Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра “Машинобудування, мехатроніки і робототехніки”

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедри ММіР
к.т.н., доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА
«____» _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему:

«Дослідження впливу геометричних параметрів розвертки на огранювання отвору при обробці деталі корпус гідророзподільника»

Виконав здобувач вищої освіти 2-го року
магістратури групи ПМ-25М-3
ОПП «Прикладна механіка»
спеціальності G9 «Прикладна механіка»
_____ Святослав ЧИХУН

Керівник роботи к.т.н., доцент
_____ Олександр СКІБІНСЬКИЙ

Рецензент: _____
_____

Кро

Підписано КЕП
Центральноукраїнський національний технічний університет
Чихун Святослав Сергійович
Сертифікат: 18DF2C9B93CEA20404000000C220170058F67B06
Дійсний з 25.11.2026 14:59:08 по 25.11.2027 14:59:07

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	G «Інженерія, виробництво та будівництво»
Спеціальність	G9 «Прикладна механіка»
Освітньо-професійна програма	Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММР
_____ Андрій ГРЕЧКА

«____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА

Святослава ЧИХУНА
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження впливу геометричних параметрів розвертки на огранювання отвору при обробці деталі корпус гідророзподільника

2. Керівник роботи: к.т.н., доц., Олександр Скібінський

3. Строк подання роботи до захисту « » _____ 2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є: дослідження процесу розгортання отворів, аналіз відомих конструктивних особливостей інструменту, які забезпечують зменшення огранювання, розробка методики оптимізації параметрів розвертки.

Завдання:

– виконати огляд процесу розгортання отворів;

– проаналізувати відомі конструктивні особливості інструменту, які забезпечують зменшення огранювання;

– розробити методику оптимізації параметрів розвертки з метою зменшення огранювання оброблених отворів;

– виконати аналіз базового технологічний процес виготовлення деталі корпус, виявити його переваги та недоліки, розробити прогресивний технологічний процес, вибрати верстати, затискні та контрольні пристрої, розрахувати припуски, режими різання та норми часу;

– виконати оптимізацію параметрів та розробити удосконалену для обробки отворів деталі корпус гідророзподільника, яка здатна зменшити або усунути огранювання;

– виконати необхідні економічні розрахунки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
РОЗДІЛ 1	Олександр Скібінський		
РОЗДІЛ 2	Олександр Скібінський		
РОЗДІЛ 3	Олександр Скібінський		
РОЗДІЛ 4	Олександр Скібінський		
РОЗДІЛ 5	Ірина Журило		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	ВСТУП	Вересень 2026	вик.
2	РОЗДІЛ 1	Вересень 2026	вик.
3	РОЗДІЛ 2	Вересень-жовтень 2026	вик.
4	РОЗДІЛ 3	Жовтень 2026	вик.
5	РОЗДІЛ 4	Жовтень-листопад 2026	вик.
6	РОЗДІЛ 5	Листопад 2026	вик.
7	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	Листопад 2026	вик.
8	Графічна частина	Листопад 2026	вик.

Дата видачі завдання «_____» _____ 2026 р.

Керівник роботи _____ Олександр СКІБІНСЬКИЙ
(підпис)

Завдання прийнято до виконання «____» _____ 2026 р.

Здобувач _____ Святослав ЧИХУН
(підпис)

Анотація

Чихун С.С. Дослідження впливу геометричних параметрів розвертки на огранювання отвору при обробці деталі корпус гідророзподільника: кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: спец. G9 «Прикладна механіка» / наук. кер. О.І. Скібінський; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2026. – 94 с. Матеріали презентації 10 креслень.

Метою роботи є оптимізація геометричних параметрів розвертки для зменшення огранювання отворів при розгортанні.

В роботі виконано: огляд процесу розгортання, як чистового методу обробки отворів; проаналізовано відомі конструктивні та технологічні особливості інструменту та процесу розгортання, які забезпечують зменшення відхилення від круглості отвору; виконано аналіз відомих математичних моделей коливань розвертки та визначено геометричні параметри інструмента, що мають вплив на огранювання; розроблено методику оптимізації параметрів розвертки з метою зменшення огранювання отворів; проаналізовано базову технологію обробки деталі корпус гідророзподільника та визначено його переваги й недоліки; розроблено прогресивний технологічний процес обробки корпусу; виконано оптимізацію параметрів та розроблено удосконалену конструкцію розвертки для обробки отворів деталі корпус гідророзподільника, яка здатна зменшити огранювання; виконано необхідні економічні розрахунки.

Актуальність: підвищення точності отвору отриманого розгортанням шляхом оптимізації геометрії розвертки.

Практична цінність: розроблено методику оптимізації параметрів розвертки з метою зменшення огранювання оброблюваних отворів, складено розрахункову модель параметрів інструменту. Виконано оптимізацію параметрів та розроблено удосконалену конструкцію розвертки для обробки отворів деталі корпус гідророзподільника, яка здатна зменшити огранювання.

Ключові слова: розгортання, огранювання отворів, розвертка, нерівномірний крок зубців, оптимізація.

Annotation

Sviatoslav CHYKHUN. A study of the influence of geometric parameters of the cutting tool on the finish of the bore when machining a hydraulic distributor housing. Master's Thesis: CNTU, 2026. - 94 p. Presentation materials 10 il.

The purpose of the work is to optimize the geometric parameters of the reamer to reduce the chamfering of holes during reaming.

The work includes: an overview of the reaming process as a finishing method for processing holes; an analysis of known design and technological features of the tool and the reaming process, which ensure a reduction in deviation from the roundness of the hole; an analysis of known mathematical models of reaming oscillations and determination of the geometric parameters of the tool that affect chamfering; a methodology for optimizing reaming parameters to reduce chamfering of holes has been developed; the basic technology for processing the hydraulic distributor housing part has been analyzed and its advantages and disadvantages have been determined; a progressive technological process for processing the housing has been developed; parameter optimization has been performed and an improved design of the reamer for processing holes in the hydraulic distributor housing part, which is capable of reducing chamfering, has been developed; the necessary economic calculations have been performed.

Relevance: increasing the accuracy of the hole obtained by reaming by optimizing the geometry of the reamer.

Practical value: a method for optimizing reaming parameters has been developed to reduce the chamfering of machined holes, a calculation model of tool parameters has been developed. Parameters have been optimized and an improved reamer design has been developed for machining holes in a hydraulic distributor housing part, which is capable of reducing chamfering.

Keywords: reaming, chamfering of holes, reaming, uneven tooth pitch, optimization.

ЗМІСТ

ВСТУП……..... 7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПРОЦЕСУ РОЗГОРТАННЯ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ОГРАНЮВАННЯ ОТВОРІВ……..…… 8
1.1. Розгортання як метод обробки отворів……..... 8
1.2. Огранювання отвору при розгортанні як об’єкт дослідження…….…… 11
1.3. Порівняльний аналіз відомих математичних і чисельних моделей автоколивань розвертки при розгортанні……... 12
1.4. Огляд відомих технічних рішеннях геометричних параметрів розверток.. 13
1.5. Постановка задач дослідження……. 20
РОЗДІЛ 2. ОПТИМІЗАЦІЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗВЕРТКИ…… 21
2.1. Розрахункова схема сил розвертки з нерівномірним кроком…… 21
2.2. Аналіз радіальних коливань інструмента…… 23
2.3. Критерій оптимізації геометричних параметрів…… 24
2.4. Висновки……..... 28
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБКИ ДЕТАЛІ КОРПУС..... 29
3.1. Службове призначення та характеристика корпусу гідророзподільника… 29
3.2. Розробка технології виготовлення корпусу……. 33
3.3. Висновки……..... 59
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РОЗВЕРТКИ ДЛЯ ОБРОБКИ ОТВОРІВ ДЕТАЛІ КОРПУС…… 60
4.1. Вихідні дані та проєктування розвертки……..……..... 60
4.2. Граничні значення колового кроку розвертки……..…… 62
4.3. Навантаження на зуби та міцність розвертки……..…… 66
4.4. Жорсткість та власна частота розвертки …… 67
4.5. Проєктування розвертки……..……. 69
4.6. Висновки……..……. 70
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ… 72
5.1. Розрахунок потрібної кількості обладнання та коефіцієнту його завантаження……. 72
5.2. Розрахунок календарно-планових нормативів……..... 73
5.3. Аналіз варіантів технологічного процесу……..…… 76
5.4. Розрахунок планової цехової собівартості деталі…….. 86
5.5. Планування підсумкових техніко-економічних показників……. 89
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... 91
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 92

ВСТУП

Якість, надійність та вартість виготовлення продукції визначає конкурентоспроможність машинобудівної продукції в умовах сучасної економіки. Дотримання підприємствами вимог щодо точності деталей забезпечують ресурс та працездатність всього виробу. Якість корпусних деталей визначається точністю та якістю обробки отворів, в яких розміщено рухомі елементи вузла.

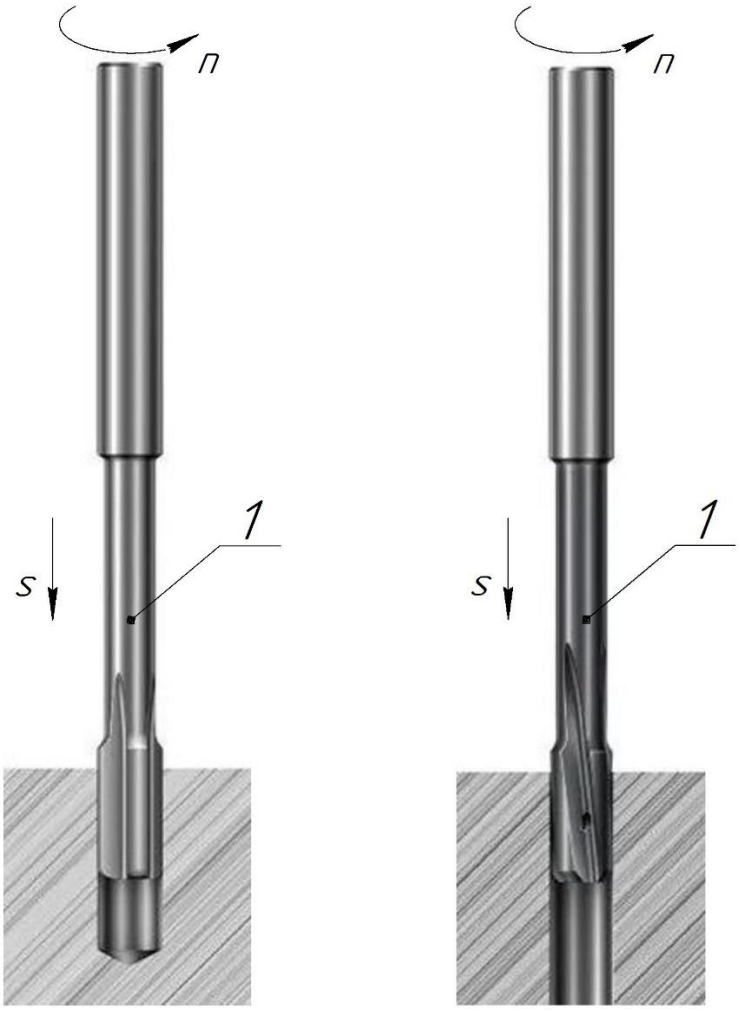
Одним із чистових методів обробки отворів є розгортання. Похибки, що допущено при розгортанні впливають на якість і точність виробу. Тому пошук способів зменшення огранювання за рахунок вдосконалення геометрії інструменту є актуальною задачею. Вирішення такої задачі підвищує конкурентоспроможність продукції завдяки підвищенню якості обробки та зменшенню витрат від браку.

