C\dot{Q}(t) + KQ(t) = F(t, Q(t), Q(t - \tau(t)), \dot{Q}(t)), \quad (1.1)$$

де M, C, K – матриці мас, демпфування та жорсткості відповідно;

$Q(t)$ - зміщення під час вібрацій;

F – сила різання, що є функцією часу t, поточного зміщення під час вібрацій $Q(t)$, попереднього зміщення під час вібрацій $Q(t - \tau(t))$ та швидкості вібрацій $\dot{Q}(t)$.

Розмір рівняння (1.1) залежить від кількості мас та напрямків вібрування, що розглядаються. Сили різання зазвичай спрощується до сконцентрованої сили що діє на вільній ріжучій частині інструменту.

1.2. Висновки та постановка завдань

Процес різання дисковими фрезами широко використовується у сучасному машинобудуванні, зокрема при розрізанні прокату різної форми для

виготовлення одиничних заготовок а також для формування різноманітних канавок на поверхнях деталей машин (рис. 1.1). Основною вимогою використання таких інструментів є забезпечення точності поверхні після різання, підвищення продуктивності, забезпечення значної стійкості інструменту та стабільності процесу різання із використанням верстатів з ЧПК. Тому дослідження процесу різання дисковими фрезами є актуальним завданням.

Точність процесу фрезерування дисковою фрезою визначається траєкторією руху ріжучих зубів, що складається із трьох основних компонентів: подача фрези, обертання зубів фрези та коливання усієї системи. У загальному амплітуда коливань є набагато меншою ніж допуски на механічну обробку, тому не береться до уваги при плануванні траєкторії руху інструменту та виборі режимів різання. Проте, якщо динамічна жорсткість фрезерної системи є низькою, величина таких вібрацій може досягати соті і навіть десяті частини міліметра, чим не можна нехтувати. У такому випадку відбуваються автоколивання інструменту, погіршується геометрична точність та шорсткість оброблених поверхонь. Тому дослідження динаміки фрезерування є актуальним завданням.

У кваліфікаційній роботі вирішуються такі завдання:

1. Провести дослідження динаміки різання циліндричної заготовки дисковою фрезою.

2. Розробити схему динамічної моделі процесу різання циліндричної заготовки дисковою фрезою на фрезерно-відрізному верстаті.

3. Вивести систему диференціальних рівнянь, що визначають вплив зовнішніх навантажень на деформації елементів системи при фрезеруванні дисковою фрезою та їх розв’язати її чисельними методами.

4 Представити результати експериментальних досліджень з виведенням рівняння регресії залежності відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою від діаметра циліндричної заготовки D, подачі S_z на зуб фрези та товщини фрези B.

5. Вдосконалити відомий технологічний процес виготовлення вала ШР9.419.417.

2 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

2.1. Дослідження динаміки різання циліндричної заготовки дисковою фрезою

Особливістю різання циліндричної заготовки дисковою фрезою є те, що при різанні заготовок великого діаметра застосовуються відрізні дискові фрези із радіусом, що майже в два рази перевищує діаметр заготовки, при цьому ширина таких фрез є порівняно малою з метою скорочення витрат матеріалів у стружку та енергоресурсів за рахунок зменшення сил різання. Використання фрез великого діаметра із малою товщиною знижує їх жорсткість, а відповідно і точність та шорсткість торцевої зрізаної поверхні заготовки. Також в процесі різання змінюється жорсткість заготовки за рахунок зменшення площі поперечного перерізу заготовки у площині різання, що впливає на амплітуду коливань заготовки при дії сил різання, а відповідно – на якість обробленої поверхні.

Тому виникає необхідність в дослідженні динаміки різання циліндричної заготовки дисковою фрезою для визначення і прогнозування деформацій інструмента, заготовки, конструктивних елементів верстата та пристрою для базування та закріплення заготовки.

Дослідження деформацій та динамічних навантажень на конструктивні елементи процесу різання циліндричної заготовки дисковою фрезою з достатньою для інженерних розрахунків точністю можна провести на основі виведення системи диференціальних рівнянь, що визначають вплив силових параметрів процесу на деформації елементів системи. Для розв’язку системи диференціальних рівнянь доцільно застосувати чисельні методи, оскільки аналітичні розрахунки є надто громіздкими для практичного застосування.. Для ідеалізації системи відкинуто другорядні фактори процесу різання циліндричної заготовки дисковою фрезою, які можна враховувати, застосовуючи коефіцієнт запасу.

На рисунку 2.1 представлено схему динамічної моделі процесу різання циліндричної заготовки дисковою фрезою на фрезерно-відрізному верстаті із базуванням та затиском заготовки на двох призмах, що прикріплені на базовій плиті пристрою. Затиск деталі здійснюється двома прихватами (на рис. 2.1 не показано).

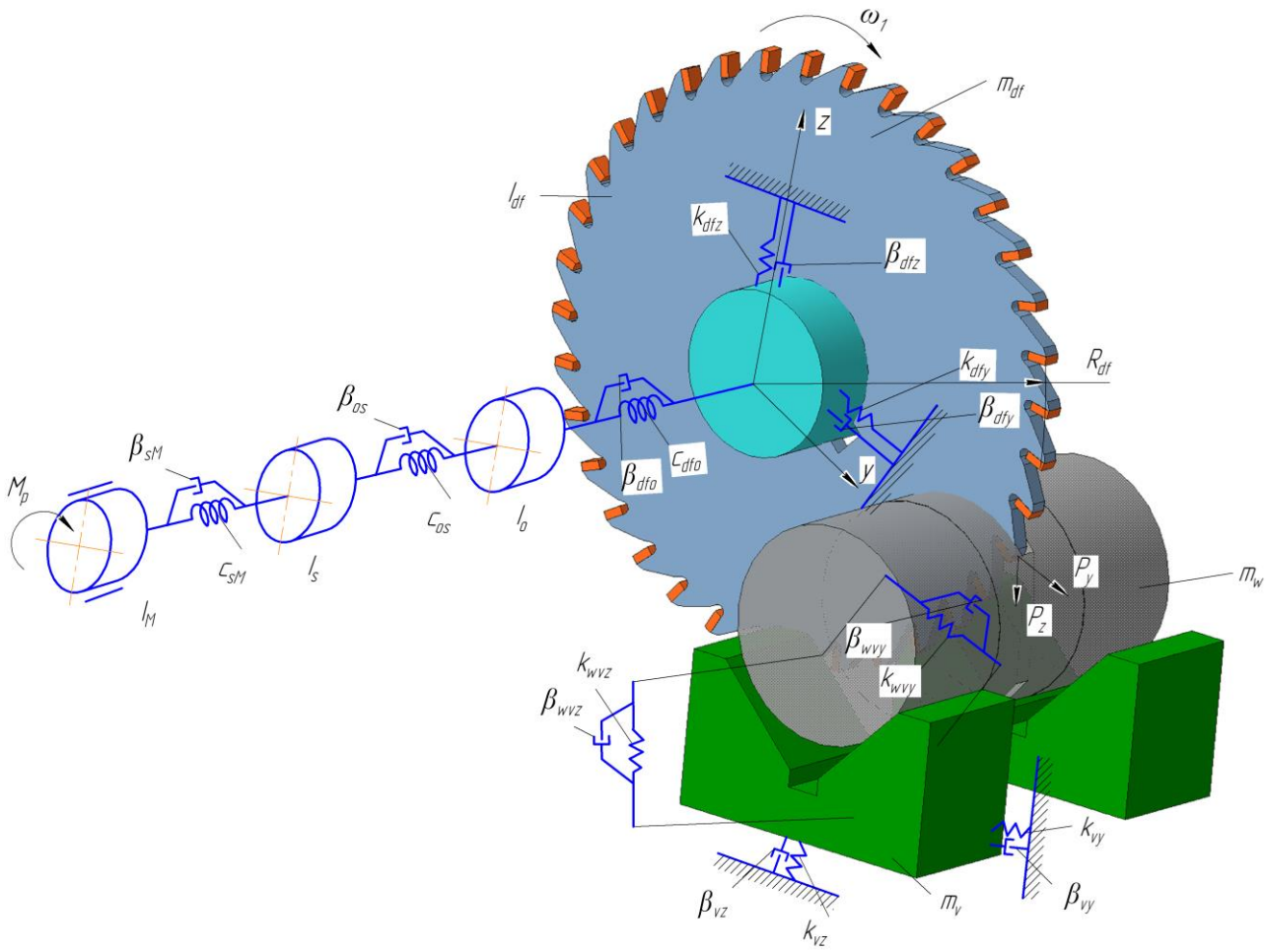


Рисунок 2.1 - Схема динамічної моделі процесу різання циліндричної заготовки дисковою фрезою на фрезерно-відрізному верстаті

До динамічної моделі на рисунку 2.1 віднесено дискову відрізну фрезу із твердосплавними ріжучими пластинами, оправку для кріплення дискової фрези, шпиндель фрезерно-відрізного верстата, механізм приводу обертання дискової фрези, циліндричну заготовку, пристрій із двома призмами.

Кожен із представлених елементів динамічної моделі характеризується рядом фізичних параметрів, зокрема масою, моментом інерції, жорсткістю та

демпфуючими властивостями. Контактні деформації з'єднань між окремими елементами системи не враховано.

Для процесу різання циліндричної заготовки дисковою фрезою можна виділити такі етапи:

1. Ударна взаємодія між першим зубом дискової фрези та поверхнею циліндричної заготовки.

2. Врізання першого зуба дискової фрези у заготовку.

3. Ударна взаємодія між другим зубом дискової фрези та поверхнею циліндричної заготовки з одночасним різанням заготовки першим зубом.

4. Врізання другого зуба дискової фрези у заготовку з одночасним різанням заготовки першим зубом.

5. Залежно від діаметра фрези, кількості зубів на фрезі, діаметра заготовки відбувається одночасне різання заготовки декількома зубами фрези, з періодичним їх врізанням і виходом із заготовки.

На рис. 2.1 умовно позначено: I_{df} – момент інерції дискової відрізної фрези; I_{o} – момент інерції оправки для кріплення дискової фрези; I_{s} – приведений момент інерції шпинделя фрезерно-відрізного верстата, I_{M} – приведений момент інерції механізму приводу обертання дискової фрези, m_{df} – маса дискової відрізної фрези, m_w – маса циліндричної заготовки, m_v – маса пристрою із двома призмами. Жорсткості елементів системи, що позначені на рис. 2.1: C_{dfo} – крутильна жорсткість дискової відрізної фрези, C_{os} – крутильна жорсткість оправки для кріплення дискової фрези, C_{sM} – крутильна жорсткість шпинделя фрезерно-відрізного верстата, k_{dfz}, k_{dfy} - лінійні жорсткості дискової відрізної фрези в напрямку осей z та y відповідно, k_{wvz}, k_{wvy} - лінійні жорсткості циліндричної заготовки в напрямку осей z та y відповідно, k_{vz}, k_{vy} - лінійні жорсткості пристрою із двома призмами в напрямку осей z та y відповідно.

Коефіцієнти демпфування елементів системи, що позначені на рис. 2.1: β_{dfo} – коефіцієнт демпфування крутильних коливань дискової відрізної фрези, β_{os} – коефіцієнт демпфування крутильних коливань оправки для кріплення

дискової фрези, β_{sM} – коефіцієнт демпфування крутильних коливань шпинделя фрезерно-відрізного верстата, β_{dfz}, β_{dfy} - коефіцієнти демпфування лінійних коливань дискової відрізної фрези в напрямку осей *z* та *y* відповідно, β_{wvz}, β_{wvy} - коефіцієнти демпфування лінійних коливань циліндричної заготовки в напрямку осей *z* та *y* відповідно, β_{vz}, β_{vy} - коефіцієнти демпфування лінійних коливань пристрою із двома призмами в напрямку осей *z* та *y* відповідно.

На ріжучі кромки зубів дискової відрізної фрези (m_{df}) діють тангенціальна P_{z1} і радіальна P_{y1} складові сили різання. Відповідні сили також діють на циліндричну заготовку (m_w). Також в момент врізання у циліндричну заготовку на кожний із зубів дискової відрізної фрези та на заготовку діє сила удару P_u. Величини вказаних вище коефіцієнтів жорсткості, коефіцієнтів демпфування а також величини складових сили різання визначаються експериментальними дослідженнями та методами комп'ютерного моделювання.

Проекції на осі *z* та *y* тангенціальної P_{z1} і радіальної P_{y1} складової сили різання на кожній ріжучій кромці зубів дискової відрізної фрези періодично змінюються в часі, від нульового значення при врізанні до максимального при розміщення зуба в середині із наступним спаданням до нуля при виході із заготовки. Тому наближено ці сили представлено у вигляді півсинусоїди, за формулою [26]:

$$P_{yi}(t) = P_y \cdot \sin\left(\frac{\pi}{t_k}t - \frac{(i-1)\pi t_1}{t_k}\right), \qquad (2.1)$$

де *i* – порядковий номер зуба відрізної дискової фрези;

t_1 - проміжок часу між послідовними врізаннями зубів дискової фрези у заготовку;

t_k - час різання циліндричної заготовки одним зубом;

P_y - максимальне значення радіальної складової сили різання на ріжучій кромці зуба.

При цьому виконується умова: якщо $t < it_1$ і $t > it_1 + t_k$, то $P_{yi}(t)$=0.

Максимальне значення радіальної складової сили різання на ріжучій кромці зуба визначають на основі емпіричних залежностей [16]:

$$P_y = \frac{10 C_p t_r^{\ x} s_z^{\ y} B^{n_1} z K_{Mp}}{D^q n^w}. \qquad (2.2)$$

Час різання циліндричної заготовки одним зубом визначаємо за формулою:

$$t_k = \frac{\beta}{\omega_1}, \qquad (2.3)$$

де β – кут сегмента заготовки, що піддається різанню;

ω_1 - кутова частота обертання відрізної дискової фрези.

Кут сегмента заготовки, що піддається різанню визначаємо із розрахункової схеми на рис. 2.2 на основі теореми косинусів із трикутника з вершинами O_o та O_w.

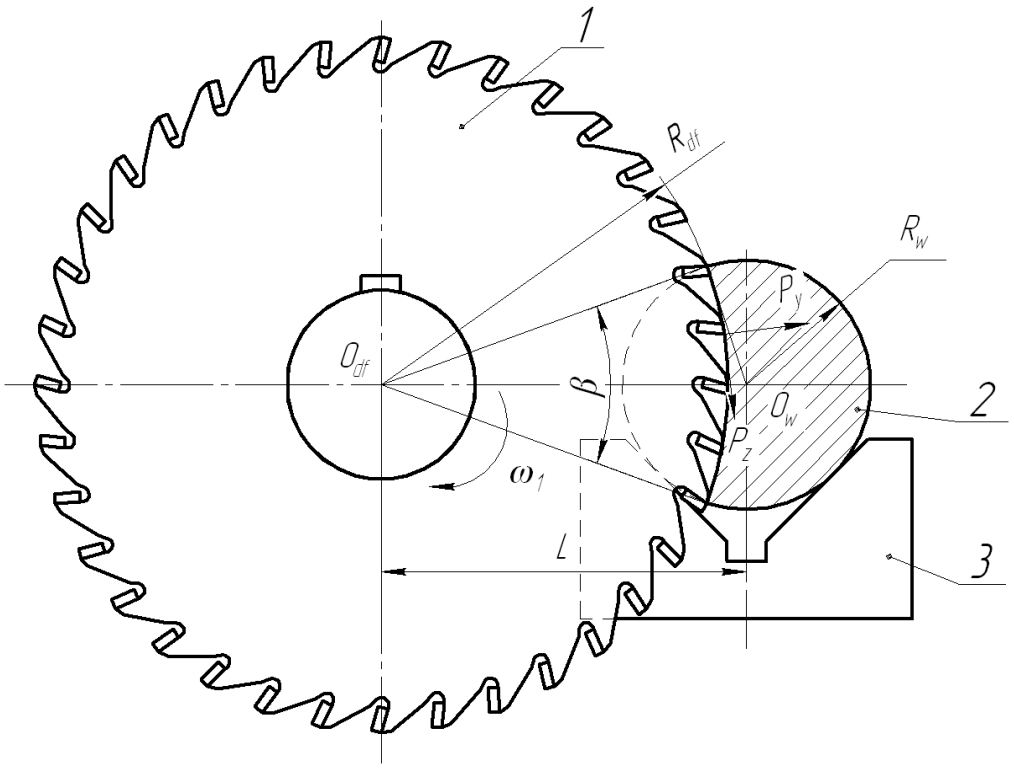


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема геометричних параметрів процесу різання циліндричної заготовки дисковою фрезою: 1 – дискова фреза; 2 – циліндрична заготовка; 3 – призма

Відповідно до розрахункової схеми рис. 2.2 маємо:

$$R_w^2 = L^2 + R_{df}^2 - 2LR_{df}\cos\frac{\beta}{2}, \tag{2.4}$$

де R_w -радіус циліндричної заготовки;

R_{df} - зовнішній радіус дискової відрізної фрези;

L - відстань між центрами дискової фрези та циліндричної заготовки.

Із рівняння (2.4) знаходимо кут сегмента заготовки, що піддається різанню:

$$\beta = 2\arccos\left(\frac{L^2 - R_{df}^2 - R_w^2}{2LR_{df}}\right). \tag{2.5}$$

Кутова частота обертання відрізної дискової фрези:

$$\omega_1 = \frac{n\pi}{30}, \tag{2.6}$$

де n – частота обертання дискової фрези, об/хв.

Підставляючи рівняння (2.5) та (2.6) у рівняння (2.3), одержуємо:

$$t_k = \frac{60\arccos\left(\frac{L^2 - R_{df}^2 - R_w^2}{2LR_{df}}\right)}{n\pi}, \tag{2.7}$$

Проміжок часу між послідовними врізаннями зубів дискової фрези у заготовку:

$$t_1 = \frac{2\pi}{z\omega_1}; \tag{2.8}$$

$$t_1 = \frac{60}{zn}. \tag{2.9}$$

За узагальнені координати прийнято: φ_{df} - кут повороту дискової відрізної

фрези; φ_o - кут повороту оправки для кріплення дискової фрези; φ_s - кут повороту шпинделя фрезерно-відрізного верстата; φ_M - кут повороту механізму приводу обертання дискової фрези; z_{df}, y_{df} - лінійні переміщення дискової відрізної фрези в напрямку осей *z* та *y* відповідно; z_w, y_w - лінійні переміщення циліндричної заготовки в напрямку осей *z* та *y* відповідно; z_v, y_v - лінійні переміщення пристрою із двома призмами в напрямку осей *z* та *y* відповідно.

Кінетична енергія системи динамічної моделі різання циліндричної заготовки дисковою фрезою на фрезерно-відрізному верстаті рис. 2.1:

$$T = \frac{I_{df} \cdot \dot{\varphi}_{df}^2}{2} + \frac{I_o \cdot \dot{\varphi}_o^2}{2} + \frac{I_s \cdot \dot{\varphi}_s^2}{2} + \frac{I_M \cdot \dot{\varphi}_M^2}{2} + \frac{m_{df} \cdot \dot{z}_{df}^2}{2} + \frac{m_w \cdot \dot{z}_w^2}{2} + \frac{m_v \cdot \dot{z}_v^2}{2} + \\ + \frac{m_{df} \cdot \dot{y}_{df}^2}{2} + \frac{m_w \cdot \dot{y}_w^2}{2} + \frac{m_v \cdot \dot{y}_v^2}{2}. \quad (2.10)$$

Потенціальна енергія системи динамічної моделі різання циліндричної заготовки дисковою фрезою на фрезерно-відрізному верстаті рис. 2.1:

$$\Pi = \frac{C_{dfo} \cdot \left(\varphi_o - \varphi_{df}\right)^2}{2} + \frac{C_{os} \cdot \left(\varphi_s - \varphi_o\right)^2}{2} + \frac{C_{sM} \cdot \left(\varphi_M - \varphi_s\right)^2}{2} + \frac{k_{dfz} \cdot z_{df}{}^2}{2} + \\ + \frac{k_{wvz} \cdot \left(z_v - z_w\right)^2}{2} + \frac{k_{vz} \cdot z_v{}^2}{2} + \frac{k_{dfy} \cdot y_{df}{}^2}{2} + \frac{k_{wvy} \cdot \left(y_v - y_w\right)^2}{2} + \frac{k_{vy} \cdot y_v{}^2}{2}. \quad (2.11)$$

Функція розсіювання системи динамічної моделі різання циліндричної заготовки дисковою фрезою на фрезерно-відрізному верстаті рис. 2.1:

$$\Phi = \frac{\beta_{dfo} \cdot \left(\dot{\varphi}_o - \dot{\varphi}_{df}\right)^2}{2} + \frac{\beta_{os} \cdot \left(\dot{\varphi}_s - \dot{\varphi}_o\right)^2}{2} + \frac{\beta_{sM} \cdot \left(\dot{\varphi}_M - \dot{\varphi}_s\right)^2}{2} + \frac{\beta_{dfz} \cdot \dot{z}_{df}{}^2}{2} + \\ + \frac{\beta_{wvz} \cdot \left(\dot{z}_v - \dot{z}_w\right)^2}{2} + \frac{\beta_{vz} \cdot \dot{z}_v{}^2}{2} + \frac{\beta_{dfy} \cdot \dot{y}_{df}{}^2}{2} + \frac{\beta_{wvy} \cdot \left(\dot{y}_v - \dot{y}_w\right)^2}{2} + \frac{\beta_{vy} \cdot \dot{y}_v{}^2}{2}. \quad (2.12)$$

Рівняння Лагранжа другого роду [24]:

- для крутних коливань:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_n}+\frac{\partial П}{\partial \varphi_n}+\frac{\partial Ф}{\partial \dot{\varphi}_n}=\left(\sum_{i=1}^{z}P_{zi}(t)+P_u(t)\right)R_{df}\,; \qquad (2.13)$$

- для лінійних коливань:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial \dot{z}_n}+\frac{\partial П}{\partial z_n}+\frac{\partial Ф}{\partial \dot{z}_n}=\sum_{i=1}^{z}P_{zi}(t)+P_u(t), \qquad (2.14)$$

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial \dot{y}_n}+\frac{\partial П}{\partial y_n}+\frac{\partial Ф}{\partial y_n}=\sum_{i=1}^{z}P_{yi}(t)+P_u(t). \qquad (2.15)$$

На основі рівнянь (2.13), (2.14) та (2.15) виведено систему диференціальних рівнянь:

$$I_{df}\cdot\frac{d^2\varphi_{df}}{dt^2}+C_{dfo}\cdot\left(\varphi_{df}-\varphi_o\right)+\beta_{dfo}\left(\frac{d\varphi_{df}}{dt}-\frac{d\varphi_o}{dt}\right)=R_{df}\left(\sum_{i=1}^{z}P_{zi}(t)+P_u(t)\right);$$

$$I_o\cdot\frac{d^2\varphi_o}{dt^2}+C_{dfo}\cdot\left(\varphi_o-\varphi_{df}\right)+\beta_{dfo}\left(\frac{d\varphi_o}{dt}-\frac{d\varphi_{df}}{dt}\right)+C_{os}\cdot\left(\varphi_o-\varphi_s\right)+\beta_{os}\left(\frac{d\varphi_o}{dt}-\frac{d\varphi_s}{dt}\right)=0;$$

$$I_s\cdot\frac{d^2\varphi_s}{dt^2}+C_{os}\cdot\left(\varphi_s-\varphi_o\right)+\beta_{os}\left(\frac{d\varphi_s}{dt}-\frac{d\varphi_o}{dt}\right)+C_{sM}\cdot\left(\varphi_s-\varphi_M\right)+\beta_{sM}\left(\frac{d\varphi_s}{dt}-\frac{d\varphi_M}{dt}\right)=0;$$

$$I_M\cdot\frac{d^2\varphi_M}{dt^2}+C_{sM}\cdot\left(\varphi_M-\varphi_s\right)+\beta_{sM}\left(\frac{d\varphi_M}{dt}-\frac{d\varphi_s}{dt}\right)=M_p;$$

$$m_{df}\cdot\frac{d^2y_{df}}{dt^2}+k_{dfy}y_{df}+\beta_{dfy}\frac{dy_{df}}{dt}=\sum_{i=1}^{z}P_{yi}(t)+P_u(t); \qquad (2.16)$$

$$m_w\cdot\frac{d^2y_w}{dt^2}+k_{wvy}\left(y_w-y_v\right)+\beta_{wvy}\left(\frac{dy_w}{dt}-\frac{dy_v}{dt}\right)=\sum_{i=1}^{z}P_{yi}(t)+P_u(t);$$

$$m_v\cdot\frac{d^2y_v}{dt^2}+k_{wvy}\left(y_v-y_w\right)+\beta_{wvy}\left(\frac{dy_v}{dt}-\frac{dy_w}{dt}\right)+k_{vy}y_v+\beta_{vy}\frac{dy_v}{dt}=0;$$

$$m_{df}\cdot\frac{d^2z_{df}}{dt^2}+k_{dfz}z_{df}+\beta_{dfz}\frac{dz_{df}}{dt}=\sum_{i=1}^{z}P_{zi}(t)+P_u(t);$$

$$m_w\cdot\frac{d^2z_w}{dt^2}+k_{wvz}\left(z_w-z_v\right)+\beta_{wvz}\left(\frac{dz_w}{dt}-\frac{dz_v}{dt}\right)=\sum_{i=1}^{z}P_{zi}(t)+P_u(t);$$

$$m_v \cdot \frac{d^2 z_v}{dt^2} + k_{wvz}\left(z_v - z_w\right) + \beta_{wvz}\left(\frac{dz_v}{dt} - \frac{dz_w}{dt}\right) + k_{vz} z_v + \beta_{vz}\frac{dz_v}{dt} = 0,$$

де M_p - крутний момент на приводі дискової фрези.

Для розв'язку системи диференціальних рівнянь (2.16) використано нульові початкові координати та нульові початкові швидкості:

$$\varphi_{df} = 0;\ \ \varphi_o = 0;\ \ \varphi_s = 0;\ \ \varphi_M = 0;\ \ z_{df} = 0;\ \ y_{df} = 0;\ \ z_w = 0;\ \ y_w = 0,\ \ z_v = 0,$$

$$y_v = 0;\ \frac{d\varphi_{df}}{dt}(0) = 0,\ \frac{d\varphi_o}{dt}(0) = 0;\frac{d\varphi_s}{dt}(0) = 0,\ \frac{d\varphi_M}{dt}(0) = 0;\ \frac{dz_{df}}{dt}(0) = 0,\ \frac{dz_w}{dt}(0) = 0,$$

$$\frac{dz_v}{dt}(0) = 0,\ \frac{dy_{df}}{dt}(0) = 0,\ \frac{dy_w}{dt}(0) = 0,\ \ \frac{dy_v}{dt}(0) = 0. \qquad (2.17)$$

Для розв'язку системи диференціальних рівнянь (2.16) з нульовими початковими умовами (2.17) використано прикладне програмне забезпечення, що має підпрограму чисельного методу Рунге-Кутта. Розв'язок представлено у вигляді графіків зміни: кутової деформації (рис. 2.3), швидкості кутової деформації (рис. 2.4) та динамічного навантаження (рис. 2.5) дискової відрізної фрези в часі; лінійної деформації (рис. 2.6) та швидкості деформації (рис. 2.7) циліндричної заготовки в часі; кутової деформації (рис. 2.8) оправки для кріплення дискової фрези в часі.

Із графіків рисунків 2.3 – 2.8 можна побачити, що найбільші динамічні навантаження, деформації та швидкості деформацій дискової відрізної фрези та циліндричної заготовки виникають в момент врізання другого зуба фрези у заготовку з ударним навантаженням. Спостерігалось виникнення періодичних максимальних коливань дискової відрізної фрези та циліндричної заготовки з періодом, що дорівнює періоду між послідовними врізаннями зубів фрези у заготовку.

Максимальне значення кутової деформації дискової відрізної фрези в моменти удару зуба фрези та заготовки становило 0,17 град із середнім значенням 0,1 град, при цьому максимальна швидкість кутової деформації

дискової відрізної фрези становила 0,3 град/с із середнім значенням 0,15 град/с, максимальне значення динамічного навантаження на дисковій відрізній фрезі становило 9000 Н із середнім значенням 5000 Н.

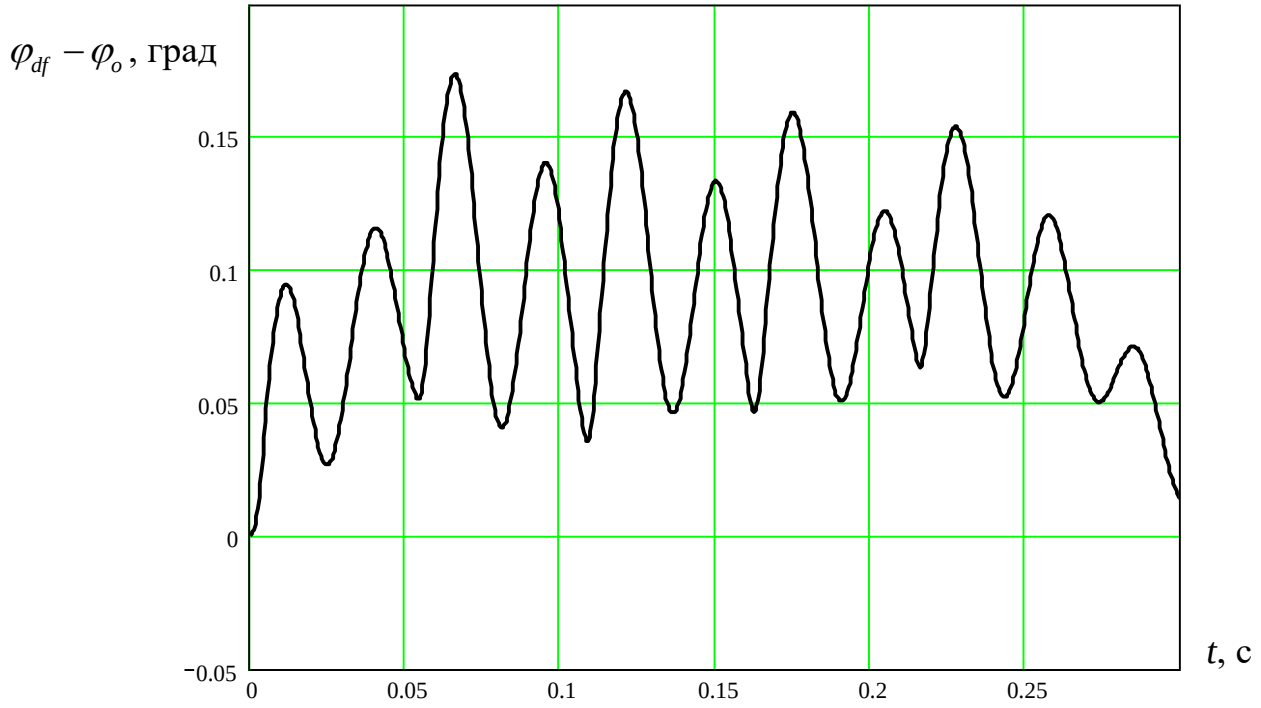


Рисунок 2.3 - Графік зміни кутової деформації дискової відрізної фрези в часі

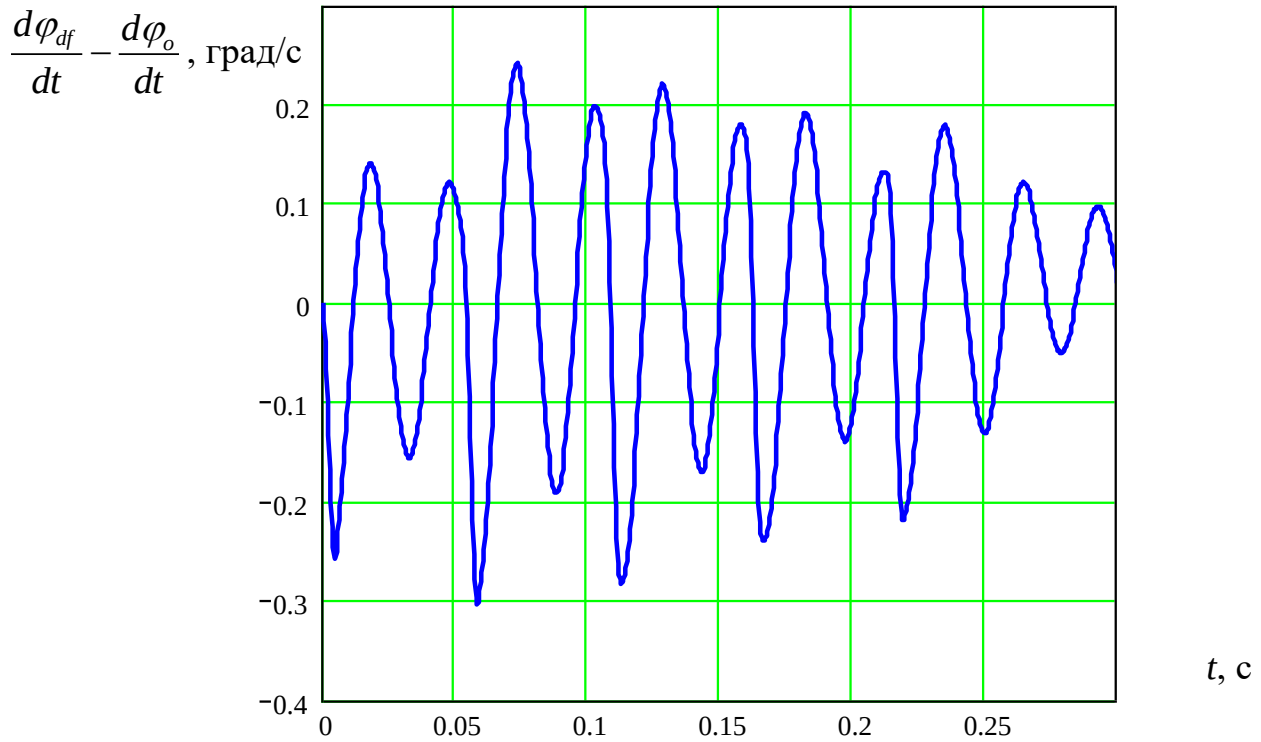


Рисунок 2.4 - Графік зміни швидкості кутової деформації дискової відрізної фрези в часі