В роботі необхідно розглянути розгортання отворів. Розглянути огранювання отворів, проаналізувати відомі конструктивні та технологічні особливості інструменту та процесу розгортання, які забезпечують зменшення похибки круглості отвору, а саме огранювання. Розробити методику оптимізації параметрів розвертки з метою зменшення огранювання оброблених отворів. Проаналізувати базову технологію виготовлення деталі корпус гідророзподільника та визначити його недоліки й переваги. Розробити новий технологічний процес обробки даної деталі в якому буде застосовано сучасне металорізальне обладнання та різальні інструменти, а також буде застосовано розгортання отворів як чистовий метод їх обробки. Виконати оптимізацію параметрів та розробити удосконалену розвертку для обробки отворів деталі корпус гідророзподільника, яка здатна зменшити огранювання.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПРОЦЕСУ РОЗГОРТАННЯ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ОГРАНЮВАННЯ ОТВОРІВ

1.1. Розгортання як метод обробки отворів

Розгортання – це процес чистової обробки циліндричних і конічних отворів багатолезовим осьовим різальним інструментом, що забезпечує підвищення точності форми та розмірів отвору, а також зменшення шорсткості поверхні. Попередня обробка отворів виконується свердлом, зенкером або розточувальним різцем. Інструментом є розвертка, яка здійснює одночасно обертальний рух навколо власної осі та поступальний рух уздовж осі отвору (рух подачі), знімаючи припуск (рис. 1.1).



а) б)

Рис. 1.1. Розгортання отвору:
а) – глухого; б) - наскрізного

Розгортанням досягається точність отвору 6–9 квалітету (IT6…IT9) та шорсткість поверхні Ra = 0,32…1,25 мкм. Найкращі результати досягаються при дворазовому розгортанні: перший прохід (чорновий) знімає приблизно 2/3 припуску, другий (чистовий) – решту. Вимоги до співвісності мають забезпечуватися на етапі свердління чи розточування адже розгортання не здатне виправити відхилення положення осі отвору.

Завдяки зняттю малого припуску за один прохід та великої кількості різальних лез, забезпечується висока якість обробки. За способом застосування розрізняють ручні (рис. 1.2, а) та машинні (рис. 1.2, б) розвертки; за формою оброблюваного отвору – циліндричні (рис. 1.2, в) й конічні (рис. 1.2, г); за конструкцією різальної частини – з прямими (рис. 1.1, а) та гвинтовими канавками (рис. 1.1, б). Машинні розвертки з циліндричним хвостовиком виготовляють кількох типів: тип I застосовують для обробки отворів діаметром 3–50 мм за 6–9 квалітетом, закріплюючи їх у самоцентрувальних патронах верстата; розвертки для обробки за 6–7 квалітетом закріплюють у патронах, що допускають похитування й самоцентрування інструмента в отворі.



а)



б)



в)



г)

Рис. 1.2. Типи розверток:

а) – ручна; б) – машинна; в) – циліндрична; г) – конічна

Матеріалом різальної частини машинних розверток слугує швидкорізальна сталь або твердий сплав; для розверток із твердосплавними пластинами чи суцільних твердосплавних розверток застосовують як прямі, так і гвинтові канавки залежно від типу отвору (глухий чи наскрізний).

Режими різання при розгортанні обирають значно нижчими, ніж при свердлінні чи зенкеруванні, щоб уникнути передчасного зношування розвертки й розбивання (збільшення) діаметра отвору: швидкість різання під час чорнового розгортання становить орієнтовно 10-15 м/хв, під час чистового – 4-6 м/хв. Величина припуску, що залишається під розгортання, залежить від діаметра отвору: для отворів діаметром до 25 мм під чорнове розгортання залишають 0,01–0,15 мм на сторону, під чистове – 0,02-0,05 мм; як правило, отвори діаметром понад 25 мм попередньо обробляють зенкером, а вже потім – чорновою й чистовою розвертками послідовно. Подача й швидкість різання безпосередньо впливають на шорсткість обробленої поверхні: чим вищі вимоги до якості поверхні, тим меншими мають бути ці параметри.

Як змащувально-охолоджувальну рідину (ЗОР) при розгортанні отворів у стальних деталях застосовують мінеральне масло, для деталей з кольорових металів (мідь та її сплави) використовують інші, спеціально підібрані рідини. Виробники сучасного різального інструменту зазначають, що для суцільнотвердосплавних розверток застосування емульсії часто забезпечує довший строк служби інструмента, ніж застосування мастильної оливи, а підведення охолодження виконують або по осі інструмента (для розверток із прямою канавкою), або збоку (для розверток із гвинтовою канавкою).



а) б)

Рис. 1.3. Схеми розгортання отворів та подачі ЗОР:
а) – при обробці глухого отвору; б) – при обробці наскрізного отвору

Розгортання виконують на свердлильних, токарних, розточувальних верстатах, а також на сучасних обробних центрах із числовим програмним управлінням. До налаштування обладнання висуваються підвищені вимоги порівняно зі свердлінням: заготовку необхідно жорстко закріпити, шпиндель верстата не повинен мати люфту, а патрон, що утримує розвертку, має бути якісним і, за потреби, забезпечувати самоцентрування інструмента. Зміщення осі попередньо обробленого отвору відносно осі розвертки рекомендують зводити до мінімуму саме для того, щоб не провокувати додаткові коливання інструмента в процесі різання.

1.2. Огранювання отвору при розгортанні як об’єкт дослідження

Розгортання забезпечує високу точність (як правило, 6–9 квалітет) та низьку шорсткість обробленої поверхні. Разом з тим у процесі розгортання може виникати огранювання, при якому поперечний переріз обробленого отвору набуває вигляду близького до правильного багатокутника, а не кола.

Дослідженнями розгортання отворів і саме явищем огранювання протягом років займаються вчені з різних країн таких, як США, Японії тощо. Встановлено, що огранювання це не частковий випадок, а закономірність при розгортанні отворів.

Кількісний зв’язок між конструкцією інструмента і формою дефекту встановлено в роботі [6]: інструмент з N рівномірно розташованими по колу зубцями під час розгортання формує отвір, контур якого має N+1 або N−1 граней, залежно від напрямку обертання відносно напрямку початкового збурення. Цю залежність можна записати у вигляді:

$$n = N \pm 1 \qquad (1.1)$$

де n – кількість граней деформованого контуру отвору;

N – кількість зубців (різальних кромок) розвертки.

Ця залежність узгоджується з даними, наведеними в патентній та науково-технічній літературі щодо огранювання при обробці отворів різальним інструментом з рівномірним кроком зубців.

1.3. Порівняльний аналіз відомих математичних і чисельних моделей автоколивань розвертки при розгортанні

Найбільш системну серію робіт з математичного моделювання радіальних автоколивань інструмента при розгортанні викладено в працях P. V. Bayly. У роботі [7] запропоновано ідею нерівномірного «білошумового» розташування зубців розвертки як засобу порушення механізму зворотного зв'язку, що лежить в основі автоколивань. Це одна із перших відомих спроб математичного опису саме розташування зубців, а не лише їх кількості, як самостійного об'єкту оптимізації.

В роботі [19] розроблено спільну для свердління і розгортання модель радіальних автоколивань, що описує коливання інструмента як результат змінного навантаження на зубцях з різним кроком розташування.

В роботі [6] побудовано спрощену модель, яка й дала згадану вище залежність (1.1) та кількісно пов'язала амплітуду коливань інструмента з похибкою круглості отвору.

Розширено модель [12] шляхом введення так званого «демпфування процесом», швидкісно-залежну силу тертя напрямних стрічок розвертки об оброблювану поверхню отвору.

В роботі [13] виконано дослідження стійкості та формоутворення при розгортанні методами лінійного аналізу стійкості динамічних систем, яка підтверджує механізм виникнення огранювання незалежно від конкретної інженерної моделі сил різання.

В роботі [26] застосували скінченно-елементну модель розвертки як пружного стрижня (балка Ейлера–Бернуллі). Безпосередньо досліджено вплив нерівномірного кроку зубців на стійкість процесу й на форму отриманого профілю отвору.

Японські дослідники пояснюють огранювання як автоколивання, що виникають через запізнення в процесі різання, тобто сила різання в поточний момент залежить від того, яким був слід, залишений інструментом трохи раніше. За своєю фізичною природою це те саме явище, що й автоколивання при точінні [11], хоча їхня модель побудована саме для процесу точіння і описує коливання у двох напрямках одночасно, з урахуванням додаткового опору, що виникає через тертя інструмента об оброблену

поверхню. Хоча робота [11] стосується точіння, а не розгортання, вона показує загальний спосіб математичного опису автоколивань, спричинених слідом попереднього проходу інструмента.

В роботі [23] для 8-зубої розвертки з нерівномірним кроком виконано теоретичне та експериментальне дослідження оптимального кутового розташування різальних кромок, а також запропоновано спрощений оціночний критерій для прискорення чисельного пошуку оптимуму, замість повного перебору варіантів розташування.

Отже, у розглянутій літературі можна виділити два підходи до моделювання:

- спрощені моделі, де інструмент розглядають як коливальну систему (осцилятор), на яку діє сила, що залежить від сліду попереднього зубця [6, 7, 12, 13, 19, 23];
- детальніші моделі на основі методу скінченних елементів, де інструмент представлений як пружне тіло, а не спрощена коливальна система [26]. Незважаючи на різницю в підходах, обидва напрями підтверджують один і той самий висновок: нерівномірне колове розташування різальних кромок зменшує огранювання оброблюваного отвору.

1.4. Огляд відомих технічних рішеннях геометричних параметрів розверток

Аналіз відкритих технічних і патентних джерел показує, що ідея нерівномірного кроку зубців розвертки вже реалізована промислово, проте здебільшого без публічно розкритої розрахункової методики її отримання.

Патент [22] описує конструкцію високопродуктивної розвертки та спосіб розгортання для чистової обробки попередньо оброблених отворів у відповідальних деталях. Суть винаходу полягає у іншому геометричному прийомі – поєднанні на робочій частині інструменту двох наборів стружкових канавок з різною геометрією – прямолінійних та гвинтових (рис. 1.4), різальні кромки яких розташовані практично в єдиній радіальній площині та одночасно й сумісно обробляють поверхню отвору. Таке комбінування створює змінне динамічне навантаження на зубах під час різання, що

ефективно руйнує гармонійний резонанс, пригнічує автоколивання та зменшує тепловиділення.

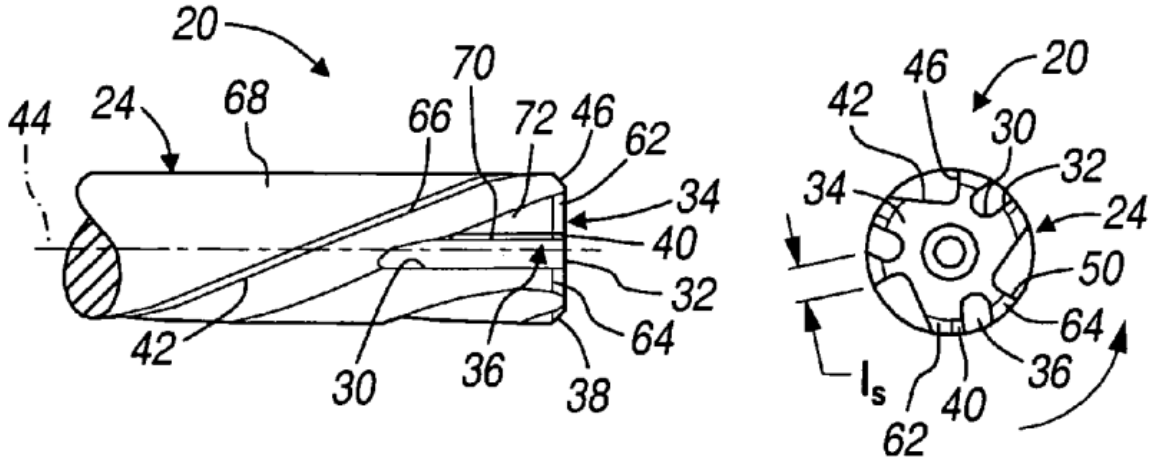


Рис. 1.4. Розвертка із різною геометрією стружкових канавок

З точки зору конструктивної реалізації інструмент має однакову кількість прямих і гвинтових канавок, розташованих із чергуванням по колу, причому лівий гвинтовий напрямок канавок забезпечує транспортування стружки вперед у напрямку подачі, запобігаючи пошкодженню обробленої поверхні. Різальні кромки виконані з від'ємними передніми кутами, а вздовж канавок передбачені циліндричні напрямні стрічки, які забезпечують надійне центрування й орієнтацію інструменту всередині отвору. Крім того, розвертка містить систему внутрішнього охолодження з каналами підведення мастильно-охолоджувальної рідини безпосередньо в кожну канавку перед різальними кромками для активного вимивання стружки та відведення тепла.