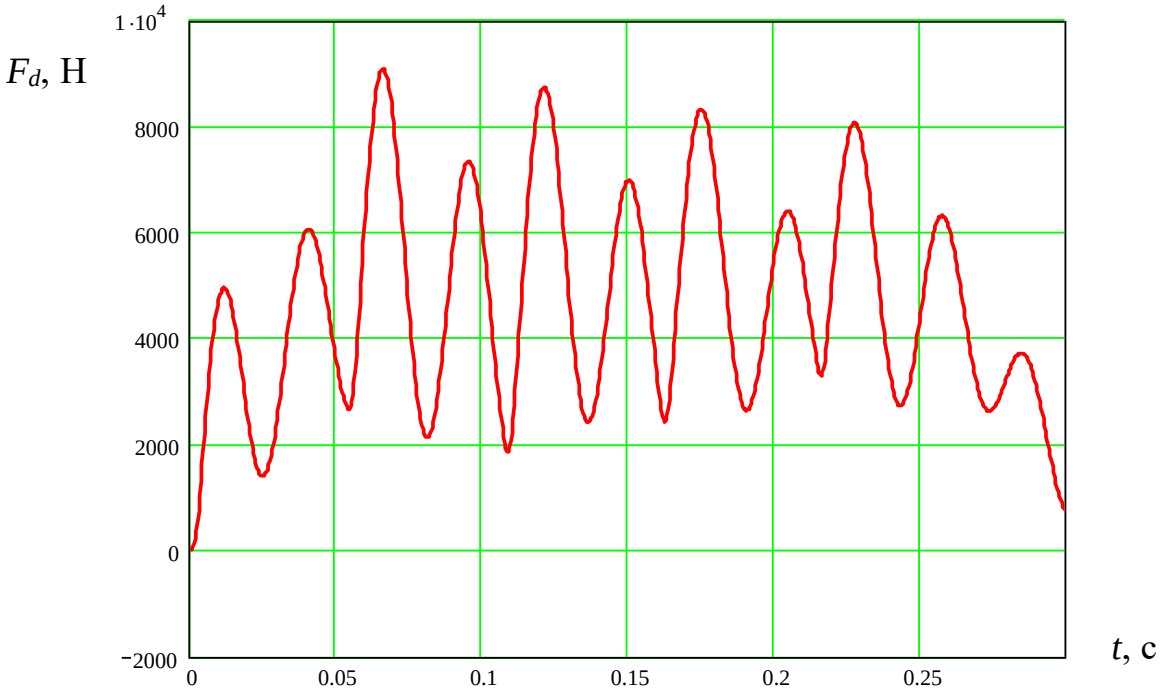


Рисунок 2.5 - Графік зміни динамічного навантаження на дисковій відрізній фрезі в часі

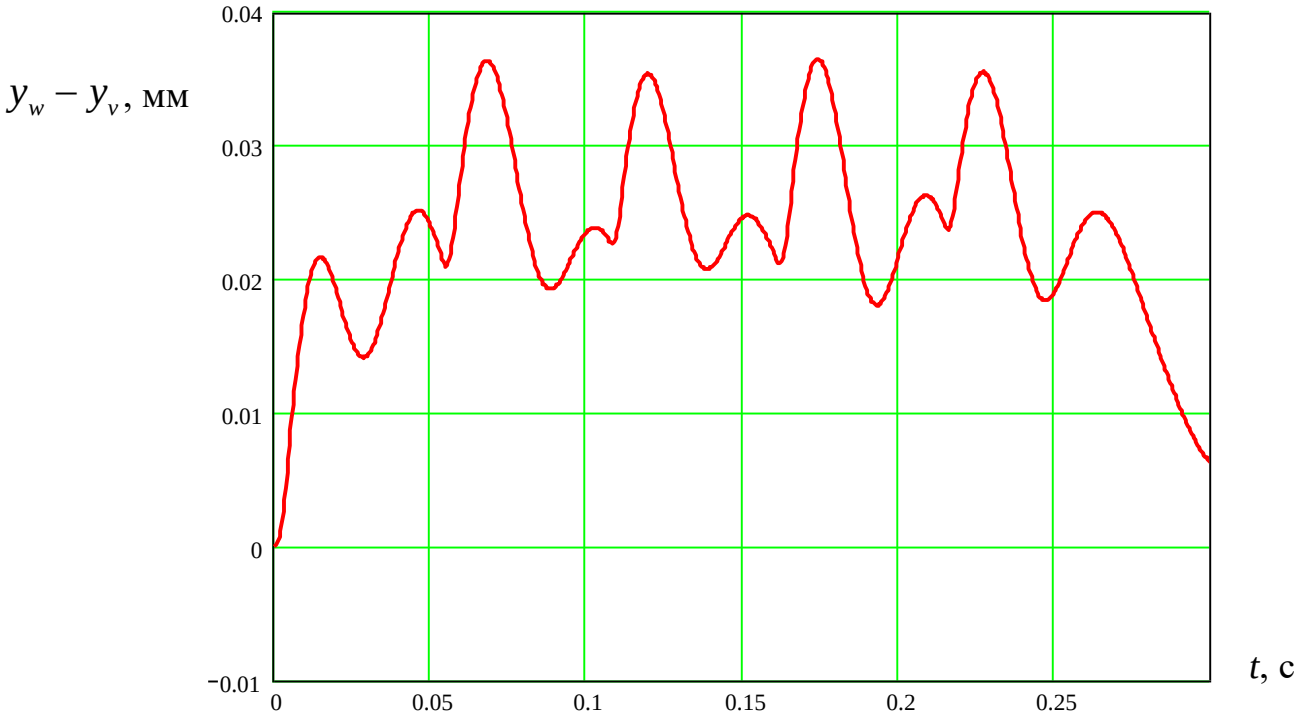


Рисунок 2.6 - Графік зміни лінійної деформації циліндричної заготовки в часі

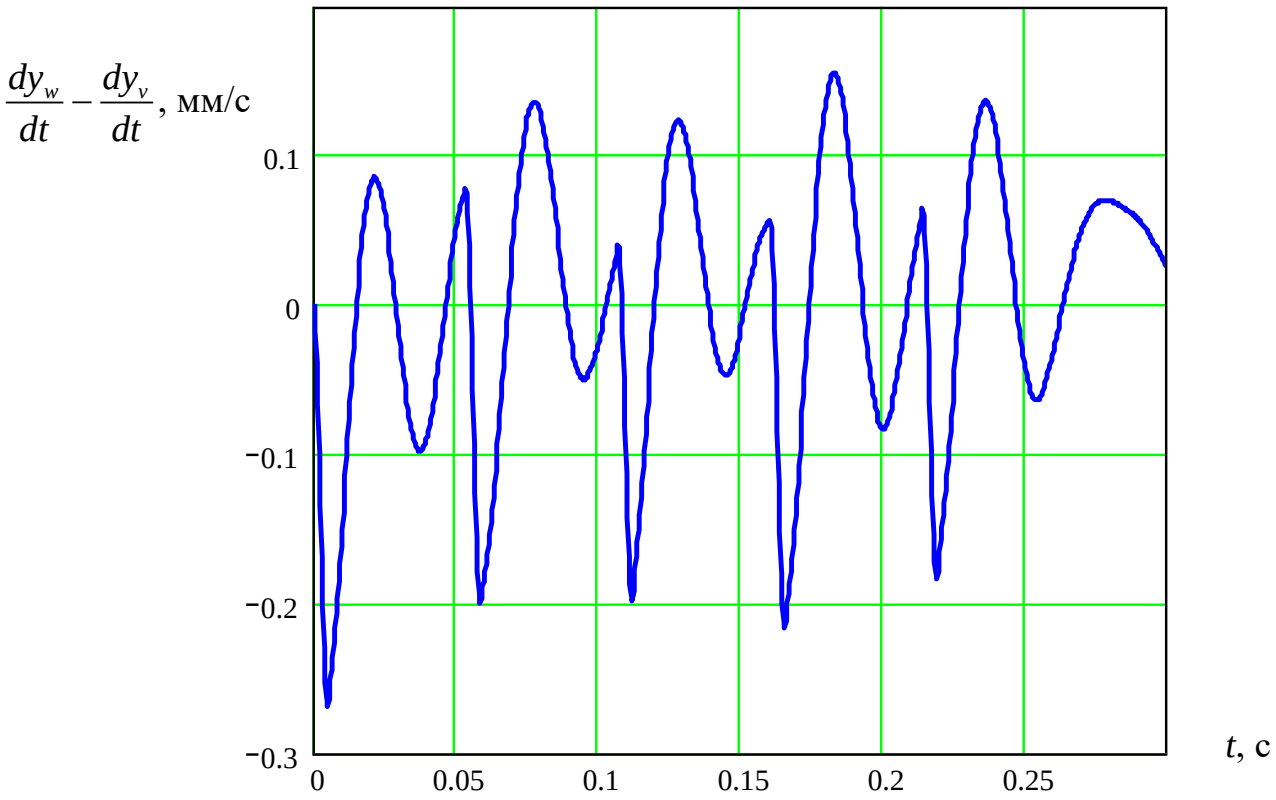


Рисунок 2.7 - Графік зміни швидкості лінійної деформації циліндричної заготовки в часі

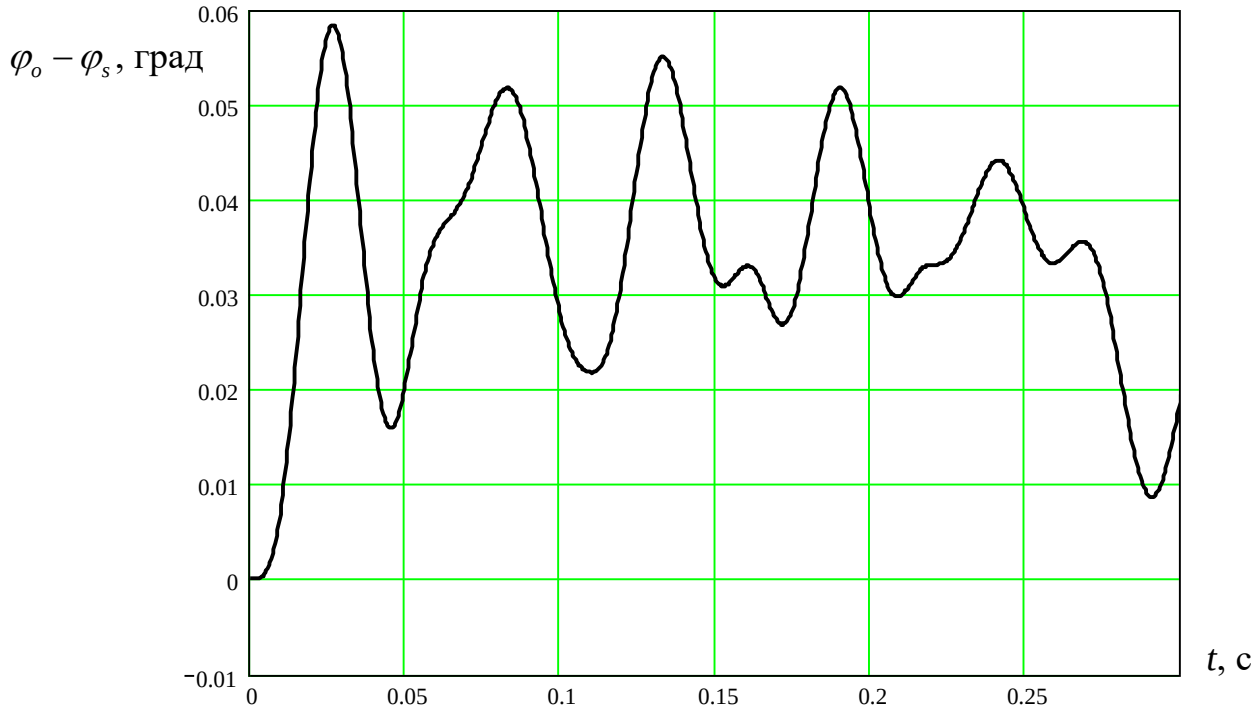


Рисунок 2.8 - Графік зміни кутової деформації оправки для кріплення дискової фрези в часі

Максимальне значення лінійної деформації циліндричної заготовки в моменти удару зуба фрези та заготовки становило 0,036 мм із середнім значенням 0,025 мм, при цьому максимальна швидкість лінійної деформації циліндричної заготовки становила 0,25 мм/с із середнім значенням 0,1 мм/с.

2.2. Результати експериментальних досліджень відхилення від перпендикулярності торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою

Під час виконання кваліфікаційної роботи проведено ряд експериментальних досліджень процесу відрізання циліндричної заготовки дисковою фрезою, зокрема серед досліджуваних параметрів різання розглянуто відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою за схемою рис. 2.1, 2.2. Відрізання циліндричної заготовки дисковою фрезою проведено на фрезерно-відрізному верстаті. Базування заготовки здійснювалось на двох призмах з упором в торець із затиском двома прихватами. У конструкції дискової фрези використано твердосплавні ріжучі пластини ВК6. Матеріал заготовок алюмінієвий сплав Д16Т.

Перед початком експерименту відбувалось його планування відповідно до план-матриці повнофакторного експерименту із трьома незалежними змінними вхідними параметрами на трьох рівнях. Попередні дослідження та літературний огляд дозволив встановити, що основними факторами, які впливають відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні циліндричної заготовки є: діаметр циліндричної заготовки D, подача S_z на зуб фрези та товщина фрези B.

Відповідно досліджувані відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні циліндричної заготовки представлено у вигляді функції $\Delta p = f(D, S_z, B)$.

Визначено межі варіювання основних змінних факторів:

- діаметр циліндричної заготовки D = 30 - 50 мм;
- подача на зуб фрези S_z = 0,04 – 0,12 мм/зуб;
- товщина фрези B = 4 - 6 мм.

Визначено нульові рівні кожного із факторів:

- для діаметра циліндричної заготовки D:

$$X_{01} = \frac{30+50}{2} = 40 \text{ (мм);} \tag{2.18}$$

- для подачі на зуб фрези S_z:

$$X_{02} = \frac{0,04+0,12}{2} = 0,08 \text{ (мм/зуб);} \tag{2.19}$$

- для товщини фрези B:

$$X_{03} = \frac{4+6}{2} = 5 \text{ (мм).} \tag{2.20}$$

Інтервали варіювання факторів та їх кодовані значення:

$$\Delta X_1 = \frac{50-30}{2} = 10 \text{ (мм);} \quad x_1 = \frac{D-40}{10}; \tag{2.21}$$

$$\Delta X_2 = \frac{0,12-0,04}{2} = 0,04 \text{ (мм/зуб);} \quad x_2 = \frac{S_z-0,08}{0,04}; \tag{2.22}$$

$$\Delta X_3 = \frac{6-4}{2} = 1 \text{ (мм);} \quad x_3 = \frac{B-5}{1}. \tag{2.23}$$

Результати вибору основних факторів, що впливають на відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні циліндричної заготовки та вибір рівнів їх варіювання представлено у таблиці 2.1.

Рівняння регресії, що визначають взаємозв’язок вхідних факторів та відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні циліндричної заготовки апроксимували поліномом другої степені. Значущість коефіцієнтів рівняння регресії визначали за критерієм Стьюдента. Значення коефіцієнтів рівняння регресії представлено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.1 - Змінні фактори що впливають на відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні циліндричної заготовки та вибір рівнів їх варіювання

Фактори	Позначення		Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натур.(кодовані)		
	натур.	код				
Діаметра циліндричної заготовки	D, мм	x_1	10	50 (+1)	40 (0)	30 (-1)
Подача на зуб фрези	S_z, мм/зуб	x_2	0,04	0,12 (+1)	0,08 (0)	0,04 (-1)
Товщина фрези	B, мм	x_3	1	6 (+1)	5 (0)	4 (-1)

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}
Д16Т	0,169	0,033	0,019	-0,039	-0,00125	0,00125	0,00125	0,00105	-0,00445	0,0086

Загальний вигляд рівняння регресії відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні циліндричної заготовки залежно від зміни: діаметра циліндричної заготовки D, подачі S_z на зуб фрези та товщини фрези B, тобто $\Delta p_{(x_1,x_2,x_3)} = f(D,S_z,B)$ за результатами експериментів у кодованих величинах дорівнює:

$$\begin{aligned}\Delta p_{(x_1,x_2,x_3)} &= 0,169 + 0,033x_1 + 0,019x_2 - 0,039x_3 - 0,00125x_1x_2 + \\ &+0,00125x_1x_3 + 0,00125x_2x_3 + 0,00105x_1^2 - 0,00445x_2^2 + 0,086x_3^2,\end{aligned} \quad (2.24)$$

де x_1 - кодоване значення діаметра циліндричної заготовки D; x_2 - кодоване значення подачі S_z на зуб фрези; x_3 - кодоване значення товщини фрези B.

Усі коефіцієнти рівняння регресії (2.24) є значущими.

У натуральних величинах рівняння регресії відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні циліндричної заготовки має вигляд:

$$\Delta p_{(D,S_z,B)} = 0,434 + 2,086 \cdot 10^{-3} D + 0,888 S_z - 0,132 B - 3,125 \cdot 10^{-3} D S_z + \\ +1,25 \cdot 10^{-4} DB + 0,03125 S_z B + 1,048 \cdot 10^{-5} D^2 - 2,782 S_z{}^2 + 8,55 \cdot 10^{-3} B^2. \quad (2.25)$$

На основі даних експериментальних досліджень та рівняння регресії (2.25) за допомогою прикладного програмного забезпечення виконано зображення поверхонь відгуку та їх двомірних перерізів, що можна використовувати для прогнозування відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою. Графіки зображено на рисунках 2.9 – 2.14.

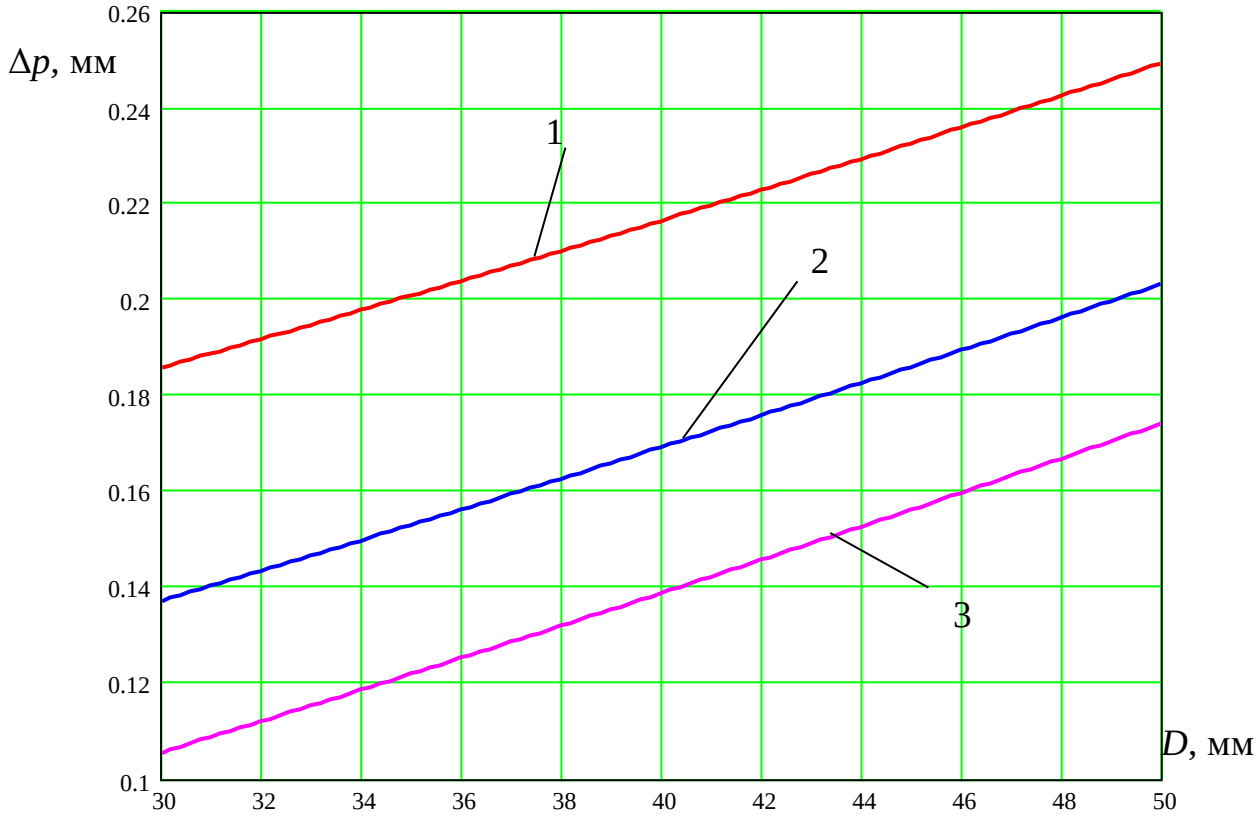
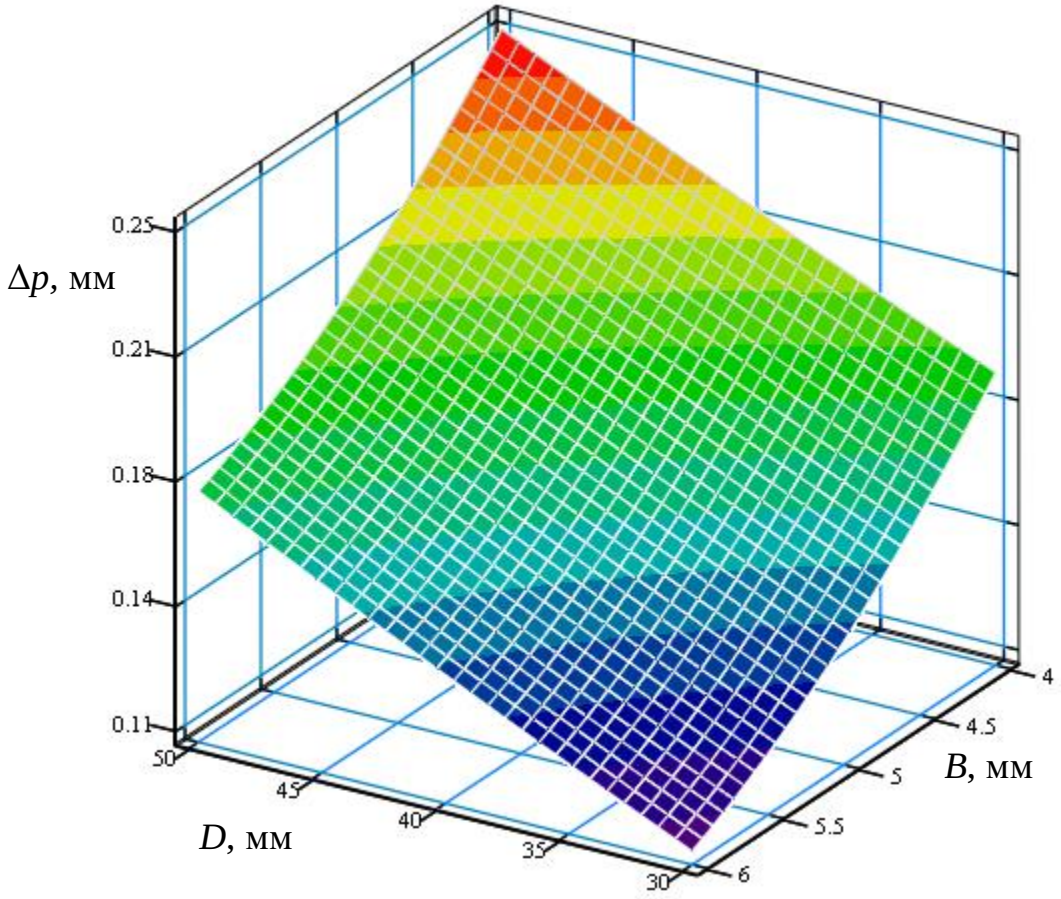
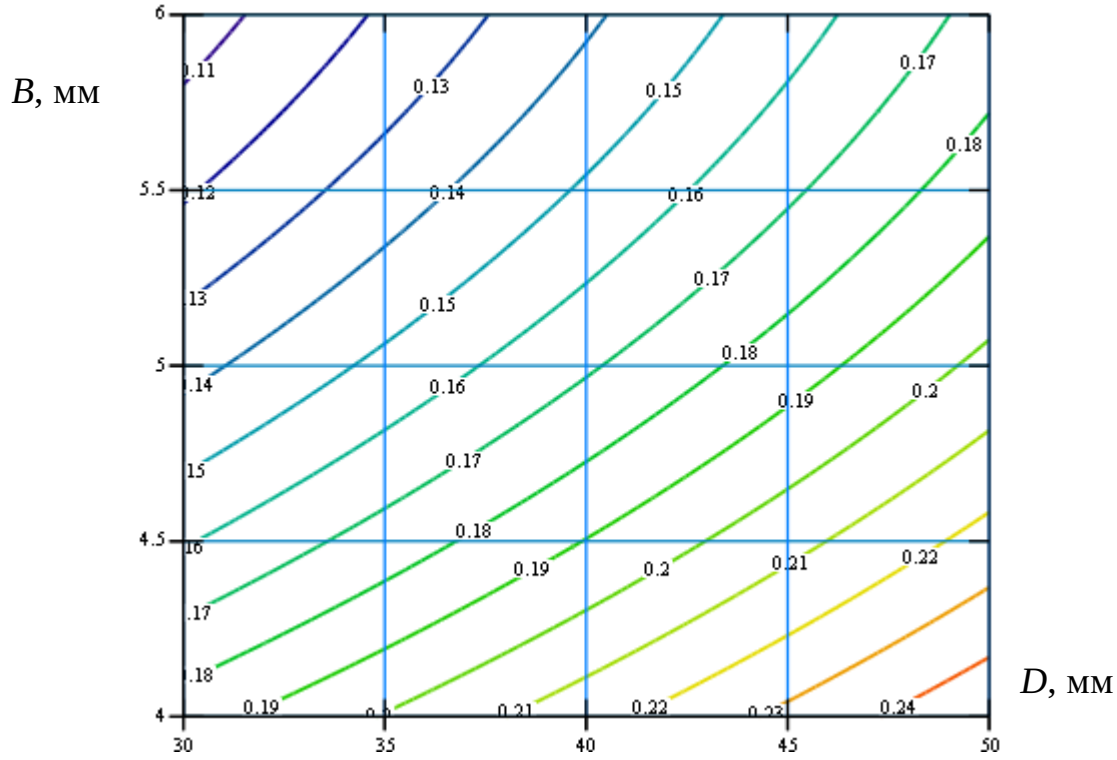


Рисунок 2.9 – Графіки залежності відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою від діаметра циліндричної заготовки D: S_z=0,08 мм/зуб: 1) B =4 мм; 2) B =5 мм; 3) B 6 мм

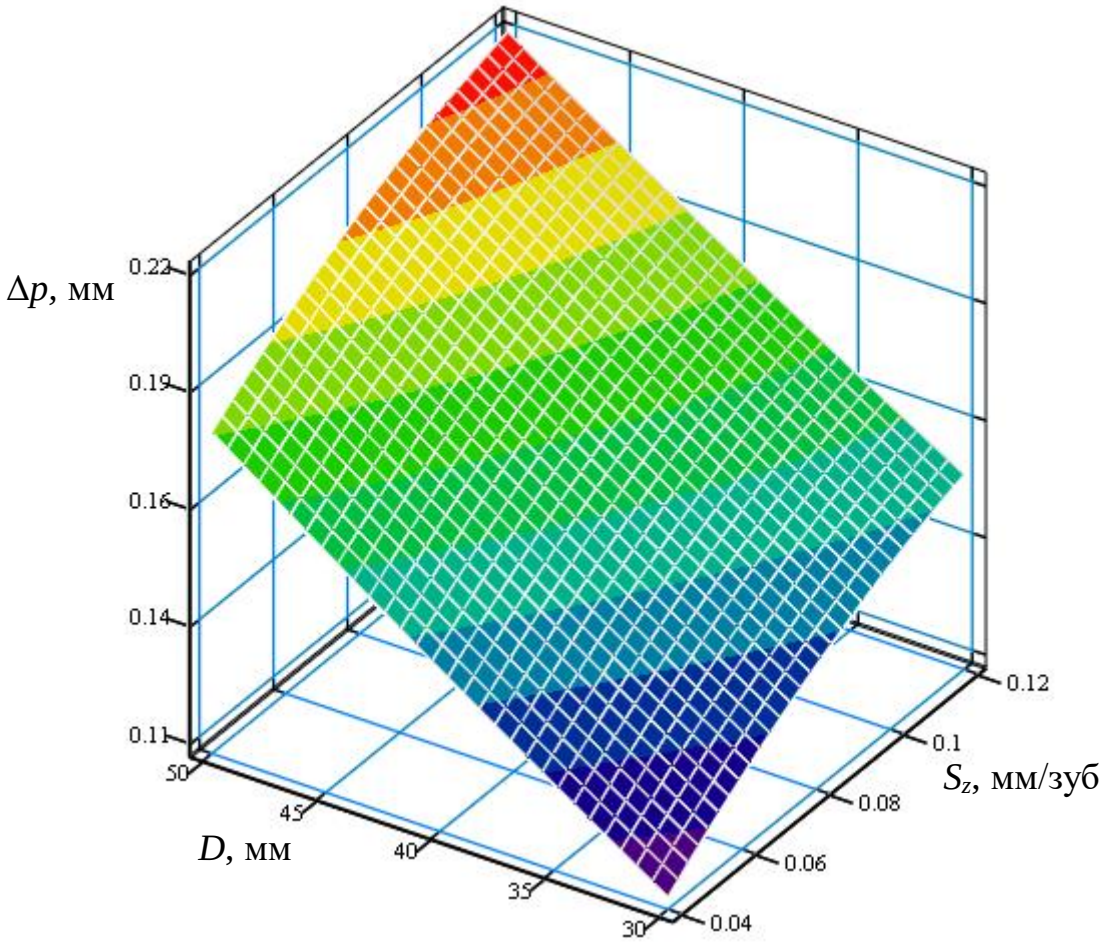


а)

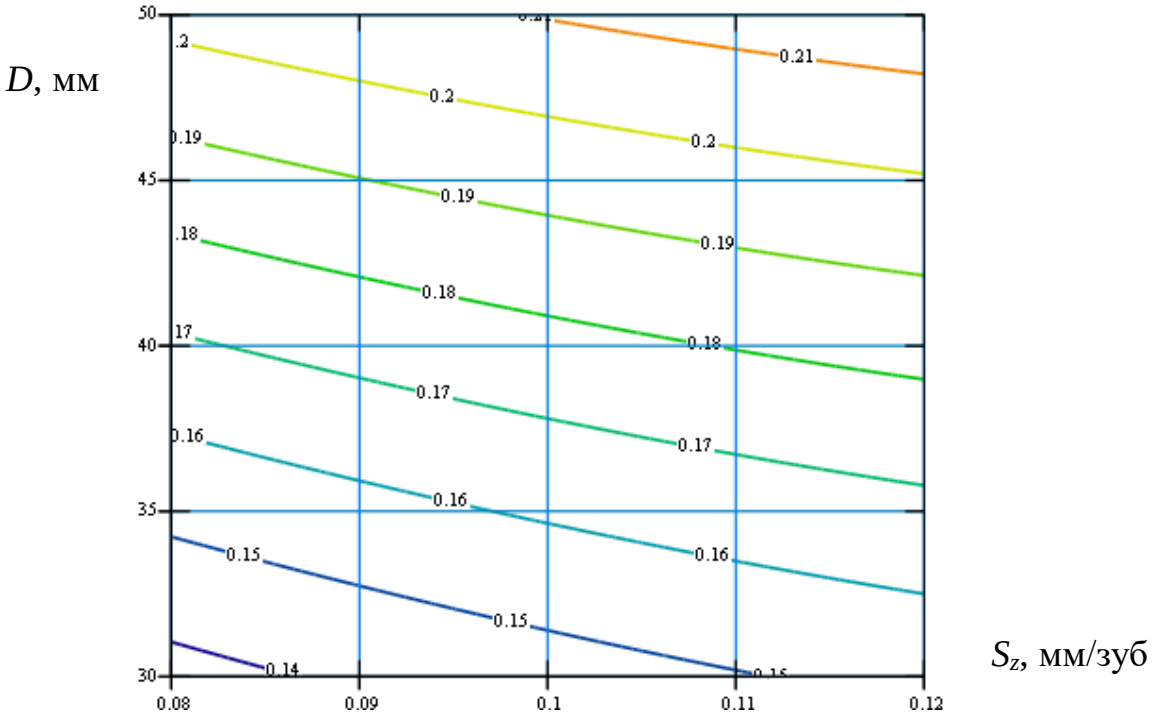


б)