Підвищення геометричної точності за рахунок усунення хвилястості й овальності отвору є головною перевагою розглядаємої конструкції, при цьому максимальне відхилення профілю зменшується до 1 мкм порівняно із традиційною конструкцією. Зниження тертя й локального тепловиділення запобігає температурним деформаціям заготовки й інструменту, що дозволяє проводити обробку на значно вищих швидкостях і подачах. Термін служби розвертки збільшується, підвищується продуктивність роботи.

У патентах [21, 28] заявлено нерівномірний кутовий розподіл лез розверток, однак формула або алгоритм визначення конкретних кутів в роботах відсутні. Зазначено, що для шестизубої розвертки кутова відстань між сусідніми зубами

варіюється від 55° до 65°, що відповідає 10% відхилення від рівномірного розподілу в 60°, завдяки чому ефективно гасяться вібрації, покращується точність геометричної форми отвору та підвищується стійкість інструменту.

В роботі [23] представлено оціночний критерій для прискореного пошуку раціонального кутового кроку розташування зубців інструменту, підтверджений експериментально для конкретного випадку 8-зубої розвертки.

Традиційне теоретичне дослідження динаміки процесу розгортання та прогнозування виникнення огранювання отвору вимагає розв'язання характеристичних рівнянь руху системи для всього робочого діапазону частот обертання шпинделя. Такий підхід супроводжується великим обсягом чисельних обчислень, що робить його малоефективним під час проведення багатокритеріальної геометричної оптимізації розверток із нерівномірним кроком зубів, особливо при розрахунку інструментів із різною кількістю лез. Для подолання цього обмеження та прискорення інженерних розрахунків [23] запропоновано спрощену методику оцінки стійкості інструменту на основі квазістатичних характеристичних коренів, тобто коренів характеристичного рівняння динамічної системи, обчислених за умови, що деякі з її параметрів змінюються дуже повільно (квазістатично) порівняно з основними динамічними процесами системи.

Суть методу [23] полягає у визначенні характеристичних коренів диференціальних рівнянь руху системи за умови, коли швидкість обертання шпинделя прямує до нуля $\omega \approx 0$ рад/с.

Для такої умови розраховується максимальне значення дійсної частини характеристичного кореня для розвертки з нерівномірним кроком σ_{max}^{i}, а також для базової розвертки з рівномірним кутовим розподілом зубів σ_{max}^{r}. Оцінка відносної нестабільності системи здійснюється за допомогою показника QCR, який позначається символом q і розраховується за формулою [23]:

$$\sigma_q = \sigma_{max}^{i} - \sigma_{max}^{r} \tag{1.2}$$

Фізичний зміст параметра q полягає у кількісному визначенні зміни рівня нестабільності оптимізованого інструменту порівняно зі стандартною рівномірною геометрією. Головною практичною перевагою використання QCR-критерію є відсутність потреби в розрахунку всіх характеристичних коренів для кожної дискретної частоти обертання шпинделя, що суттєво підвищує обчислювальну швидкість алгоритму оптимізації.

Чисельний аналіз та порівняння результатів довели наявність дуже сильного позитивного кореляційного зв'язку із коефіцієнтом кореляції $r = 0{,}917$ [23] між квазістатичним показником q та максимальним значенням дійсної частини динамічного характеристичного кореня σ_{max} у повному частотному діапазоні. Це свідчить про те, що мінімізація значення q (пошук кутових інтервалів, які забезпечують найбільш від'ємне значення QCR) є достатньою умовою для синтезу оптимальної геометрії розвертки, яка повністю пригнічує автоколивання та запобігає виникненню огранювання отвору.

Компанія MAPAL пропонує лінійку розверток FixReam з нерівномірним кутовим кроком розташування різальних кромок у поєднанні з дуговою фаскою. За даними виробника, це забезпечує до 30% покращення круглості отвору [14]. Але не представлена методика розрахунку кутових значень.

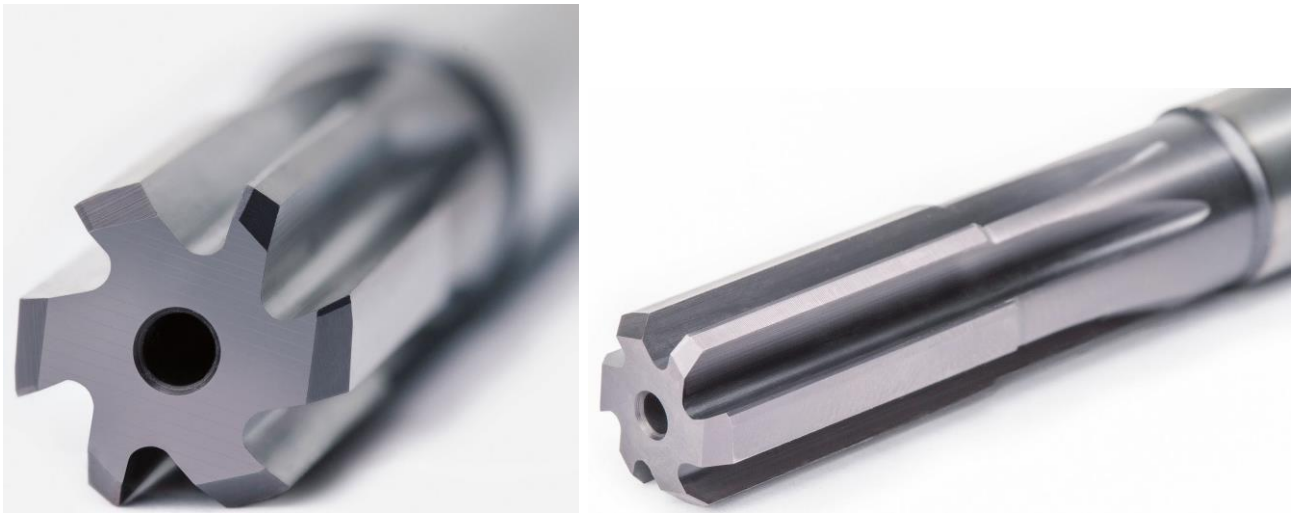


Рис. 1.5. Розвертка FixReam

Відома розвертка [15] із поєднанням нерівномірного кутового кроку розташування зубів по тілу інструменту (наприклад, кутові інтервали 57°, 73°, 50°,

77°, 64° та 39° для 6-зубої розвертки (рис. 1.6)) з диференційованими передніми кутами B, призначеними індивідуально для кожного зуба. Включення принаймні двох або трьох різних передніх кутів, які відрізняються між собою не менше ніж на 2° (наприклад, комбінації 0°, 6°, 7° або 0°, 0°, 6°, 7°, 0°, 0° для зубів 20a–20f), дозволяє направлено змінювати величину та кут орієнтації векторів сил різання 51 (рис. 1.7).

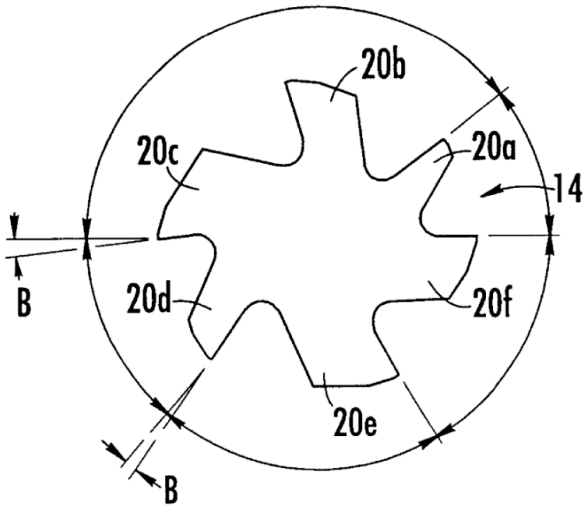


Рис. 1.6. Розвертка з нерівномірними кутовими кроками розташування зубів

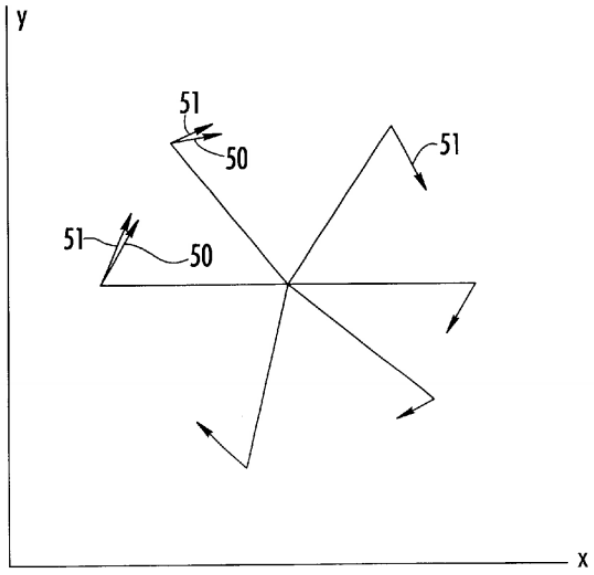


Рис. 1.7. Графік векторів сил різання:
50 – вектори розвертки, що не збалансована; 51 – вектори збалансованого інструменту

Виконання оптимізації передніх кутів B призводить до суттєвого зниження сумарного вектору результуючої зміщувальної сили (складові Fx ≈ 0,2 H, Fy ≈ 0,3 H,

що сумарно менше 1Н). Таким чином забезпечується співвісність осей інстурмента та оброблюваного отвору. Дотримання балансу сил забезпечує відсутність розбивки отвору.

За результатами чисельного 3D-моделювання та натурних випробувань [15], розвертка даного типу забезпечила зменшення відхилення від круглості з 5,5 мкм (для рівномірного кроку) та 0,6 мкм (для звичайного нерівномірного кроку) до 0,1 мкм. При цьому похибка розбивки діаметра зменшилася з 2,7 мкм (традиційний нерівномірний крок) до 0,2 мкм (силово-збалансована розвертка).

Відома розвертка [3] з нерівномірним розподілом зубців (рис. 1.8) для усунення огранювання при одночасному забезпеченні мінімальної шорсткості поверхні. Кутові кроки визначаються за певними залежностями. Парні зубці мають кутові кроки, що збільшуються від середнього до максимального. Непарні зубці мають кутові кроки, що зменшуються від середнього до мінімального. Значення мінімальних та максимальних кутових кроків визначаються за формулами:

$$\Delta\Theta_{min} \geq \frac{2\pi}{z^2} \tag{1.3}$$

$$\Delta\Theta_{max} = \Delta\Theta_{min}\left(\frac{z}{2} - 1\right) \tag{1.4}$$

де z – число зубців.

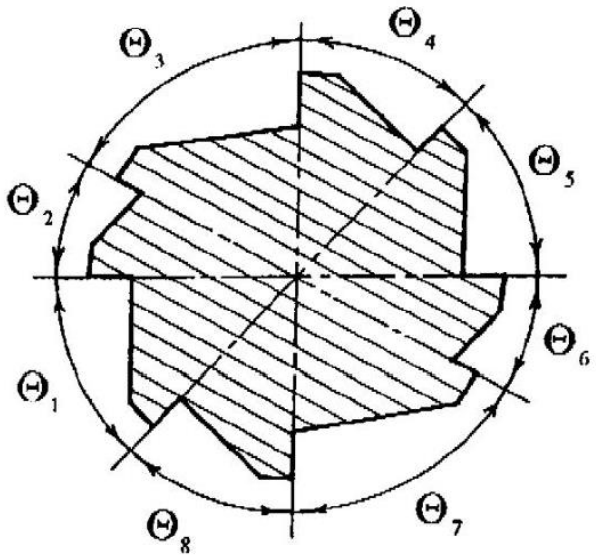


Рис. 1.7. Розвертка з нерівномірним розподілом зубців

Розвертка [18] із гвинтовими зубцями із великим кутом нахилу (ω ≈ 30° або ω = 40° ± 4°…6°) та послідовним чергуванням кутів нахилу суміжних зубців з різницею Δω ≤ 6°…8° (рис. 1.8). На торці інструменту (поперечний переріз А–А на рис. 1.8) зубці розміщені з абсолютно рівномірним кутовим кроком ε1.