Рисунок 2.10 - Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою від діаметра циліндричної заготовки D та товщини фрези B (S_z=0,08 мм/зуб)

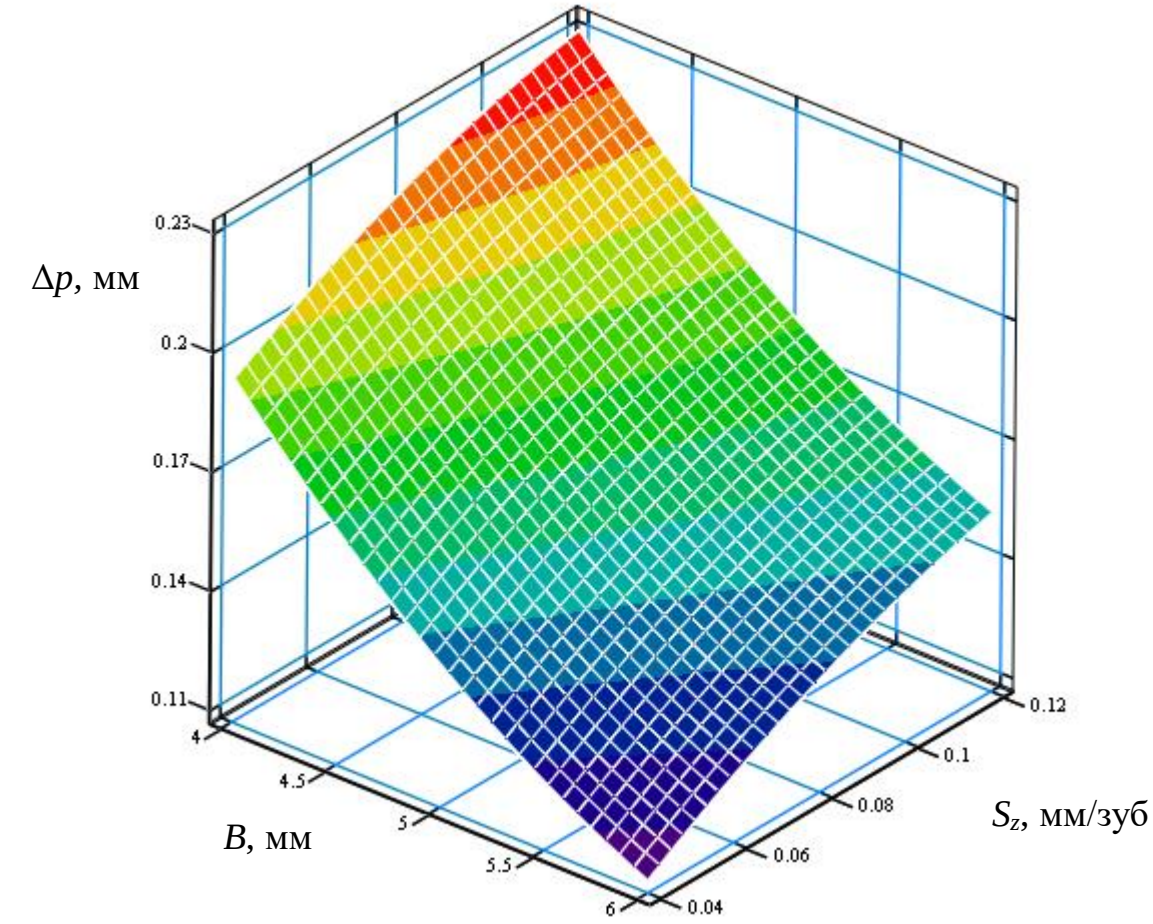


а)

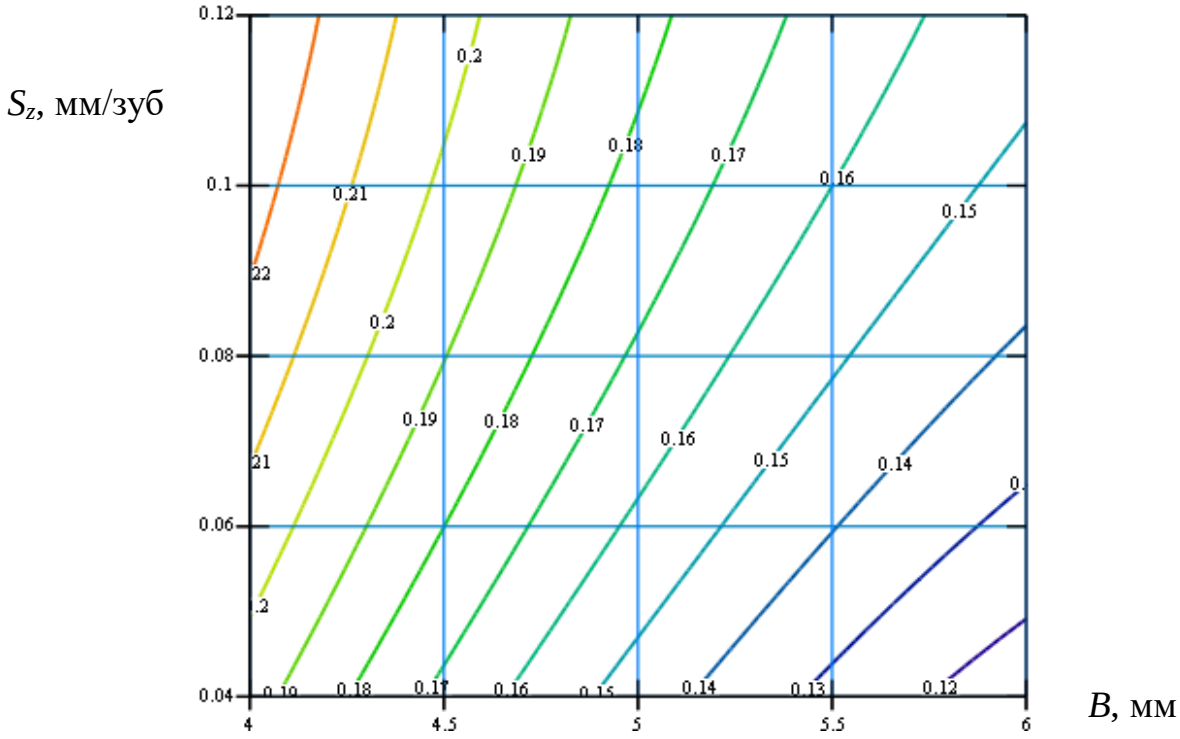


б)

Рисунок 2.11 - Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності відхилення від перпендикулярності Δ*p* торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою від діаметра циліндричної заготовки *D* та подачі S_z на зуб фрези (*B*=5 мм)



а)



б)

Рисунок 2.12 - Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності відхилення від перпендикулярності Δ*p* торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою від товщини фрези *B* та подачі S_z на зуб фрези (*D*=40 мм)

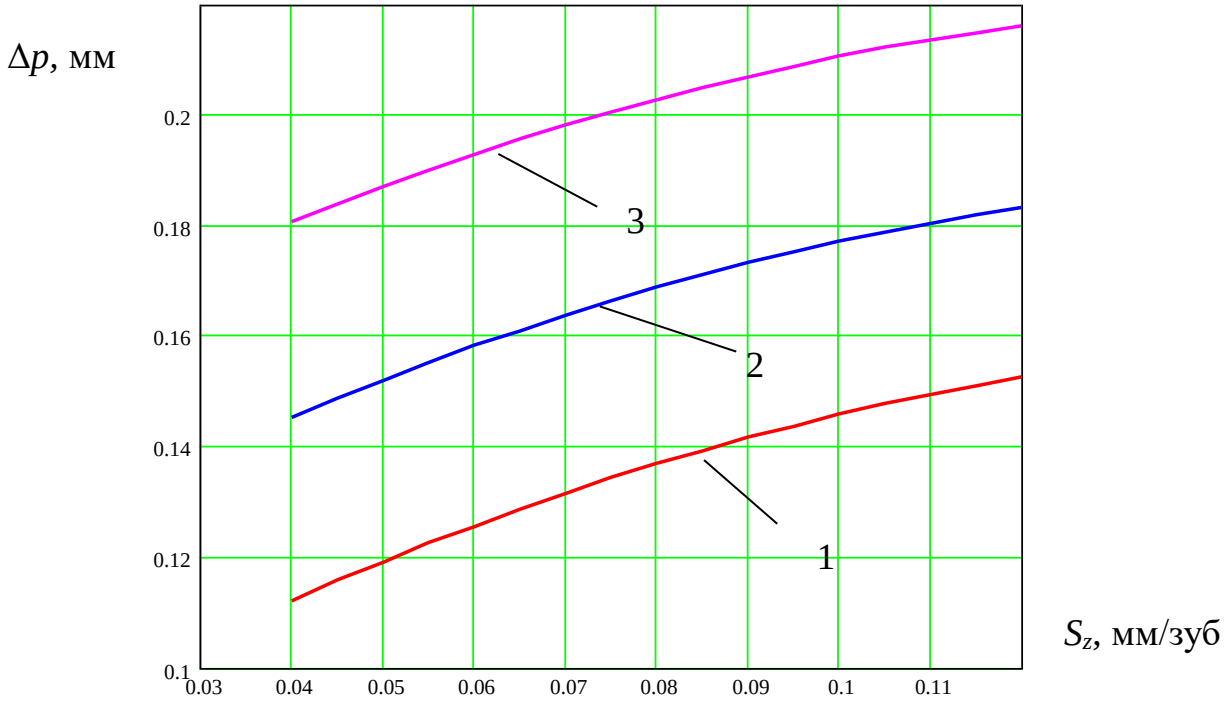


Рисунок 2.13 – Графіки залежності відхилення від перпендикулярності Δ*p* торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою від подачі S_z на зуб фрези: *B* =5 мм: 1) *D* =30 мм; 2) *D* =40 мм; 3) *D* =50 мм

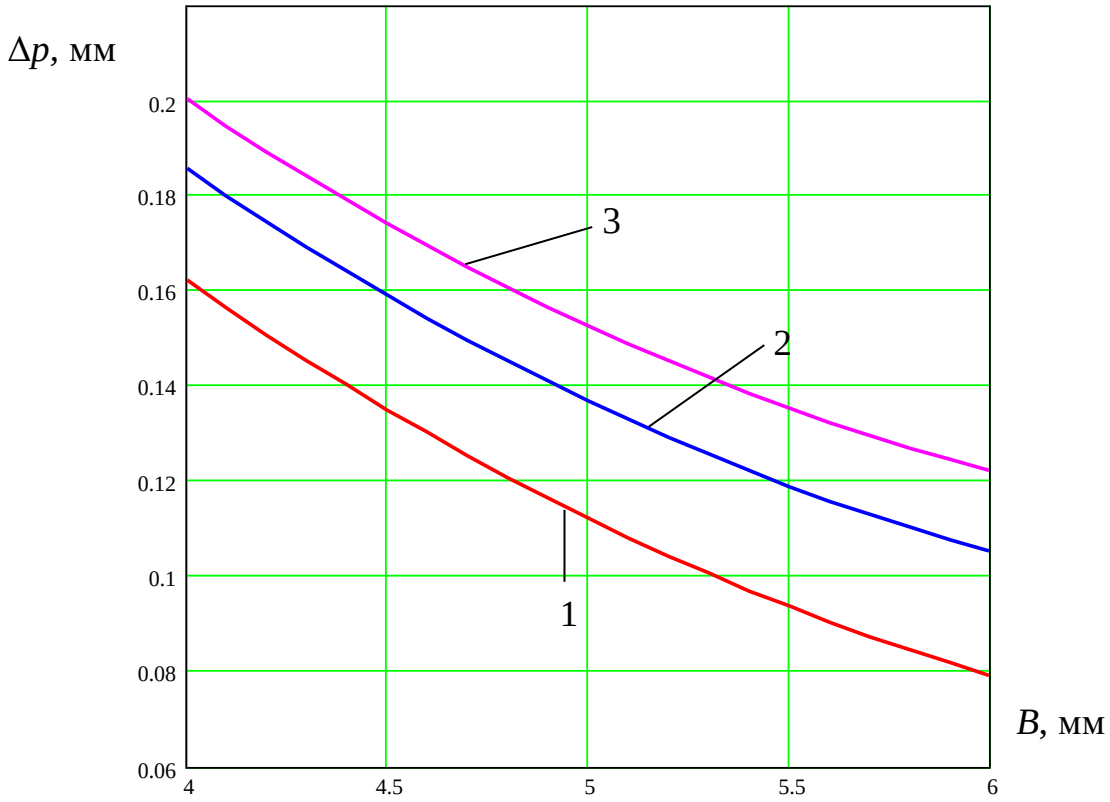


Рисунок 2.14 – Графіки залежності відхилення від перпендикулярності Δ*p* торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою від товщини фрези *B*: *D* =30 мм: 1) S_z=0,04 мм/зуб; 2) S_z=0,08 мм/зуб; 3) S_z=0,12 мм/зуб

Рівняння регресії у кодованих (2.24) та натуральних (2.25) величинах адекватно відображають відхилення від перпендикулярності Δ*p* торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою при таких параметрах:

$$30 \le D \le 50 \text{ (мм)}; \ 0{,}04 \le S_z \le 0{,}12 \text{ (мм/зуб)}; \ 4 \le B \le 6 \text{ (мм)}.$$

В результаті аналізу представлених вище графіків встановлено, що найбільший вплив на відхилення від перпендикулярності Δ*p* торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою має товщина фрези *B*. Менший вплив має діаметр циліндричної заготовки *D* і найменший - подача S_z на зуб фрези. При збільшенні діаметра циліндричної заготовки *D*, подачі S_z на зуб фрези відхилення від перпендикулярності Δ*p* торцевої поверхні зростає, а при збільшенні товщини фрези *B* – спадає.

Максимальне значення відхилення від перпендикулярності Δ*p* торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою становить 0,26 мм, а мінімальне – 0,08 мм. Збільшення діаметра циліндричної заготовки *D* від 30 мм до 50 мм призводить до зростання відхилення від перпендикулярності Δ*p* торцевої поверхні в 1,44 рази. Збільшення подачі S_z на зуб фрези від 0,04 мм/зуб до 0,12 мм/зуб призводить до зростання відхилення від перпендикулярності Δ*p* торцевої поверхні в 1,25 рази, а збільшення товщини фрези *B* від 4 мм до 6 мм призводить до зменшення відхилення від перпендикулярності Δ*p* торцевої поверхні в 1,53 рази.

2.3. Висновки

У розділі проведено дослідження динаміки різання циліндричної заготовки дисковою фрезою. Представлено схему динамічної моделі процесу різання циліндричної заготовки дисковою фрезою на фрезерно-відрізному верстаті. Дослідження деформацій та динамічних навантажень на

конструктивні елементи різання циліндричної заготовки дисковою фрезою з достатньою для інженерних розрахунків точністю проведено на основі виведення системи диференціальних рівнянь, що визначають вплив зовнішніх навантажень на деформації елементів системи та їх розв'язку чисельними методами.

Для розв'язку системи диференціальних рівнянь з нульовими початковими умовами використано прикладне програмне забезпечення, що має підпрограму чисельного методу Рунге-Кутта. Розв'язок представлено у вигляді графіків зміни: кутової деформації, швидкості кутової деформації та динамічного навантаження дискової відрізної фрези в часі; лінійної деформації та швидкості деформації циліндричної заготовки в часі; кутової деформації оправки для кріплення дискової фрези в часі.

Встановлено, що найбільші динамічні навантаження, деформації та швидкості деформацій дискової відрізної фрези та циліндричної заготовки виникають в момент врізання другого зуба фрези у заготовку з ударним навантаженням. Спостерігалось виникнення періодичних максимальних коливань дискової відрізної фрези та циліндричної заготовки з періодом, що дорівнює періоду між послідовними врізаннями зубів фрези у заготовку.

Максимальне значення кутової деформації дискової відрізної фрези в моменти удару зуба фрези та заготовки становило 0,17 град із середнім значенням 0,1 град, при цьому максимальна швидкість кутової деформації дискової відрізної фрези становила 0,3 град/с із середнім значенням 0,15 град/с, максимальне значення динамічного навантаження на дисковій відрізній фрезі становило 9000 Н із середнім значенням 5000 Н.