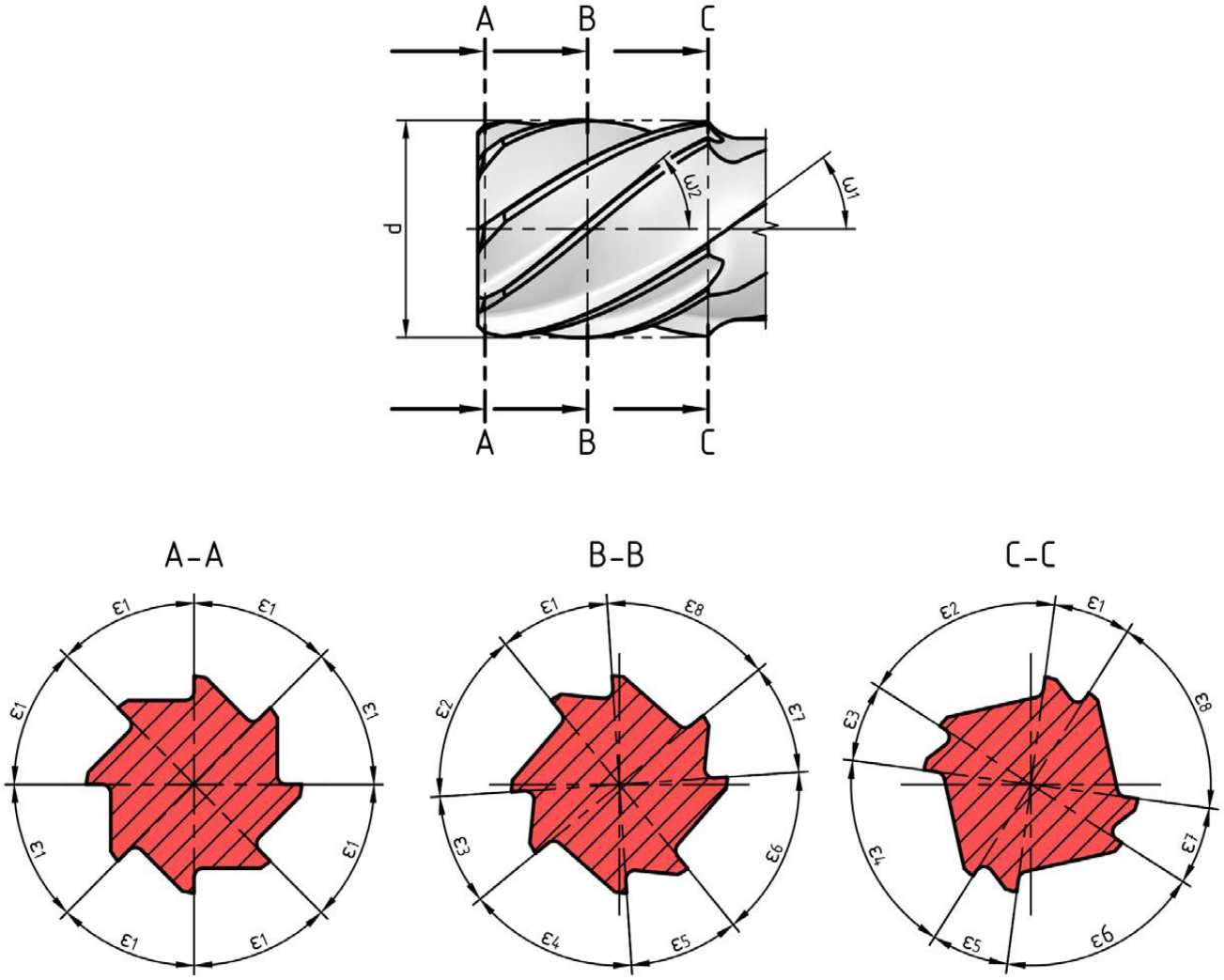


Рис. 1.8. Розвертка з різним нахилом зубців

Рівномірне розташування зубців на торці (переріз А–А) забезпечує постійність перерізу зрізуваного шару при врізанні, що усуває одну з головних причин виникнення первинної збурювальної сили. У міру віддалення від торця вздовж робочої частини (перерізи В–В та С–С на рис. 1.8) через різний кут нахилу канавок кутовий крок між зубцями плавно змінюється в межах від 0° до 6-8° (кутові інтервали ε2…ε8).

Плавна зміна кутового кроку вздовж калібрувальної частини забезпечує ефект «самоперерізання хвиль» - сліди від послідовних зубців на стінках отвору не

збігаються і зсуваються по фазі. Це виключає зісковзування зубців і копіювання контактного рельєфу. Великий кут нахилу зубців додатково підвищує демпфуючу здатність з боку калібрувальної стрічки, гарантуючи стійку безвібраційну роботу.

1.5. Постановка задач дослідження

В роботі необхідно проаналізувати відомі конструктивні та технологічні особливості інструменту та процесу розгортання, які забезпечують зменшення похибки круглості отвору, а саме огранювання.

Виконати аналіз відомих математичних моделей коливань розвертки та визначити геометричні параметри інструмента, що мають вплив на огранювання. Розробити методику оптимізації параметрів розвертки з метою зменшення огранювання оброблених отворів.

Проаналізувати базову технологію виготовлення деталі корпус гідророзподільника та визначити його недоліки й переваги. Розробити новий технологічний процес обробки даної деталі в якому буде застосовано сучасне металорізальне обладнання та різальні інструменти, а також буде застосовано розгортання отворів як чистовий метод їх обробки.

Визначити критерії оцінювання схильності розвертки до огранювання, скласти розрахункову модель параметрів інструменту. Виконати оптимізацію параметрів та розробити удосконалену розвертку для обробки отворів деталі корпус гідророзподільника, яка здатна зменшити огранювання. Виконати економічні розрахунки.

РОЗДІЛ 2. ОПТИМІЗАЦІЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗВЕРТКИ

2.1. Розрахункова схема сил розвертки з нерівномірним кроком

Розглядаємо циліндричну розвертку з Z різальними зубцями, кутове положення яких на торці інструмента задається послідовністю кутових кроків $\varphi_1, \varphi_2, \ldots, \varphi_Z$ (кут між сусідніми зубцями, заданими у напрямку обертання) (рис. 2.1). На відміну від стандартної конструкції з рівномірним кроком ($\varphi_j = 360°/Z$ для всіх j), у загальному випадку кути φ_j можуть відрізнятися один від одного за умови збереження їх суми:

$$\sum_{j=1}^{Z} \varphi\, \varphi_j = 360° \tag{2.1}$$

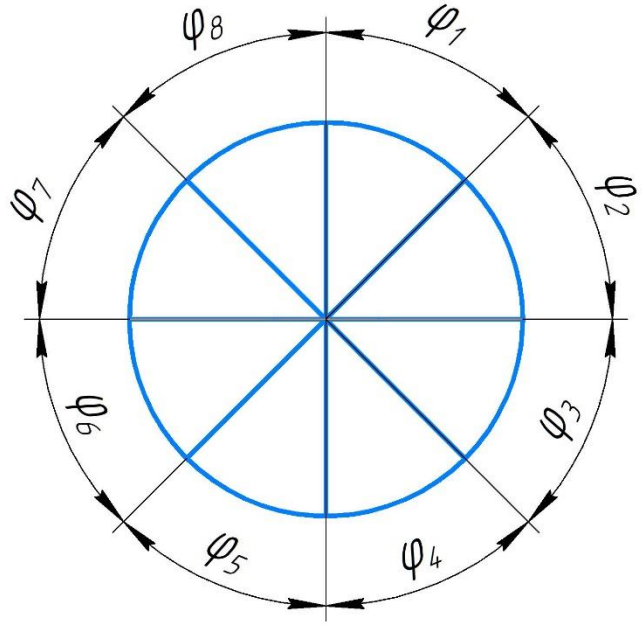


Рис. 2.1. Схема кутів розвертки

Кожен зубець j під час різання знімає шар матеріалу товщиною $h_j(t)$, що залежить від подачі на зубець та миттєвого радіального положення інструмента. Відповідно до загальноприйнятої в теорії механіки різання моделі сил [4], тангенціальна та радіальна складові сили різання на зубці j пропорційні площі перерізу зрізаного шару:

$$F_{t,j}(t) = k_t \cdot b \cdot h_j(t) \quad (2.2)$$

$$F_{r,j}(t) = k_r \cdot b \cdot h_j(t) \quad (2.3)$$

де k_t – питомий коефіцієнт тангенціального опору різанню;

k_r – питомий коефіцієнт радіального опору різанню. Вказані коефіцієнти визначаються експериментально для конкретних матеріалів заготовки та матеріалу і геометрії різальної частини [4];

b – ширина зрізу.

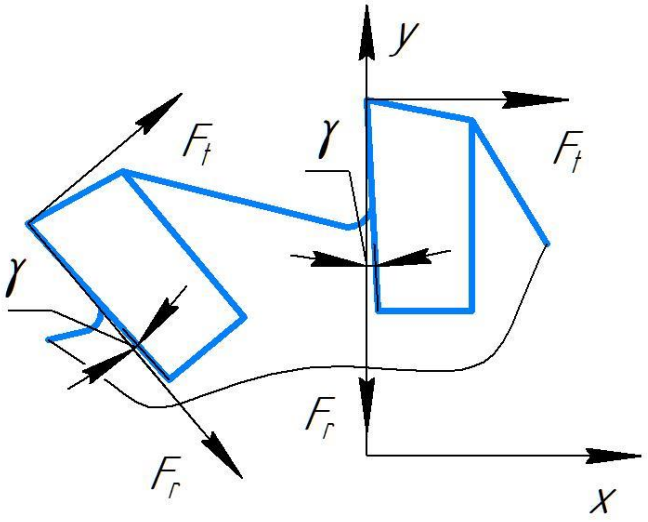


Рис. 2.2. Сили різання при розгортанні

Проєкції сил усіх Z зубців на нерухомі осі X, Y верстата дають сумарну збуджувальну силу, що діє на інструмент. Необхідно враховувати кутове положення кожного зубця:

$$\theta_j(t) = \theta_j 0 + \Omega t$$

де Ω – кутова швидкість обертання розвертки.

Сумарна збуджувальна сила, що діє на інструмент:

$$F_x(t) = \sum_{j=1}^{Z} [F_{t,j}(t) \cdot sin\theta_j(t) + F_{r,j}(t) \cdot cos\theta_j(t)] \quad (2.4)$$

$$F_y(t) = \sum_{j=1}^{Z} [F_{t,j}(t) \cdot cos\theta_j(t) - F_{r,j}(t) \cdot sin\theta_j(t)] \quad (2.5)$$

Ця схема розкладання сил узгоджується із загальною методикою розрахунку сил багатолезового інструмента.

2.2. Аналіз радіальних коливань інструмента

У зоні різання розгортка представлена як пружна механічна система. Їй притаманний один провідний поперечний (радіальний) режим коливань.

Узагальнена маса m, параметр затухання c та жорсткість k приймаються рівними. Це базується на гіпотезі незалежності властивостей від напрямку уздовж осей X та Y. Подібне спрощення є типовим для аналогічних класів моделей [6, 20].

Рівняння руху центра інструмента $x(t)$ і $y(t)$, які виникають під впливом сил (2.4) та (2.5):

$$mx''(t) + cx'(t) + kx(t) = F_x(t) \quad (2.6)$$

$$my''(t) + cy'(t) + ky(t) = F_y(t) \quad (2.7)$$

При розгортанні товщина зрізу на поточному зубці залежить не лише від подачі, а ще й від сліду, залишеного попереднім зубцем на оброблюваній поверхні. Товщина зрізу характеризується різницею поточного положення та положення, що запізнено на один крок положення інструмента. Даний принцип розглянуто в роботах [6, 7, 25]:

$$h_j(t) = f_z + [x(t) - x(t - \tau_j)] \cdot sin\theta_j(t) + [y(t) - y(t - \tau_j)] \cdot cos\theta_j(t) \quad (2.8)$$

де f_z – номінальна (недеформована) товщина зрізу, що відповідає подачі на зубець;

τ_j – часове запізнення, яке відповідає кутовому кроку φ_j між зубцем j і попереднім зубцем:

$$\tau_j = \frac{\varphi_j}{\Omega} \tag{2.9}$$

Розвертка з рівномірним кроком розташування зубців має однакове τ_j для всіх лез, яке дорівнює періоду проходження одного зуба. Головна відмінність моделі розвертки з нерівномірним кроком від класичної теорії автоколивань полягає у часі запізнення. Для кожного окремого зуба величина τ_j є індивідуальною.

Якщо підставити співвідношення (2.8) у формули (2.2)–(2.3) та (2.6)–(2.7), утвориться система з Z різними запізненнями. Задачі подібного типу вивчаються в загальній теорії стійкості різання для інструментів із неоднорідним кроком для торцевого фрезерування [5, 10].

Хоча ці праці присвячені фрезеруванню, а не розгортанню, математична структура задач ідентична. Вона описує багатолезовий інструмент із різним кутовим кроком та множинними запізненнями сліду.

З цієї причини метод [5, 10] перехід від рівнянь зі змінними в часі коефіцієнтами до критерію стійкості, можна взяти за основу. Потрібно лише адаптувати позначення для дослідження системи (2.6)–(2.9).

2.3. Критерій оптимізації геометричних параметрів

Відповідно до залежності (1.1), огранювання з характерним числом граней

$$n = Z \pm 1$$

пов’язане з підсиленою реакцією системи (2.6)–(2.9) саме на двох частотах коливань:

$$\omega_- = (Z-1)\Omega$$

$$\omega_+ = (Z+1)\Omega$$

Для оцінки впливу набору кутів φ1, …, φZ на підсилення коливань саме на цих двох частотах, застосуємо прийом, стандартним для класичної теорії самозбудних коливань при різанні [25]. Якщо припустити, що інструмент здійснює майже

гармонічні (плавні) коливання на пробній частоті ω, то різниця поточного й запізненого положень з формули (2.8) для зубця j записується як

$$x(t) \cdot \left(1 - e^{-i\omega\tau_j}\right).$$

Множник $\left(1 - e^{-i\omega\tau_j}\right)$ показує, наскільки сильно слід, залишений попереднім зубцем, «прочитується» зубцем j на частоті ω: чим більший цей множник за модулем, тим сильніше самопідсилення коливань від цього зубця саме на цій частоті.

Сумарний коефіцієнт підсилення коливань від усіх Z зубців на пробній частоті ω дорівнює:

$$R(\omega) = Z - \sum_{j=1}^{Z} e^{-i\omega\tau_j} \tag{2.10}$$

де ω – пробна колова частота;

j – порядковий номер поточного різального зубця розвертки;

Z – кількість зубців розвертки;

i – уявна одиниця комплексної площини. $i = \sqrt{-1}$.

На основі цього коефіцієнта пропонується критерій оптимізації – сума квадратів модуля $R(\omega)$ саме на двох частотах ω_- та ω_+, відповідальних за N±1-гранне огранювання:

$$Q(\varphi_1, \ldots, \varphi_Z) = |R(\omega_-)|^2 + |R(\omega_+)|^2 \tag{2.11}$$

Чим менше значення Q, тим слабше зубці розвертки підсилюють коливання саме на частотах, що відповідають за огранювання, і тим меншою очікується амплітуда огранювання.

Критерій (2.10)–(2.11) контролює лише силу самопідсилення коливань на двох конкретних частотах – ω_- та ω_+, відповідальних за N±1-гранне огранювання. Він не описує поведінку сумарної сили на інших частотах – зокрема на частоті, що дорівнює самій швидкості обертання інструмента Ω, тобто раз за оберт.

Кожен зубець j за один оберт інструмента описує повне коло, тому сила, яку він створює, усереднена рівно за один повний оберт, завжди дорівнює нулю – незалежно від того, які кути $\varphi_1, \ldots, \varphi_Z$ обрано.

Сила, що діє на інструмент, може мати значну складову, яка коливається синхронно з одним обертом (на частоті Ω, а не лише на ω_-, ω_+). Якщо зубці розташовані нерівномірно, їхній сумарний внесок на частоті обертання може не компенсуватися, і інструмент отримає постійний, синхронно обертовий поштовх в один бік. Наслідком стане не додаткове вібрування, а стале відхилення осі інструмента, здатне збільшити діаметр отвору чи надати йому овальності.

Ступінь цього ризику можна оцінити аналогічно (2.10), але для частоти Ω замість ω_-, ω_+. Позначимо накопичене кутове положення зубця j відносно першого як

$$\theta_j 0 = \varphi_1 + \cdots + \varphi_{j-1} ,$$

Математично кутове положення зубця j відносно першого визначається як:

$$\theta_j 0 = \sum_{k=1}^{j-1} \varphi_k$$

Вводимо показник синхронної (одноразової за оберт) незбалансованості:

$$C(\varphi_1, \ldots, \varphi_Z) = \left| \sum_{j=1}^{Z} exp(i\theta_{j0}) \right| \qquad (2.12)$$

Для рівномірного кроку C = 0, так як сума Z рівновіддалених коренів з одиниці завжди дорівнює нулю – тобто рівномірний крок автоматично збалансований.

Метою задачі оптимізації кутового кроку зубців розвертки є мінімізація цільової функції – критерію самопідсилення коливань:

$$Q(\varphi_1, \ldots, \varphi_Z) \rightarrow min \qquad (2.13)$$

Замикаюча геометрична умова підтверджує, що сума всіх кутових кроків між сусідніми зубцями по колу інструмента повинна дорівнювати $360°$

$$\sum_{j=1}^{Z} \varphi_j = 360° \tag{2.14}$$

Двосторонні технологічні обмеження на величину окремих кутових кроків φ_j:

$$\varphi_{min} \leq \varphi_j \leq \varphi_{max} \quad (j = 1, \dots, Z) \tag{2.15}$$

де φ_{min} – мінімально допустимі кутові кроки між зубцями, які визначаються з міцнісного розрахунку корпусу інструмента (щоб уникнути ослаблення стружкових канавок або перевантаження окремого зубця;

φ_{max} – максимально допустимі кутові кроки між зубцями, які визначаються з міцнісного розрахунку корпусу інструмента щоб уникнути ослаблення стружкових канавок або перевантаження окремого зубця.

Обмеження на силову рівновагу (симетричність/збалансованість), що запобігає появі синхронного радіального віджимання інструмента на частоті обертання:

$$C(\varphi_1, \dots, \varphi_Z) \leq C_{\text{доп}} \tag{2.16}$$

Обмеження (2.15) введено з технологічних міркувань, що занадто малий кут між сусідніми зубцями (φ_{min}) не забезпечує достатньої міцності перемички між канавками, а занадто великий (φ_{max}) – рівномірності розподілу навантаження й стійкості окремого зубця. Конкретні значення φ_{min}, φ_{max} визначаються міцнісним розрахунком корпусу розвертки і матеріалом інструмента. Обмеження (2.16) запобігає оптимізації за критерієм Q розбалансувати інструмент на частоті обертання, величина $C_{\text{доп}}$ обирається близькою до нуля.

Сформульована задача оптимізації має такий алгоритм:

- зменшення кількості змінних. Оскільки сума всіх кутів має дорівнювати $360°$, останній кут φ_z можна не шукати окремо, а виразити через усі інші:

$$\varphi_z = 360° - (\varphi_1 + \cdots + \varphi_{z-1});$$

- врахування обмежень. За допомогою методу функції Лагранжа перетворюємо задачу з обмеженнями у простішу задачу пошуку мінімуму допоміжної функції;

- автоматичний пошук розв'язку. Алгоритм поступово підбирає найкращі кути, на кожному кроці коригуючи їх у бік покращення результату;

- для знайдених кутів обчислюються показники Q та C, перевіряється дотримання силового балансу, а результат порівнюється з рівномірним кроком та відомими рішеннями з літератури.

2.4. Висновки

Розглянуто розвертку із Z зубцями, що мають різні кутові кроки. Товщина шару, який знімає зубець, залежить від сліду попереднього зубця. Різні кутові кроки дають свою часову затримку.

Запропоновано критерій Q, який показує, наскільки розвертка підсилює коливання на двох частотах, які пов'язані з огранюванням отвору. Чим менше значення критерію Q, тим слабше за моделлю підсилюються ці коливання. Введено показник C, який не дає розвертці відхилятися в один бік під час обробки.

Сформульовано задачу оптимізації: знайти кути між зубцями, при яких Q найменший, сума кутів дорівнює 360°, кожен кут лежить у межах за умовами міцності, а C не перевищує допустимого значення.

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБКИ ДЕТАЛІ КОРПУС

3.1. Службове призначення та характеристика корпусу гідророзподільника

Корпус гідророзподільника є базовою деталлю гідророзподільника (рис. 3.1), який призначений для керування напрямком, тиском і витратою робочої рідини в гідравлічній системі машини. У корпусі розміщуються функціональні елементи розподільника: золотники з пружинами та елементами керування, запобіжні та переливні клапани, а також ущільнення. Корпус забезпечує їхнє точне взаємне положення, герметичність гідравлічних порожнин і сприймає навантаження від тиску робочої рідини та від кріплення до гідроприводу або плити.