Максимальне значення лінійної деформації циліндричної заготовки в моменти удару зуба фрези та заготовки становило 0,036 мм із середнім значенням 0,025 мм, при цьому максимальна швидкість лінійної деформації циліндричної заготовки становила 0,25 мм/с із середнім значенням 0,1 мм/с.

Представлено результати експериментальних досліджень відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні циліндричної заготовки після

відрізання дисковою фрезою. Визначено, найбільший вплив на відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою має товщина фрези B. Менший вплив має діаметр циліндричної заготовки D і найменший - подача S_z на зуб фрези. При збільшенні діаметра циліндричної заготовки D, подачі S_z на зуб фрези відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні зростає, а при збільшенні товщини фрези B – спадає.

Максимальне значення відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою становить 0,26 мм, а мінімальне – 0,08 мм. Збільшення діаметра циліндричної заготовки D від 30 мм до 50 мм призводить до зростання відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні в 1,44 рази. Збільшення подачі S_z на зуб фрези від 0,04 мм/зуб до 0,12 мм/зуб призводить до зростання відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні в 1,25 рази, а збільшення товщини фрези B від 4 мм до 6 мм призводить до зменшення відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні в 1,53 рази.

3 ТЕХНОЛОГІЧНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

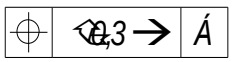
3.1. Службове призначення деталі

Деталь “Вал” ШР9.419.418 в входить до складу опорно-поворотного пристрою антенної системи 5 м. Основне призначення деталі - передача руху виконавчим елементам механізму.

Основними поверхнями деталі “Вал” ШР9.419.418 є: зовнішня циліндрична поверхня $\varnothing 24h6(_{-0,013})$; Ra0,8 , яка призначена для встановлення підшипника кочення; зовнішня квадратна поверхня 17b12; Ra12,8 призначена для установки рукоятки для передачі руху та фіксації передаючого елемента; внутрішня циліндрична поверхня $\varnothing 50H14(^{+0,62})$, Rz40 є посадочною поверхнею для деталі поворотного пристрою; паз 3,2H14; $25^{+0,5}$; $30^{o}\pm 30'$; Ra12,8 – для встановлення фіксуючого елементу – замка; отвір $\varnothing 2H7(^{+0,01})$; Ra1,6 призначений для встановлення фіксуючого штифта; шість отворів $\varnothing 6,6H14(^{+0,36})$; Rz40 призначені для закріплення деталі поворотного пристрою болтами.

Аналіз технічних вимог представлено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Аналіз технічних вимог

Номер поверхні	Назва поверхні	Квалітет	Шорсткість
1	2	3	4
1	Зовнішня циліндрична поверхня $\varnothing 70h14(_{-0,74})$	14	Rz40
2, 16	Торцева поверхня $88h14(_{-0,87})$	14	Ra12,8
3	Отвір $\varnothing 50H14(^{+0,62})$, вісь отвору є базовою	14	Rz40
4	Внутрішня торцева поверхня 17±0,2	14	Rz80
5...10	Шість отворів $\varnothing 6,6H14(^{+0,36})$, 	14	Rz40

Закінчення таблиці 3.1

1	2	3	4
11	Торцева поверхня 22h14($_{-0,52}$)	14	Rz80
12	Зовнішня циліндрична поверхня ∅24h6($_{-0,013}$)	6	Ra0,8
13	Фаска зовнішня 30°	14	Ra12,8
14	Фаска внутрішня ∅3H14; 90	14	Ra12,8
17	Паз b=3,2H14($^{+0,30}$); $25^{+0,5}$	14	Ra12,8
18	Радіус R1,6	14	Ra12,8
23...26	Фаска зовнішня 1×45°	14	Ra12,8
19...22	Поверхні квадрата 17b12; 35±0,3	12	Ra12,8
27	Отвір $\varnothing 8{,}43^{+0,3}$; $l=30^{+1,6}$	13	Ra 6,7
28	Фаска внутрішня 1×45°	14	Ra12,8
29	Отвір ∅2H7($^{+0,01}$); 6±0,1	7	Ra1,6
30	Поверхня паза кутова 30°±30′	14	Ra12,8
31	Внутрішній різевий отвір M10-7H; l=14min; 15±0,2	(7)	Ra6,7

3.2. Вибір способу одержання заготовки

Деталь “Вал” ШР9.419.418 виготовляється з легованої сталі 40Х13. Тому запропоновано такі способи одержання заготовки:

1) прокат сортовий гарячекатаний круглий. Довжина прутка 3 м. Різання прокату на штучні заготовки здійснюється на фрезерно-відрізному верстаті. Круг $\frac{75-\text{В ГОСТ2590}-88}{40\text{Х13}-1-2\ \text{ГОСТ5632}-72}$.

2) штамповка на горизонтально-кувальній машині.

Розраховуємо масу штамповки [3]:

$$m_{ш} = m_{д} \cdot к_{р}. \qquad (3.1)$$

де $к_{р} = 1{,}5$.

Маса штамповки:

$$m_{ш} = m_{д} \cdot к_{р} = 0{,}535 \cdot 1{,}5 = 0{,}803 \text{ кг}.$$

Для розрахунку припусків заготовки використано узагальнені в результаті

аналізу дані із таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Припуски деталі “Вал” ШР9.419.418

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) Круг $\frac{75-В\ ГОСТ2590-88}{40Х13-1-2\ ГОСТ5632-72}$				
Торцева поверхня $88h14(_{-0,87})$	Ra 12,8	0,8	3,5 × 2 = 7,0	95±0,4
Зовнішня циліндрична поверхня $\varnothing 70h14(_{-0,74})$	Rz40	1,6	2,5 × 2 = 5,0	$\varnothing 75^{+0,5}_{-1,1}$
1) Штамповка на горизонтально-кувальній машині				
Торцева поверхня $88h14(_{-0,87})$	Ra12,8	1,6	1,2 × 2 = 2,4	$90,4^{+1,1}_{-0,5}$
Зовнішня циліндрична поверхня $\varnothing 70h14(_{-0,74})$	Rz40	1,6	1,5 × 2 = 3,0	$\varnothing 73^{+1,1}_{-0,5}$
Отвір $\varnothing 50H14(_{-0,62})$	Rz40	1,6	1,5 × 2 = 3,0	$\varnothing 47^{+1,1}_{-0,5}$
Зовнішня торцева поверхня $22h14(_{-0,52})$	Rz40	1,4	1,4	$23,4^{+0,9}_{-0,5}$ на кресленні $24,6^{+0,9}_{-0,5}$
Внутрішня торцева поверхня 17±IT14/2	Rz40	1,4	1,4	$15,6^{+0,9}_{-0,5}$ на кресленні $16,8^{+0,9}_{-0,5}$
Зовнішня циліндрична поверхня $\varnothing 24h6(_{-0,013})$	Ra0,8	1,4	1,5 × 2 = 3,0	$\varnothing 27^{+0,9}_{-0,5}$

Ескізи запропонованих варіантів литих заготовок представлено на рис. 3.1, 3.2.

Технологічні витрати матеріалу на заготовку із прокату:

– пов’язані із некратністю довжини прокату:

$$L_{нк.} = L_{пр.} - x \cdot (L_{заг.} + L_{р.}), \qquad (3.2)$$

Кількість заготовок, що одержується з одного прутка прокату:

$$x = \frac{L_{пр.}}{L_{заг.} + L_{р.}}. \quad (3.3)$$

Довжина заготовки до механічної обробки:

$$L_{заг.} = L_{дет.} + 2a, \quad (3.4)$$

де а – припуски на торцях заготовки. 2а = 7 2а = 7 мм.

Тоді:

$$L_{заг.} = 88 + 7 = 95 мм.$$

Із формули (3.3) знаходимо:

$$x = \frac{3000}{95 + 12,5} = 27,9 \text{ шт.}$$

Підставляємо дані у формулу (3.2):

$$L_{нк.} = 3000 - 27 \cdot (95 + 12,5) = 97,5 мм.$$

Визначаємо розхід матеріалу на заготовку:

$$Q_{тв.} = \frac{Q_1 \cdot (100 + B_{заг.})}{100}. \quad (3.5)$$

Визначаємо масу заготовки як добуток об’єму заготовки та густини матеріалу заготовки:

$$Q_1 = V_з \cdot \rho. \quad (3.6)$$

Об’єм заготовки:

$$V_з = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot H}{4}, \quad (3.7)$$

$$V_з = \frac{\pi \cdot 75^2 \cdot 95}{4} = 419484{,}4 \text{ мм}^3 \approx 419{,}5 \text{см}^3,$$

$$Q_1 = 419{,}5 \cdot 7{,}85 = 3292{,}95 \text{ г} \approx 3{,}3 \text{кг}.$$

Витрати матеріалу на не кратність:

$$B_{нк.} = \frac{(L_{нк.} \cdot 100)}{L_{пр.}}, \quad (3.8)$$

$$B_{нк.} = \frac{(97{,}5 \cdot 100)}{3000} = 3{,}25\%.$$

Підставляючи дані у формулу (3.5), отримуємо:

$$Q_{тв.} = \frac{3{,}3 \cdot (100+3{,}25)}{100} = 3{,}4 \text{ кг}.$$

Визначаємо об’єм заготовки для другого методу:

$$V_1 = \frac{\pi \cdot 27^2 \cdot 65{,}8}{4} = 37655{,}04 \text{мм}^3 \approx 37{,}66 \text{ см}^3.$$

$$V_2 = \frac{\pi \cdot 73^2 \cdot 24{,}6}{4} = 101653{,}34 \text{мм}^3 \approx 101{,}65 \text{ см}^3.$$

$$V_3 = \frac{\pi \cdot 47^2 \cdot 16{,}8}{4} = 29132{,}29 \text{мм}^3 \approx 29{,}13 \text{ см}^3.$$

$$V_{заг2} = V_1 + V_2 - V_3, \quad (3.9)$$

$$V_{заг} = 37{,}66+101{,}65 - 29{,}13 = 110{,}18 \text{ см}^3.$$

Маса заготовки:

$$Q_2 = 110{,}18 \cdot 7{,}85 = 864{,}913 \text{ г} \approx 0{,}865 \text{ кг}.$$

Коефіцієнт використання матеріалу:

$$К_{в.м.} = \frac{q}{Q}, \qquad (3.10)$$

$$К_{в.м.1} = \frac{0,535}{3,4} = 0,16.$$

$$К_{в.м.2} = \frac{0,535}{0,865} = 0,62.$$

В результаті аналізу в умовах середньосерійного типу виробництва деталі “Вал” ШР9.419.418 вибрано для виготовлення заготовки штампування на горизонтально-кувальній машині.

3.3. Формування технологічного процесу

Здійснено проектування технологічного процесу механічної обробки деталі “Вал” ШР9.419.418.

005 Токарна з ЧПК

1. Підрізати остаточно торець 2, витримуючи розмір $89,2_{-0,87}$.

2. Точити остаточно зовнішню циліндричну поверхню 1, витримуючи розмір $\varnothing 70_{-0,74}$.

3. Розточити остаточно внутрішню циліндричну поверхню 3 з підрізанням торця 4, витримуючи розміри $\varnothing 50^{+0,62}$; $17 \pm 0,2$.

010 Токарна з ЧПК

1. Підрізати остаточно торець 16, витримуючи розмір $88_{-0,87}$.

2. Точити остаточно зовнішню циліндричну поверхню під квадрат, фаску 13, точити попередньо зовнішню циліндричну поверхню 12 з підрізанням торця 11 послідовно за програмою, витримуючи розміри $\varnothing 22_{-0,52}$; $35 \pm 0,3$; 30^{o}; $\varnothing 25,22_{-0,52}$; $22_{-0,52}$.

3. Точити остаточно зовнішню циліндричну поверхню 12, витримуючи розмір $\varnothing 24,396_{-0,084}$.

Операція 015 Горизонтально-фрезерна.

1. Фрезерувати остаточно дві поверхні квадрата 19, 21 одночасно, витримуючи розміри $17_{-0,18}$; $35 \pm 0,3$.

2. Повернути деталь на 90°.

3. Фрезерувати остаточно наступні дві поверхні квадрата 20, 22 одночасно, витримуючи розміри $17_{-0,18}$; 35±0,3.

4. Фрезерувати остаточно дві фаски 23, 25 на квадраті одночасно, витримуючи розмір 1×45°.

5. Повернути деталь на 90°.

6. Фрезерувати остаточно дві наступні фаски 21, 24 на квадраті одночасно, витримуючи розмір 1×45°.

Операція 020 Свердлильна з ЧПК.

1. Центрувати отвір 27, витримуючи розміри $\varnothing 1^{+0,25}$; $\varnothing 2,12^{+0,25}$; 2,27±0,1.

2. Свердлити отвір 27, витримуючи розмір $\varnothing 8,3^{+0,3}$; 30±0,5.

3. Зенкувати фаску 28, витримуючи розмір ∅9; 0,5×45°.

4. Нарізати різь 31, витримуючи розміри М10-7Н; l=14min.

Операція 025 Вертикально-фрезерна.

1. Фрезерувати остаточно паз 17, витримуючи розміри $3,2^{+0,30}$; $25^{+0,5}$.

2. Повернути деталь на 30°.

3. Фрезерувати остаточно кутову поверхню паза 30, витримуючи розміри 6±0,1; 30°±30′ $3,2^{+0,30}$; $25^{+0,5}$.

030 Свердлильна з ЧПК.

1. Центрувати отвір 29, витримуючи розміри $\varnothing 1^{+0,25}$; $\varnothing 2,12^{+0,25}$; 2,27±0,1.

2. Свердлити отвір 29, витримуючи розмір $\varnothing 1,8^{+0,1}$; $17_{-0,2}$.

3. Зенкувати фаску 14, витримуючи розмір $\varnothing 3^{+0,25}$; 90°.

4. Розвертати попередньо отвір 29, витримуючи розмір $\varnothing 1,95^{+0,025}$.

5. Розвертати остаточно отвір 29, витримуючи розмір $\varnothing 2^{+0,01}$.

035 Круглошліфувальна

1. Шліфувати попередньо зовнішню циліндричну поверхню 12, витримуючи розміри $\varnothing 24,085^{+0,033}$.

2. Шліфувати остаточно зовнішню циліндричну поверхню 12, витримуючи розміри $\varnothing 24^{+0,013}$.

040 Свердлильна з ЧПК.

1. Центрувати шість отворів 5...10, витримуючи розміри $\varnothing 1,6^{+0,25}$; $\varnothing 3,35^{+0,3}$;

3,52±0,1.

2. Свердлити шість отворів 5...10, витримуючи розміри ∅$6{,}6^{+0{,}36}$; ∅60±0,22; $22_{-0{,}52}$.

Операція 045 Контроль.

3.4. Визначення припусків на оброблення

Результати оформлено у вигляді таблиці 3.4.

Схема розташування припусків та допусків для поверхні ∅24h6 представлена на рис. 3.3.