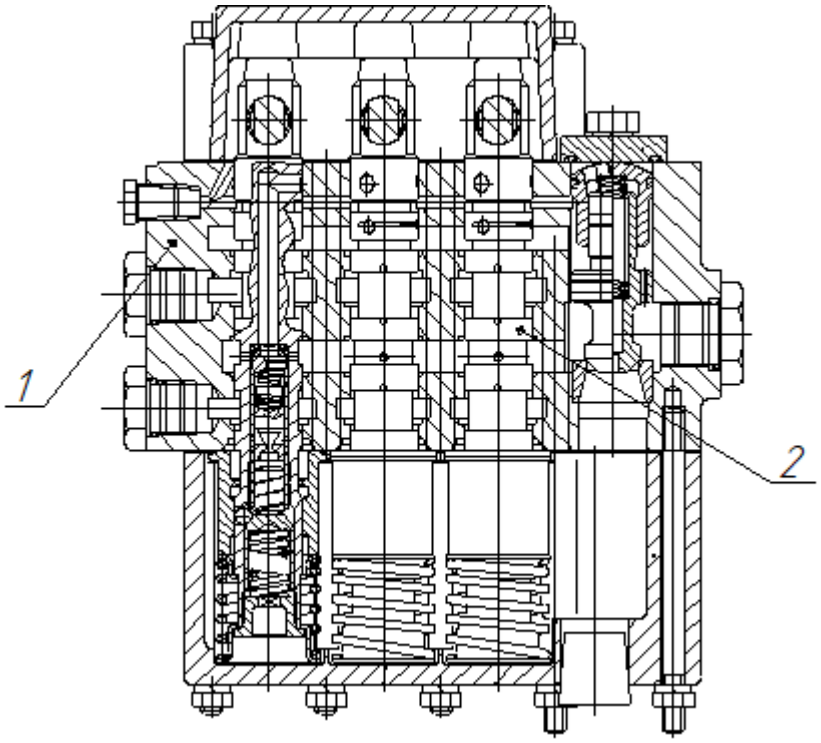
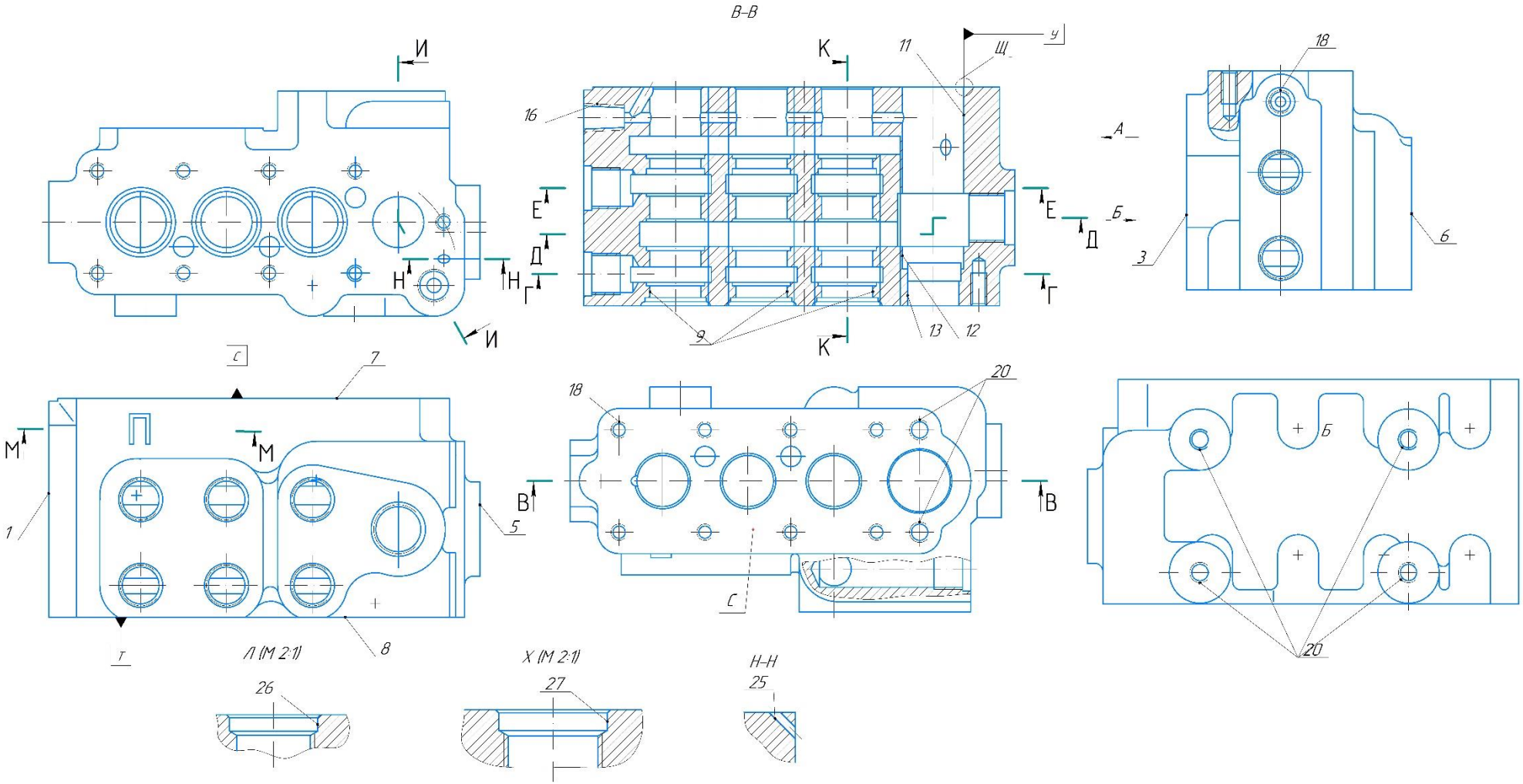


Рис. 3.1. Гідророзподільник

Службове призначення корпусу (рис. 3.2) визначається такими функціями:

- розміщення і напрямлення золотника з забезпеченням мінімального зазору в парі «золотник – отвір корпусу»;
- створення системи каналів і порожнин для підведення, розподілу та відведення робочої рідини;
- утримання робочого тиску без зовнішніх і внутрішніх витоків понад допустимі;


В–В
И
К
Щ
У
11
16
18
А
Б
Е
Д
Г
Н
3
6
9
13
12
С
7
М
1
5
8
Т
20
В
Л (М 2:1)
Х (М 2:1)
Н–Н
26
27
25

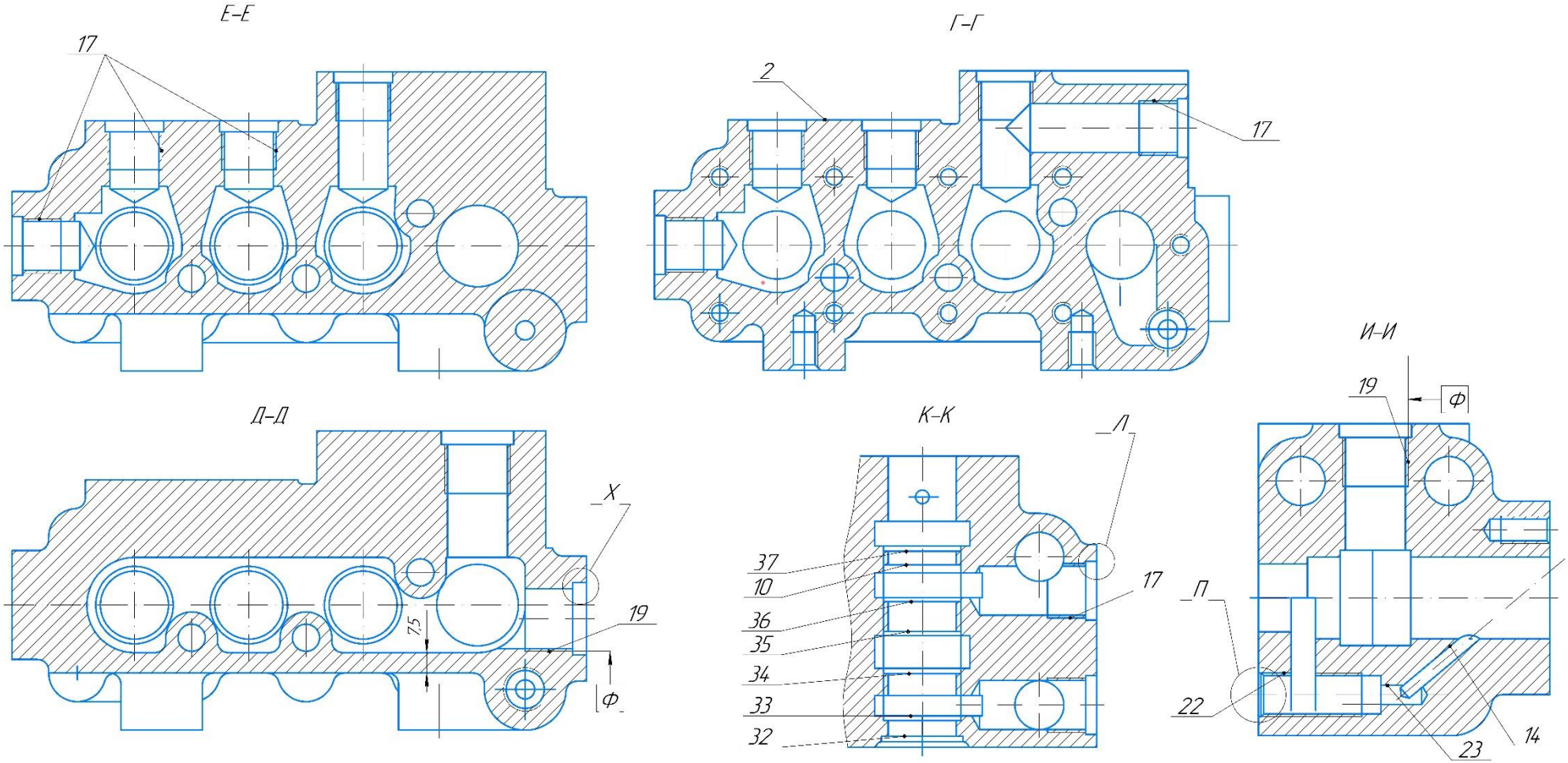


Рис. 3.2. Ескіз деталі корпус

- установлення і кріплення гідророзподільника на плиті, панелі або іншому корпусі, а також приєднання трубопроводів, керуючих електромагнітів чи важелів.

Конструктивно корпус є монолітною литою деталлю коробчатої форми габаритними розмірами 211×107×110 мм і масою 8,82 кг. Корпус має складну просторову форму з великою кількістю внутрішніх і зовнішніх поверхонь різного призначення. Корпус працює в умовах циклічного навантаження тиском, вібрацій, перепадів температури робочої рідини та контакту з мінеральним мастилом (або іншою робочою рідиною). Тому до нього ставляться підвищені вимоги щодо герметичності, жорсткості, відсутності пористості та раковин на ділянках, що сприймають тиск, і стабільності розмірів у часі.

У корпусі виконані три вертикальні циліндричні отвори $Ø25^{+0,052}$ мм під золотники та один отвір $Ø30^{+0,027}$ мм під перепускний клапан. Геометричні осі всіх чотирьох отворів розташовані в одній площині.

З зовнішньої сторони у корпусі розподільника є шість горизонтально розташованих отворів з різьбою М20х1,5 під штуцери для приєднання шлангів які йдуть від силових циліндрів, та отвір з різьбою М24х1,5 під штуцер для приєднання нагнітаючого трубопроводу, який йде від насосу.

У верхній частині корпусу просвердлений горизонтальний канал Ø5 мм, який називається перепускним. З одного боку він з'єднується з колодцем під перепускний клапан, а з іншого через косий отвір з порожниною $Ø25^{+1}$мм . Зовнішні виводи до цього свердління закриті пробками. Крім того, порожнина $Ø25^{+1}$ мм сполучена з двома вертикальними зливними колодцями Ø10 мм розташованими ближче до тильної сторони розподільника.

В самій нижній частині корпусу розподільника є порожнина 26±06 мм яка називається нагнітаючою. Вона сполучена з всіма отворами під золотники та має вихід у робочий простір перепускного клапана, який з'єднаний з нагнітаючим трубопроводом насосу.

Отвір під перепускний клапан з'єднаний через свердління Ø5 мм. На верхньому торці корпусу розташовані вісім отворів з різьбою М8х1,5 під болти кріплення верхньої кришки та два отвори з різьбою М10х1,5 під болти кріплення кришки

перепускного клапана. На нижньому торці розташовані дев’ять отворів з різьбою М8х1.5, в яких болтами закріплюється нижня кришка, та один отвір з різьбою М16х1,5. В задній стінці корпусу виконані чотири отвори з різьбою М10х1,5 під болти кріплення розподільника до кронштейну.

3.2. Розробка технології виготовлення корпусу

Аналіз точності та технологічності

Аналіз точності засновано на аналізі кожної оброблюємої поверхні деталі корпус. На ескізі деталі (рис. 3.2) проставляємо номери поверхонь щодо яких виконуватиметься обробка. В таблицю 3.1 занесено параметри точності для поверхонь деталі корпус.

Таблиця 3.1

Параметри точності деталі корпус

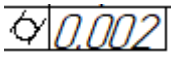
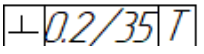
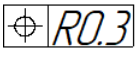
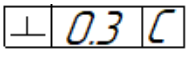
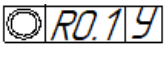
Позначення поверхні	Назва поверхні	Розміри з відхиленнями, заданими від розглядаємої поверхні	Квалітет точності	Точність відносних поворотів, відстаней, розміщення поверхонь	Точність форми	Шорсткість поверхні Ra	Вагомість поверхні, як конструкторської бази
1	2	3	4	5	6	7	8
1,5	Площина	211	±t14/2	–	–	6,3	–
2	Площина	$46^{+1.0}_{-0.5}$	±t14/2	–	–	6,3	–
3,6	Площина	110	±t14/2	–	–	6,3	–
4	Площина	151	±t14/2	–	–	6,3	–
7	Площина	107	±t14/2	–	⏥ 0.07 ⊥ 0,4 T	2,5	–
8	Площина	107	±t14/2	–	⏥ 0.07	2,5	–
9	Отвір	$\varnothing 25^{+0,052}$	H9	⌖ R0.3	⊥ 0.2/35 T ⌾ 0.002	1,25	–
10	Виточка	67±0,2	±t14/2	–	–	1,25	–
11	Отвір	$\varnothing 30^{+0,027}$	H8	–	⊥ 0.3 C	1,25	–
12	Отвір	$\varnothing 29{,}5^{-0.025}_{-0.052}$	H8	–	◎ R0.1 У	1,25	–

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8
13	Отвір	$\varnothing 25^{+1}$	H14	–	–	3,2	–
14	Отвір	∅5	H14	–	–	12,5	–
15	Отвір	∅5	H14	–	–	12,5	–
16	Різьба	КГ 1/4	6H	–	–	6,3	–
17	Різьба	М20х1,5	6H	–	–	6,3	–
18	Різьба	М8х1,25	6H	⌖ 0.3 Ⓜ	–	6,3	–
19	Різьба	М24х1,5	6H	–	⊥ 0.16/R21	6,3	–
20	Різьба	М10х1,5	6H	⌖ R0.2 Ⓜ	–	6,3	–
21	Отвір	В10	6H	–	–	12,5	–
22	Різьба	М16х1,5	H14	–	–	6,3	–
23	Отвір	∅7	7H	–	–	12,5	–
24	Отвір	∅5	H14	–	–	12,5	–
25	Отвір	$\varnothing 4^{+1,2}$	H14	–	–	12,5	–
26	Виточка	$\varnothing 21{,}6^{+0,15}$	H14	◎ R0.1 Ш	–	3,2	–
27	Виточка	$\varnothing 26{,}6^{+0,15}$	H11	◎ R0.1 Ф	–	3,2	–
28	Різьба	М10х1,5	6H	⌖ R0.2 Ⓜ	–	6,3	–
29	Фаска	1,6х20º	-	–	–		–
30	Фаска	1х45º	-	–	–		–
31	Фаска	1х45º	-	–	–		–
32	Виточка	4±0,3	±t14/2	–	–	12,5	–
33	Виточка	9,8±0,2	±t14/2	–	–	12,5	–
34	Виточка	27±0,2	±t14/2	–	–	12,5	–
35	Виточка	42,5±0,2	±t14/2	–	–	12,5	–
36	Виточка	53,5±0,15	±t14/2	–	–	12,5	–
37	Виточка	72±0,2	±t14/2	–	–	12,5	–

При аналізі деталі корпус на технологічність виявлено, що нетехологічними є похилі отвори. Отвори ∅4 мм та ∅5 мм, що розташовані під кутом, погіршують доступ інструменту до оброблюваної поверхні.

Деталь корпус є технологічною. Точними поверхнями у корпусі є внутрішні циліндричні поверхні $\varnothing 25^{+0,052}$ мм (поз.9 рис. 3.2), $\varnothing 29{,}5^{-0.025}_{-0.052}$ мм (поз.12 рис. 3.2),

$\varnothing 30^{+0,027}$ мм (поз.11 рис. 3.2), які мають шорсткість Ra1,25. До отвору 9 висуваються вимоги щодо допуску циліндричності  та допуску розташування – перпендикулярності  та позиційного  . Отвір 11 також має вимогу перпендикулярності  . ДО отвору 12 висувається вимога допуску співвісності  .

Аналіз базового технологічного процесу

Технологія обробки деталі корпус налічує 10 операцій механічної обробки на яких застосовуються свердлильні, фрезерні та розточувальні верстати. Застосування застарілих моделей металорізальних верстатів є неефективним. Велика кількість операцій обробки та характеристики обладнання уповільнюють виробництво та знижують точність виготовлення.

В деталі корпус обробці підлягають всі сторони деталі. Поверхні, що оброблюються умовно можна поділити на площини, пази, отвори та різьби. Для скорочення кількості застосовуваного металорізального обладнання пропонується застосувати обробні центри з ЧПУ які здатні забезпечити обробку всіх видів поверхонь деталі корпус. На першій операції необхідно обробити одну зі сторін корпусу гідророзподільника, щоб ця поверхня стала чистовою базою для наступної операції. В проєктуємому технологічному процесі планується обрати обробний центр з ЧПУ з поворотним столом. На 005 операції планується обробити одну із граней корпусу та всі внутрішні поверхні, які на ній розміщені. На 010 операції деталь встановлюється на затискний пристрій обробленою площиною та базується по оброблених отворах. Затискний пристрій встановлюється на поворотний стіл верстата з кутом повороту 360^0. Такий варіант базування деталі та конструкція стола верстата забезпечить вільний доступ різального інструменту до інших п’яти граней кришки. Для обробки отворів, що розміщені під кутом (поз. 14, 25 рис. 3.2) обраний верстат має бути забезпечений віссю В, що відповідає за нахил різального інструмента. Це може бути реалізовано на верстаті тим, що шпиндельний вузол встановлений на похилій фрезерній головці з прямим приводом від двигуна.

Таким чином, обробку деталі корпус можна виконати за дві операції механічної обробки замість 10 використовуючи обробні центри з ЧПУ з поворотним столом та віссю В для нахилу різального інструменту.

Вибір заготовки

Матеріалом деталі є сірий чавун СЧ20. Методом отримання заготовки обрано відливання в кокіль. Такий метод дозволяє отримати заготовку достатньої точності для її подальшої обробки та забезпечити наявність деяких отворів з метою зменшення витрат матеріалу та переведення меншого об'єму сірого чавуну в стружку під час обробки поверхонь, що зменшить вартість деталі та скоротить час на її обробку.

Хімічний склад та механічні властивості матеріалу наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Хімічний склад та механічні властивості матеріалу деталі корпус

Хімічний склад %					Механічні властивості			
C	Si	Mn	Cr	Ni	σ_u	$\sigma_в$	$\sigma_{сж}$	НВ
не більше					в кг/мм^2			170-241
3-3,3	1,3-1,7	0,8-1,2	0,3	0,5	40	21	75	

Вибір методів обробки поверхонь

Поверхні, що підлягають неоднократній обробці мажуть мати декілька варіантів маршрутів обробки. Щоб перевірити, який із двох маршрутів буде кращим, виконаємо розрахунок на прикладі отвору поверхні 9. Один маршрут обробки складається із зенкерування та розгортання, а другий – розсвердлювання, зенкерування та розгортання.

Загальне уточнення розраховуються за формулою:

$$\varepsilon_з = \delta_з/\delta_д$$

де $\delta_з$ – допуск на заготовку. $\delta_з$=1200 мкм;

$\delta_д$ – допуск на деталь, $\delta_д$=52 мкм.

$$\varepsilon_З = \frac{1200}{52} = 23{,}0769$$

Частинні уточнення:

$$\varepsilon_1 = \frac{\delta_3}{\delta_1} = \frac{1200}{210} = 5{,}71428$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{210}{52} = 4{,}03846$$

Розраховуємо фактичне уточнення за формулою:

$$\varepsilon_ф = \varepsilon_1\,\varepsilon_2\,\varepsilon_3\,\varepsilon_4$$

$$\varepsilon_{Ф1} = 5{,}71428 \cdot 4{,}03846 = 23{,}0769$$

$$\varepsilon_3 \leq \varepsilon_Ф$$

$$23{,}0769 = 23{,}0769$$

Для першого обраного маршруту умова виконується.

Другий маршрут:

$$\varepsilon_{Ф2} = 5{,}71428 \cdot 2{,}5 \cdot 1{,}61538 = 23{,}076$$

$$23{,}0769 > 23{,}076$$

Для другого обраного маршруту умова не виконується.

Для обробки отвору, поверхня 9, приймаємо перший маршрут. Для всіх інших поверхонь маршрути обробки заносимо до таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Таблиця технологічних маршрутів обробки поверхонь деталі корпус

Позначення поверхні	Допуск на поверхню по кресленню, $\delta_д$, мм	Шорсткість поверхні, Ra, мкм	Допуск на заготовку по поверхні, мм	Загальне уточнення, $\varepsilon_з$	Можливі варіанти маршрутів обробки		Допуск на метод обробки	Уточнення по кожному переходу
					№ п/п	Зміст маршруту		
1,5	1,15	6,3	1	0,869	1	Фрезерування	0,29	3,44
2	0,62	6,3	0,5	0,8	1	Фрезерування	0,19	2,63
3,6	0,87	6,3	0,8	0,91	1	Фрезерування	0,54	1,48
4	1	6,3	1	1	1	Фрезерування	0,63	1,58
7,8	0,87	2,5	0,8	0,91	1	Фрезерування	0,22	3,63
9	0,052	1,25	1,2	23,076	1 2	Зенкерування Розгортання	0,21 0,052	5,714 4,0384
10,32, 33,34, 35,36,37	0,4	12,5	0,5	1,25	1	Фрезерування	0,21	2,38
11	0,027	1,25	0,5	18,5	1 2	Зенкерування Розгортання	0,052 0,021	9,67 2,47

12	0,027	3,2	0,5	18,5	1 2	Зенкерування Розгортання	0,052 0,021	9,64 2,47
13	1	3,2	0,5	0,5	1	Зенкерування	0,21	2,38
14,15	0,3	12,5	0,5	1,6	1	Свердління	0,12	4,16
16	-	6,3	-	-	1	Різьбонарізання	-	-
17	-	6,3	-	-	1	Різьбонарізання	-	-
18	-	6,3	-	-	1	Різьбонарізання	-	-
19	-	6,3	-	-	1	Різьбонарізання	-	-
20	-	6,3	-	-	1	Різьбонарізання	-	-
22	-	6,3	-	-	1	Різьбонарізання	-	-
21	0,43	12,5	0,5	1,16	1	Свердління	0,12	4,16
23	0,36	12,5	0,5	1,38	1	Свердління	0,15	3,33
24	0,3	12,5	0,5	1,6	1	Свердління	0,12	4,16
25	1,2	3,2	0,5	0,41	1	Свердління	0,3	1,6
26	0,15	3,2	0,5	3,33	1	Зенкерування	0,13	3,84
27	0,15	3,2	0,5	3,33	1	Зенкерування	0,13	3,84

Розробка маршруту виготовлення корпусу

Маршрут обробки деталі будуємо з урахуванням обраних маршрутів обробки окремих поверхонь та особливостей обраних металорізальних верстатів.

Розроблений маршрут обробки наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Таблиця технологічних маршрутів обробки деталі корпус

Маршрутний технологічний процес	
базовий	проєктуємий
1	2
005 Свердлильна АМ55 Радіально-свердлильний Зенкерувати два отвори	005 Обробна з ЧПУ Sigma Flexi 5-AX Обробний центр з ЧПУ Фрезерувати площину, обробити отвори різьбофрезою, свердлити отвори, зенкерувати отвори, розгорнути отвори, фрезерувати ланці.
010 Фрезерна 6Р13 Вертикально-фрезерний Фрезерувати 4 бонки	010 Обробна з ЧПУ Sigma Flexi 5-AX Обробний центр з ЧПУ Позиція 1 Обробити отвори різьбофрезою, свердлити отвори, зенкерувати отвори, нарізати різьбу. Позиція 2 Фрезерувати площину, обробити отвори. Поворот столу із деталлю. Позиція 3 Фрезерувати 2 площини, свердлити отвори, фрезерувати різьбу.
015 Свердлильна 2Н150 Вертикально-свердлильний Свердлити 4 отвори, розгорнути 2 отвори.	
020 Розточувальна 2620В Горизонтально-розточувальний Фрезерувати площину, обробити 10 отворів, свердлити отвори, зенкерувати отвори, розгорнути 3 отвори, нарізати різьбу, фрезерувати дві площини, фрезерувати різьбу.	