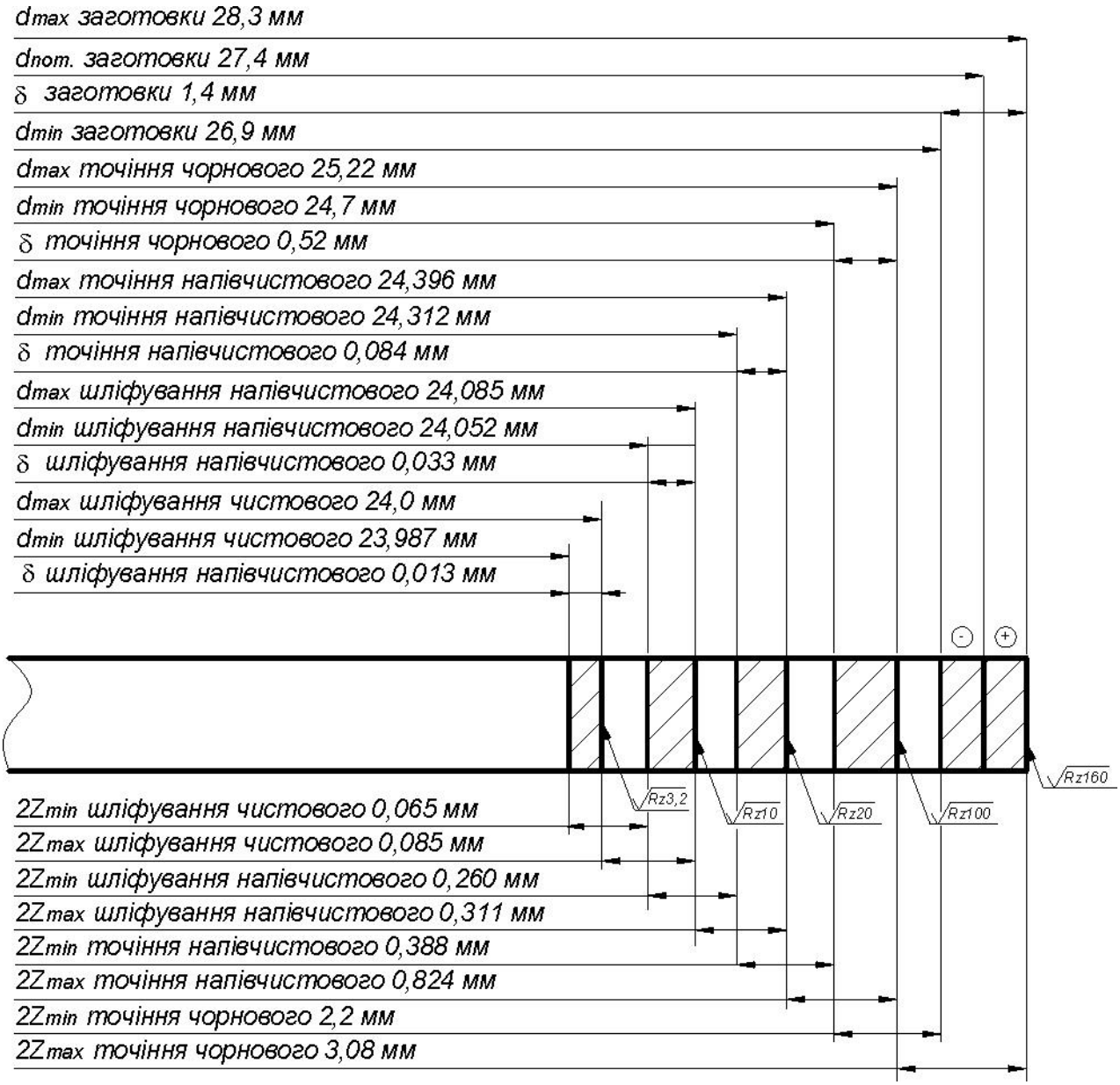


Рисунок 3.3 – Схема розташування припусків та допусків для поверхні ∅24h6

Таблиця 3.4 – Розрахункові припуски деталі “Вал” ШР9.419.418

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
Торцева поверхня $88h14(_{-0,87})$					
Точіння поперечною подачею	14	Ra 12,8	0,87	1,2 × 2 = 2,4	$88_{-0,87}$
Заготовка	–	Rz 160	1,6	2,4	$90,4^{+1,1}_{-0,5}$
Зовнішня циліндрична поверхня $\varnothing 70h14(_{-0,74})$					
Точіння напівчистове	14	Rz40	0,74	1,5 × 2 = 3,0	$\varnothing 70_{-0,74}$
Заготовка	–	Rz160	1,6	3,0	$\varnothing 73^{+1,1}_{-0,5}$
Отвір $\varnothing 50H14(^{+0,62})$					
Розточування напівчистове	14	Rz40	0,62	1,5 × 2 = 3,0	$\varnothing 50_{-0,62}$
Заготовка	–	Rz160	1,6	3,0	$\varnothing 47^{+1,1}_{-0,5}$
Зовнішня торцева поверхня $22h14(_{-0,52})$					
Точіння напівчистове поперечне	11	Rz40	0,52	1,4	$22_{-0,52}$
Заготовка	–	Rz160	1,4		$23,4^{+0,9}_{-0,5}$
Внутрішня торцева поверхня 17±IT14/2					
Точіння поздовжнє напівчистове	11	Ra 6,7	0,4	1,4	17±0,2
Заготовка	–	Rz160	1,4		$15,6^{+0,9}_{-0,5}$
Отвір $\varnothing 2H7(^{+0,01})$; 6±0,1 Ra1,6					
Розвертання чистове	7	Ra1,6	0,01	0,025 × 2 = 0,05	$\varnothing 2^{+0,01}$
Розвертання чорнове	9	Ra6,7	0,025	0,075 × 2 = 0,15	$\varnothing 1,95^{+0,025}$
Свердління	12	Ra12,8	0,1	0, 9 × 2 = 1,8	$\varnothing 1,8^{+0,1}$
Центрування	14	Ra12,8	0,25	0,5 × 2 = 1,0	$\varnothing 1^{+0,25}$
Заготовка	–	Rz 160	4,0	–	суцільний матеріал

3.5. Визначення режимів різання

Результати розрахунку режимів різання деталі “Вал” ШР9.419.418подано у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Режими різання технологічного процесу виготовлення деталі “Вал” ШР9.419.418

Номер, назва операції, зміст переходу	t, мм	L, мм	i	T_m, хв	S, мм/об	n, об/хв	V, м/хв	S_m, мм/хв	T_o, хв	N, кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
005 Токарна з ЧПК										
Перехід 2 Підрізати остаточно торець 2, витримуючи розмір $89{,}2_{-0{,}87}$	1,2	16	1	64	0,6	356	81,7	214	0,075	3,6
Перехід 3 Точити остаточно зовнішню циліндричну поверхню 1, витримуючи розмір $\varnothing 70_{-0{,}74}$	1,5	26,4	1	64	0,6	356	70,5	214	0,124	4,35
Перехід 4 Розточити остаточно внутрішню циліндричну поверхню 3 з підрізанням торця 4, витримуючи розміри $\varnothing 50^{+0{,}62}$; 17±0,2	1,5 1,4	45	1	64	0,4	502	78,7	201	0,225	4,58
010 Токарна з ЧПК										
Перехід 2 Підрізати остаточно торець 16, витримуючи розмір $88_{-0{,}87}$	1,2	16,5	1	64	0,6	712	61,12	427	0,04	3,6
Перехід 3 Точити остаточно зовнішню циліндричну поверхню під квадрат, фаску 13, точити попередньо зовнішню циліндричну поверхню 12 з підрізанням торця 11 послідовно за програмою, витримуючи розміри $\varnothing 22_{-0{,}52}$; 35±0,3; 30^o; $\varnothing 25{,}22_{-0{,}52}$; $22_{-0{,}52}$.	2,7 1,09 1,4	94,82	1	64	0,46	1004	69,12	462	0,21	4,9

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Перехід 4 Точити остаточно зовнішню циліндричну поверхню 12, витримуючи розмір $\varnothing 24{,}396_{-0{,}084}$.	0,412	36,83	1	64	0,4	1004	76,8	401	0,092	0,26
015 Горизонтально-фрезерна										
Перехід 2 Фрезерувати остаточно дві поверхні квадрата 19, 21 одночасно, витримуючи розміри $17_{-0{,}18}$; 35±0,3	2,5	39	1	140	0,18 мм/зуб 1,8 мм/об	302	117,9	541	0,072	4,52
Перехід 3 Повернути деталь на 90°										
Перехід 4										
Фрезерувати остаточно наступні дві поверхні квадрата 20, 22 одночасно, витримуючи розміри $17_{-0{,}18}$; 35±0,3	2,5	39	1	140	0,18 мм/зуб 1,8 мм/об	302	117,9	541	0,072	4,52
Перехід 5										
Фрезерувати остаточно дві фаски 23, 25 на квадраті одночасно, витримуючи розмір 1×45°	1,0	11	1	124	0,14 мм/зуб 1,68 мм/об	672	132,6	1125,7	0,01	3,02
Перехід 6										
Поворот на 90 град										
Перехід 7										
Фрезерувати остаточно дві наступні фаски 21, 24 на квадраті одночасно, витримуючи розмір 1×45°	1,0	11	1	124	0,14 мм/зуб 1,68 мм/об	672	132,6	1125,7	0,01	3,02
020 Свердлильна з ЧПК										
Перехід 2										
Центрувати отвір 27, витримуючи розміри $\varnothing 1{,}1^{+0{,}25}$; $\varnothing 2{,}14^{+0{,}25}$; 2,27±0,1	0,5	3,77	1	18	0,08	1404	4,6	114	0,03	0,05
Перехід 3										

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Свердлити отвір 27, витримуючи розмір $\varnothing 8{,}43^{+0{,}3}$; 30±0,5	4,215	30	1	18	0,08	1204	122	26	0,1	1,4
Перехід 4										
Зенкувати фаску 28, витримуючи розмір ∅9; 0,5×45°	0,6	1,6	1	18	0,6	1271	14	768	0,002	0,12
Перехід 5										
Нарізати різь 31, витримуючи розміри М10-7Н; l=14min	1,299	34,5	1	18	1,5	454	14,4	677	0,05	0,1
025 Вертикально-фрезерна										
Перехід 2 Фрезерувати остаточно паз 17, витримуючи розміри $3{,}2^{+0{,}30}$; $25^{+0{,}5}$	3,2	25,67	1	44	0,05 мм/зуб 0,2 мм/об	2242	22,7	449	0,057	1,82
Перехід 3										
Повернути деталь на 30°										
Перехід 4 Фрезерувати остаточно кутову поверхню паза 30, витримуючи розміри 6±0,1; 30°±30′; $3{,}2^{+0{,}30}$; $25^{+0{,}5}$	3,2	12,73	1	44	0,05 мм/зуб 0,2 мм/об	2242	22,7	449	0,028	1,82
030 Свердлильна з ЧПК										
Перехід 2 Центрувати отвір 29, витримуючи розміри $\varnothing 1^{+0{,}25}$; $\varnothing 2{,}12^{+0{,}25}$; 2,27±0,1	0,5	3,77	1	18	0,08	1402	4,41	114	0,03	0,05
Перехід 3 Свердлити отвір 29, витримуючи розмір $\varnothing 1{,}8^{+0{,}1}$	0,9	18	1	18	0,08	1404	7,92	114	0,16	0,9
Перехід 4 Зенкувати фаску 14, витримуючи розмір $\varnothing 3^{+0{,}25}$; 90°	0,6	1,6	1	18	0,6	1272	14	764	0,002	0,12
Перехід 5 Розвертати попередньо отвір 29, витримуючи розмір $\varnothing 1{,}95^{+0{,}025}$	0,075	17	1	18	0,8	1402	8,61	1124	0,015	0,06

Закінчення таблиці 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Перехід 6 Розвертати остаточно отвір 29, витримуючи розмір $\varnothing 2^{+0,01}$.	0,025	17	1	18	0,56	1402	12,9	786	0,022	0,05
035 Круглошліфувальна										
Перехід 2 Шліфувати попередньо зовнішню циліндричну поверхню 12, витримуючи розміри $\varnothing 24{,}085^{+0,033}$	0,156	61	–	–	$S_п$= 0,025 мм/об $S_о$ = 24 мм/об	191	$V_{s.кол.}$= 12 м/хв $V_{s.позд.}$= 3 м/хв	–	0,072	3,8
Перехід 3 Шліфувати остаточно зовнішню циліндричну поверхню 12, витримуючи розміри $\varnothing 24^{+0,013}$	0,0425	61	–	–	$S_п$= 0,005 мм/об $S_о$ = 16 мм/об	482	$V_{s.кол.}$ 30 м/хв $V_{s.позд.}$ 5 м/хв	–	0,12	–
040 Свердлильна з ЧПК										
Перехід 2 Центрувати шість отворів 5...10, витримуючи розміри $\varnothing 1{,}5^{+0,25}$; $\varnothing 3{,}25^{+0,3}$; 3,53±0,1	0,8	5,02	6	15	0,08	1404	7,2	114	0,27	0,2
Перехід 3 Свердлити шість отворів 5...10, витримуючи розміри $\varnothing 6{,}6^{+0,36}$; $22_{-0,52}$	3,3	27	6	28	0,14	874	19	122	1,33	1,64

Результати розрахунку технічних норм часу технологічного процесу виготовлення деталі “Вал” ШР9.419.418 подано у таблиці 3.6 та на графіку завантаження обладнання (рис. 3.4).

Таблиця 3.6 – Норми часу на механічну обробку деталі “Вал” ШР9.419.418

Номер та назва операції	$T_о$, хв	Допоміжний час, $T_д$ хв			$T_{оп}$, хв	Час обслуговування, $T_{об}$, хв			$T_{шт}$, хв.	$T_{п.з.}$, хв.	n, шт	$T_{шт.к.}$, хв
		$T_{у.}$	$T_{пер.}$	$T_{вим.}$		$T_{тех.об.}$	$T_{орг.об.}$	$T_{відп.}$				
005 Токарна з ЧПК	0,424	0,17	0,5	0,192	1,48	0,1036			1,63	26,65	223	1,75
010 Токарна з ЧПК	0,342	–	–	–	–	–	–	–	–	–		0,68
015 Горизонтально-фрезерна	0,164	–	–	–	–	–	–	–	–	–		0,3
020 Свердлильна з ЧПК	0,17	–	–	–	–	–	–	–	–	–		0,29
025 Вертикально-фрезерна	0,085	–	–	–	–	–	–	–	–	–		0,156
030 Свердлильна з ЧПК	0,229	–	–	–	–	–	–	–	–	–		0,39
035 Кругло-шліфувальна	0,192	–	–	–	–	–	–	–	–	–		0,4
040 Свердлильна з ЧПК	1,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–		2,752

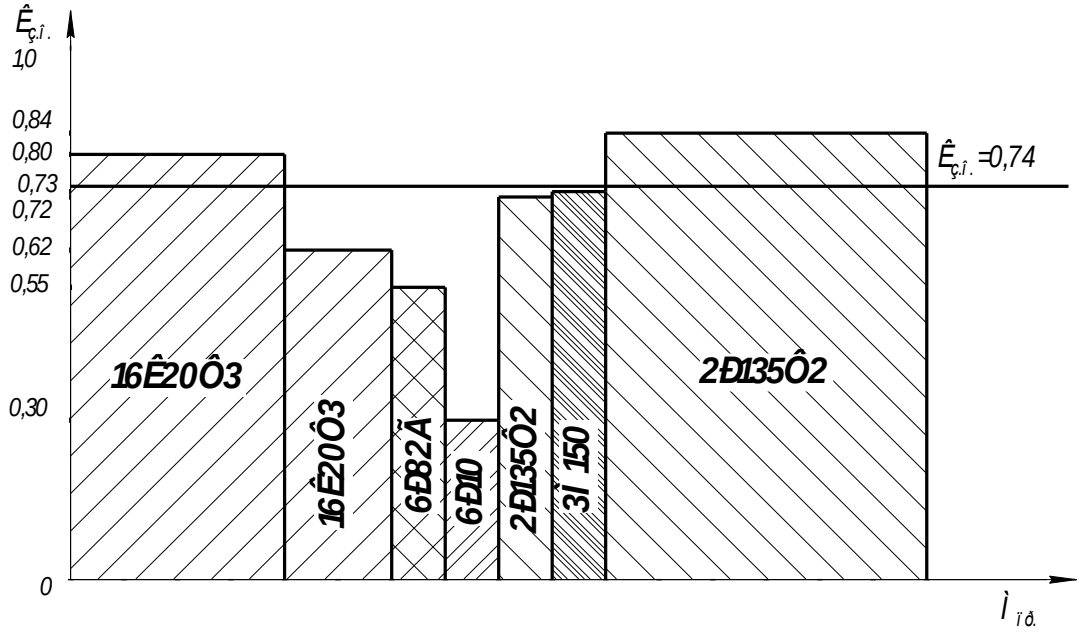


Рисунок 3.4 – Графік завантаження обладнання

3.6. Розрахунок пристосування

Для обробки деталі “Вал” ШР9.419.418 на 040 свердлильній з ЧПК операції розроблено спеціальний пристрій. Базування заготовки здійснюється на

призмі 18 зовнішньою циліндричною поверхнею ∅ 70h14 з упором 14 по торцевій поверхні. Затиск виконується притискачем 19 по зовнішній циліндричній поверхні ∅24 через передавально-підсилюючий механізм від пневмоциліндра.

Похибку установки заготовки у пристрої визначено за відомою формулою [20]:

$$\Delta\varepsilon_{\text{у}} = \sqrt{\Delta\varepsilon_{\text{б}}^2 + \Delta\varepsilon_{\text{з}}^2 + \Delta\varepsilon_{\text{пр}}^2}\,. \qquad (3.11)$$

На операції 040 свердлильній з ЧПК проводиться обробка отворів ∅6,6Н14($^{+0,36}$); l = 22 мм, 60±0,3.

Похибка базування розраховується за формулою:

$$\Delta\varepsilon_{\text{б.60}} = 0,5\text{TD}\frac{1}{\sin\alpha}, \qquad (3.12)$$

де TD – допуск на розмір ∅70Н12($_{-0,3}$), TD = 0,3 мм.

α = 45°.

Тоді, $\Delta\varepsilon_{\text{б.60}} = 0,5\cdot 0,3\frac{1}{\sin 45^{\circ}} = 0,212\text{мм} = 212\text{мкм}$.

Похибка закріплення складе $\Delta\varepsilon_{\text{з}}$ = 80 мкм.

Похибка пристосування $\Delta\varepsilon_{\text{пр}}$ = 0,015 мм.

Підставляємо дані у формулу (3.4) та одержуємо:

$$\Delta\varepsilon_{\text{у55}} = \sqrt{\Delta\varepsilon_{\text{б}}^2 + \Delta\varepsilon_{\text{з}}^2 + \Delta\varepsilon_{\text{пр}}^2} = \sqrt{212^2 + 80^2 + 15^2} = 227\text{мкм} = 0,227\text{мм}\,.$$

Визначення сили затиску заготовки проведено при свердління отворів ∅6,6Н14($^{+0,36}$); l = 22 мм. на 040 свердлильній з ЧПК операції.

Розрахункова схема спеціального пристрою для базування та закріплення заготовки подана на рисунку 3.5.

Відповідно до розрахункової схеми рис. 3.5 із рівняння рівноваги моментів знаходимо необхідну силу затиску заготовки:

$$P_з = \frac{2K \cdot M_{кр}}{D_1 \cdot f_1 + D_з \cdot \frac{f_2}{\sin\alpha}}\ , \qquad (3.13)$$

де f_2=f_1=0,16 – коефіцієнт тертя між поверхнями заготовки та призми;

$\alpha = 45^o$.

Момент різання при свердлінні отвору 6,6 мм [16]:

$$M_{кр} = 10 \cdot C_м \cdot D^q \cdot S^y \cdot K_р, \qquad (3.14)$$

де $C_М$ = 0,0345; q = 2,0; y = 0,8 [16].

D = 6,6 мм;

S = 0,08 мм/об;

$$K_р = \left(\frac{\sigma_в}{750}\right)^n = \left(\frac{980}{750}\right)^{0,75} = 1,22.$$

Отже,

$$M_{кр} = 10 \cdot 0,0345 \cdot 6,6^{2,0} \cdot 0,08^{0,8} \cdot 1,22 = 1,14\ Н \cdot м.$$

K = 3,7.

Із формули (3.13) маємо:

$$P_з = \frac{2 \cdot 3,7 \cdot 1,14}{0,024 \cdot 0,16 + 0,07 \cdot \left(\frac{0,16}{\sin 45}\right)} = 238\ Н.$$

Сила штовхання на штоці пневмоциліндра [20]:

$$F = 0,785 \cdot (D_ц^2 - d_{шт}^2) \cdot p \cdot \eta, \qquad (3.15)$$

$$F = 0,785 \cdot (0,07^2 - 0,022^2) \cdot 0,4 \cdot 10^6 \cdot 0,9 = 1247\,Н.$$

Коефіцієнт, який враховує зміщення точки прикладання сили $P_З$ [20]:

$$K = 1 - \frac{3l_2}{L} \cdot f. \qquad (3.16)$$

де l_2 = 25 мм; L = 79 мм, f = 0,1.

$$K = 1 - \frac{3 \cdot 0,025}{0,079} \cdot 0,1 = 0,905.$$

Сила затиску заготовки від пневмоциліндра через передавально-підсилюючий клиновий механізм із роликом [20]::

$$W = \frac{F}{\left(tg\left(\beta + arctg\left(\varphi \cdot \frac{d}{D} \right) \right) + tg\,\varphi_1 \right)}, \qquad (3.17)$$

де β=10°; d=12 мм; D=24 мм.

$$W = \frac{1247}{\left(tg\left(10 + arctg\left(6 \cdot \frac{12}{24} \right) \right) + tg\,6 \right)} = 2200\,\text{Н}.$$

Оскільки $W = W \cdot K = 2200 \cdot 0,905 = 1991\text{Н}. > P_{зат} = 238$ Н, то вимога надійного закріплення заготовки забезпечується.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Техніка безпеки під час роботи на верстатах

До виконання робіт на металообробних верстатах допускаються особи, які пройшли медичний огляд, спеціальне навчання та одержали посвідчення на право виконання робіт.

До самостійного виконання робіт допускаються особи, які пройшли стажування протягом 2–15 змін під керівництвом бригадира (майстра) або досвідченого працівника. Виконується тільки та робота, яка доручена відповідним нарядом (крім екстремальних та аварійних ситуацій), не можна передоручати її іншим особам.

Не допускається перебування сторонніх осіб у робочій зоні.

Не можна приступати до роботи на технічно несправних або з знятими захисними пристроями верстатах, з несправною сигналізацією, контрольними пристроями, з пошкодженим контуром заземлення. При обробці на верстатах довгих деталей (більше довжини робочого стола) необхідно обладнувати ззаду й спереду верстата спеціальні пристрої у вигляд опорних столів з роликами, щоб матеріал не звисав.

Не можна користуватись несправним інструментом, інвентарем і пристроями. Верстати, стелаж, столи, шафи, тумбочки та інше обладнання повинні бути міцними, стійкими і мати висоту, зручну для роботи.

Очищення, змащення, регулювання й ремонт верстатів здійснюється тальки після повної їх зупинки.

Спецодяг, спецвзуття та інші засоби індивідуального захисту повинні відповідати умовам і характеру виконуваної роботи.

Не можна приступати до роботи у стані алкогольного, наркотичного або медикаментозного сп’яніння, у хворобливому або стомленому стані.

Протягом роботи потрібно слідкувати за самопочуттям. При появі стомленості, сонливості, раптового болю треба припинити виконання роботи.

Необхідно виконувати правила внутрішнього трудового розпорядку та правила пожежної безпеки. Не можна використовувати пожежний інвентар не за призначенням.

Під час виконання робіт на працівників можуть діяти небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Фізичні небезпечні й шкідливі виробничі фактори:

- машини й механізми, що рухаються; рухомі частини виробничого обладнання; вироби, заготовки, матеріали, що пересуваються;
- підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони;
- підвищена або знижена температура повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому масці;
- підвищений рівень вібрації;
- підвищена або знижена вологість повітря;
- підвищена або знижена рухомість повітря;
- підвищена напруга в електричній мережі, замикання якої може пройти через тіло людини;
- відсутність або недостатність природного світла;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищена яскравість світла;
- гострі краї, задирки й шорсткість на поверхнях конструкцій, інструменту й обладнання.

Психофізіологічні небезпечні й шкідливі виробничі фактори:

- фізичні перевантаження (статичні й динамічні);
- нервово-психічні перевантаження (перенапруга аналізаторів, монотонність праці, емоційні перевантаження).

Вимоги безпеки перед початком роботи.

Отримайте від керівника робіт вказівки про порядок і безпечні прийоми виконання роботи.

Одягніть і заправте спецодяг. Упевніться, що він прилягає, не має елементів, що звисають, які можуть бути захоплені деталями, що обертаються

або рухаються.

Огляньте робоче місце. Проходи повинні бути вільними, підлога чистою, сухою, без виїмок і нерівностей. Перевірте наявність і справність підніжної дерев'яної решітки.

Перевірте освітленість робочого місця. Світло спрямуйте на ріжучий інструмент зліва.

Видалення стружки дозволяється виконувати тільки після зупинення верстата і відведення інструмента.

Усі предмети, призначені для обробки, за виключенням особливо важких, повинні бути встановлені і закріплені на столі або плиті верстата нерухомо за допомогою лещат, кондукторів або інших надійних пристроїв.

Для витягання інструмента зі шпинделя верстата повинні застосовуватися спеціальні молотки і вибивачі (клини), зроблені із матеріалу, який виключає відокремлення його частинок під час удару.

Шпиндель з патроном повинен самостійно повертатися у верхнє положення у разі відпускання штурвала подачі свердла.

Забороняється:

— застосовувати свердла і патрони з забитим або спрацьованим хвостовиком;

— використовувати під час роботи на верстаті рукавиці;

— утримувати деталь під час роботи руками.

Клини, гвинти та інші елементи, що використовуються для закріплення інструмента, не повинні виступати над периферією шпинделя.

Установку деталей на верстаті і їх знімання з верстата необхідно виконувати тільки тоді, коли шпиндель з ріжучим інструментом знаходяться у вихідному положенні.

Під час заміни інструмента на багатошпиндельних головках, де руки під час цього знаходяться в зоні розташування головок, необхідно користуватися спеціальними підставками, що запобігають падінню головки у разі обриву вантажу.

4.2. Проведення рятувальних робіт на машинобудівному підприємстві у надзвичайних ситуаціях мирного і воєнного часу

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

Рятувальні й інші невідкладні роботи у надзвичайних ситуаціях мирного і воєнного часу, є однією з найголовніших задач цивільної оборони. Мета проведення рятувальних робіт – порятунок людей і надання медичної допомоги постраждалим, ліквідація аварій.

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 угрупування 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 різання циліндричної заготовки дисковою фрезою. Представлено схему динамічної моделі процесу різання циліндричної заготовки дисковою фрезою на фрезерно-відрізному верстаті. Дослідження деформацій та динамічних навантажень на конструктивні елементи різання циліндричної заготовки дисковою фрезою з достатньою для інженерних розрахунків точністю проведено на основі виведення системи диференціальних рівнянь, що визначають вплив зовнішніх навантажень на деформації елементів системи та їх розв'язку чисельними методами.

Для розв'язку системи диференціальних рівнянь з нульовими початковими умовами використано прикладне програмне забезпечення, що має підпрограму чисельного методу Рунге-Кутта. Розв'язок представлено у вигляді графіків зміни: кутової деформації, швидкості кутової деформації та динамічного навантаження дискової відрізної фрези в часі; лінійної деформації та швидкості деформації циліндричної заготовки в часі; кутової деформації оправки для кріплення дискової фрези в часі.

Встановлено, що найбільші динамічні навантаження, деформації та швидкості деформацій дискової відрізної фрези та циліндричної заготовки виникають в момент врізання другого зуба фрези у заготовку з ударним навантаженням. Спостерігалось виникнення періодичних максимальних коливань дискової відрізної фрези та циліндричної заготовки з періодом, що дорівнює періоду між послідовними врізаннями зубів фрези у заготовку.

Максимальне значення кутової деформації дискової відрізної фрези в моменти удару зуба фрези та заготовки становило 0,17 град із середнім значенням 0,1 град, при цьому максимальна швидкість кутової деформації дискової відрізної фрези становила 0,3 град/с із середнім значенням 0,15 град/с, максимальне значення динамічного навантаження на дисковій відрізній фрезі становило 9000 Н із середнім значенням 5000 Н.

Максимальне значення лінійної деформації циліндричної заготовки в моменти удару зуба фрези та заготовки становило 0,036 мм із середнім значенням 0,025 мм, при цьому максимальна швидкість лінійної деформації циліндричної заготовки становила 0,25 мм/с із середнім значенням 0,1 мм/с.

Представлено результати експериментальних досліджень відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою. Визначено, найбільший вплив на відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою має товщина фрези B. Менший вплив має діаметр циліндричної заготовки D і найменший - подача S_z на зуб фрези. При збільшенні діаметра циліндричної заготовки D, подачі S_z на зуб фрези відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні зростає, а при збільшенні товщини фрези B – спадає.

Максимальне значення відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні циліндричної заготовки після відрізання дисковою фрезою становить 0,26 мм, а мінімальне – 0,08 мм. Збільшення діаметра циліндричної заготовки D від 30 мм до 50 мм призводить до зростання відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні в 1,44 рази. Збільшення подачі S_z на зуб фрези від 0,04 мм/зуб до 0,12 мм/зуб призводить до зростання відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні в 1,25 рази, а збільшення товщини фрези B від 4 мм до 6 мм призводить до зменшення відхилення від перпендикулярності Δp торцевої поверхні в 1,53 рази.

Розроблено технологічний процес виготовлення вала ШР9.419.417.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кухарський О. М., Кущак І. В. Методичний посібник до курсового проекту по курсу “Технологія машинобудування”. Тернопіль, 2001. 58 с.

2. Пилипець М.І., Комар Р.В. Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин. Тернопіль, 2019. 58 с.

3. Паливода Ю. Є. Заготовки у машинобудівному виробництві : навчально-методичний посібник / Паливода Ю.Є., Дячун А.Є. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2023. 148 с.

4. Боженко Л. І. Технологія виробництва заготовок у машинобудуванні. Київ: НМК ВО, 1990. 264 с.

5. Добрянський С. С., Малафєєв Ю. М. Методичні вказівки до лабораторних занять та самостійної роботи з дисципліни «Проектування та виробництво заготовок» Частина І. Розробка креслення та технології виготовлення литої заготовки. К.: НТУУ «КПІ», 2012. 71 с.

6. Кухарський, О. М., Кузьмін М. І. Визначення припусків табличним методом. Тернопіль : Видавництво ТДТУ, 2004. 135 с.

7. Паливода Ю. Є., Кухарський О. М. Визначення припусків розрахунково-аналітичним методом, Тернопіль, 2003. 81 с.

8. Розмірні ланцюги: навчально-методичний посібник / Укладачі : Паливода Ю.Є., Дячун А.Є., Капаціла Ю.Б, Ткаченко І.Г. – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. – 132 с.

9. Паливода Ю. Є., Ткаченко І. Г., Капаціла Ю. Б., Гевко Ів. Б. Технологія оброблення корпусних деталей : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2016. 156 с.

10. Методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи з дисциплін “Теоретичні основи технології виробництва деталей та складання машин ” та “Технологія машинобудування” для студентів спеціальностей 131 “Прикладна механіка” і 133 “Галузеве машинобудування” на тему “Структура технологічного процесу. Принципи побудови технологічних операцій” / Укладачі : Паливода Ю.Є., Дячун А.Є. - Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. – 53 с.

11. 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.

12. https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/tools/milling-tools/cut-off-slot-and-groove-milling-tools/coromill-qd.

13. Жидецький В. Ц., Джигирей В. Ц., Мельников О. В. Основи охорони праці : навчальний посібник. Львів: Афіша, 2000. 350 с.

14. Жидецький В. Ц. Практикум із охорони праці : Навчальний посібник. Львів: Афіша, 2000. 349 с.

15. https://www.secotools.com/article/m_7002.

16. 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.

17. Сокіл П.А., Сокальський І.Р., Стаднійчук М.В. Дослідження параметрів процесу зміцнення поверхні отвору кульками. Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій": 6-7 грудня 2023 р.: тези доп. Тернопіль: вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2023. С. 42.

18. Равська Н.С., Панчук В.Г., Рублюк О.В. Теоретичні дослідження впливу параметрів процесу різання на силу різання при відрізанні фрезами. Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». 2009. №57. С. 5-10.

19. Панчук В. Г. Методика розрахунку сили різання при відрізанні фрезою. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. 2008. №1 (11). С. 122-127.

20. Дичковський М. Г. Технологічна оснастка. Проектно-конструкторські розрахунки пристосувань: навч. посіб. Тернопіль : ТДТУ, 2001. 277 с.

21. Tlusty, J., Macneil P. Dynamics of Cutting Forces in End Milling. Annals of CIRP. 1975.Vol. 21, P. 21-25.

22. Kline, W. A., DeVor, R. E. The Effect of Runout on Cutting Geometry and

Forces in End Milling. Int. J. Mach Tool Des. Res. 1983. Vol. 23, P. 123-140.

23. Yusuf Altintas. Mechanism of Cutting Force and Surface Generation in Dynamic Milling. Journal of Engineering for Industry. 1991. Vol. 113. P. 160-168.

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

25. Schmitz T.L., Smith K.S. Machining Dynamics. Springer US, 2009.

26. Диня В. І. Підвищення ефективності виготовлення деталей приводних механізмів односторонньої дії: дис. ... кандидата техн. наук : 05.02.08. Тернопіль, 2012. 191 с.

27. Andriy Diachun, Vasyl Vasylkiv, Oleg Korol, Volodymyr Myhailiuk, Ivan Golovatyi, Andriy Kuras. Investigation of geometrical parameters in screw surfaces whirling process. Вісник Тернопільського національного технічного університету. 2021. № 1(101). С. 68–78.

28. Oleg Lyashuk, Andrii Diachun, Ivan Kuchvara, Yuriy Vovk, Volodymyr Dzyura. Study of power parameters of forming profile elliptical screw workpieces. The International Journal of Integrated Engineering. Universiti Tun Hussein Onn Malaysia Publisher's Office, 2021. Vol. 13 No. 4. P. 142-151.

29. Ляшук О.Л., Дячун А.Є., Третьяков О.Л. Дослідження деформації заготовки в процесі нарізання зовнішніх радіусних канавок пристроєм із декількома різцями. Перспективні технології та прилади. Зб. наук. праць. Луцьк, 2018. Вип. 12. С. 105-110.

30. Ляшук О.Л., Дячун А.Є., Клендій В.М., Третьяков О.Л. Дослідження силових параметрів процесу зміцнення гвинтових поверхонь робочих органів деформуючими пуансонами. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. Івано-Франківськ, 2018. №. 1 (66). С. 38-43.

31. Дячун А.Є., Дзюра В.О., Клендій В.М., Третьяков О.Л. Дослідження методом 3d сканування шорсткості гвинтових поверхонь після процесу ударного зміцнення. Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей. Луцьк, 2017. №38. С. 66-74.