025 Розточувальна 2620В Горизонтально-розточувальний Фрезерувати площину, свердлити отвори, фрезерувати різьбу.	Поворот столу із деталлю. Позиція 4 Фрезерувати площину, свердлити отвори, фрезерувати різьбу. Поворот столу із деталлю. Позиція 5 Фрезерувати 2 площини, свердлити отвори, фрезерувати різьбу.
030 Свердлильна 2Н135 Вертикально-свердлильний Нарізати різьбу.	
035 Свердлильна 2Н135 Вертикально-свердлильний Розгорнути отвори.	
080 Консольно-фрезерна 6Р13 Вертикальний консольно-фрезерний Фрезерувати фланці.	
085 Консольно-фрезерна 6Р13 Вертикальний консольно-фрезерний Фрезерувати фланці.	
090 Свердлильна АМ55 Радіально-свердлильний Розгорнути 3 отвори.	
210 Слюсарна Зачистити заусенці	015 Слюсарна Зачистити заусенці
215 Контрольна Перевірити розміри	020 Контрольна Перевірити розміри

Вибір технологічних баз

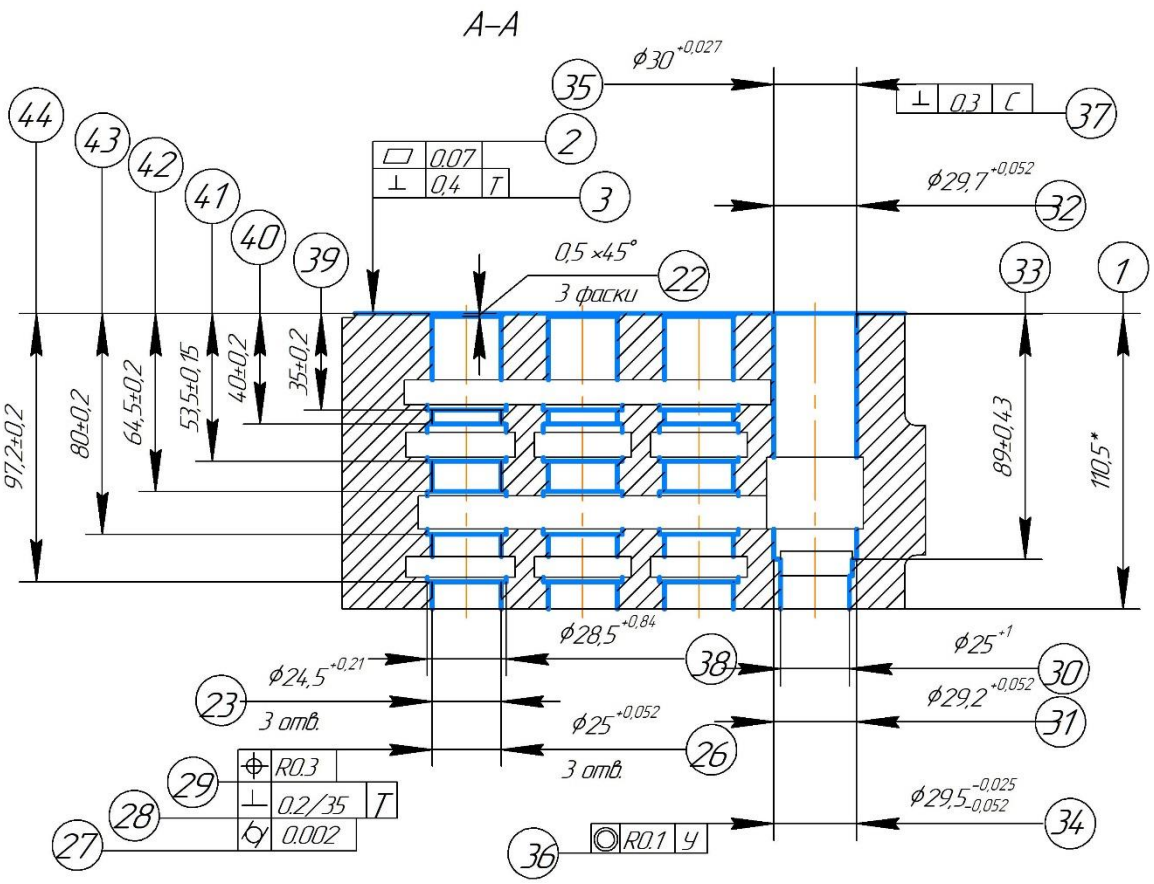
Для деталі корпус на першій операції механічної обробки 005 чорновою базою є площина Т (рис. 3.2). Після чого отримуємо чистову базу – площину С та отвори поз. 9 та 12 (рис. 3.2) для подальшої обробки на 010 операції.

Розробка структури та змісту технологічних операцій, вибір обладнання для їх здійснення

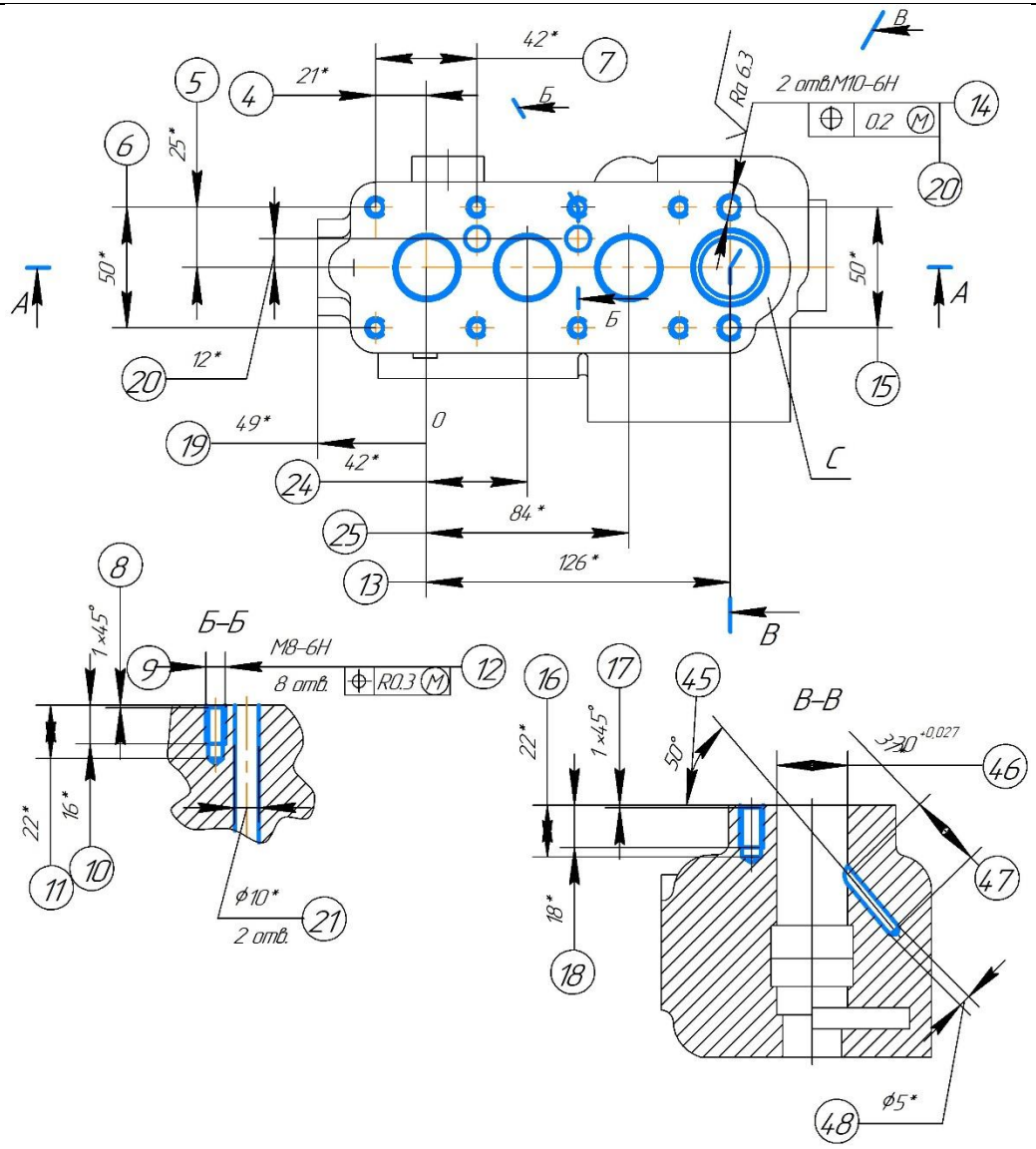
З огляду на конструкцію деталі та розроблений маршрут обробки обираємо верстати. Маршрут обробки корпусу наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

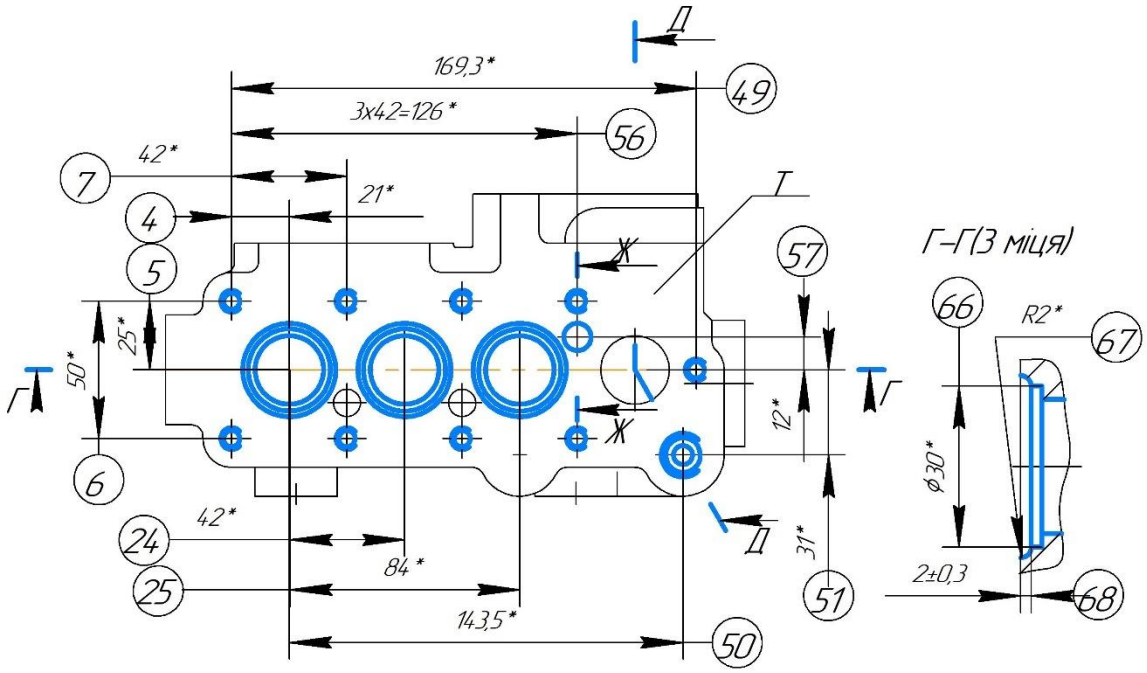
Зміст та структура технологічних операцій обробки деталі корпус

№ та назва опер.	Модель верстату	Операційний ескіз	Зміст операції
1	2	3	4
005 Обробна з ЧПУ	Sigma Flexi 5-AX Обробний центр з ЧПУ		1.Встановити та закріпити заготовку. 2. Фрезерувати площину витримуючи розмір 1 та допуски 2, 3. 3. Обробити вісім отворів М8 витримуючи розміри 4,5,6,7,8,9,10,11 та допуск 12. 4. Обробити два отвори М10 витримуючи розміри 13,14,15,16,17,18,19 та допуск 20.

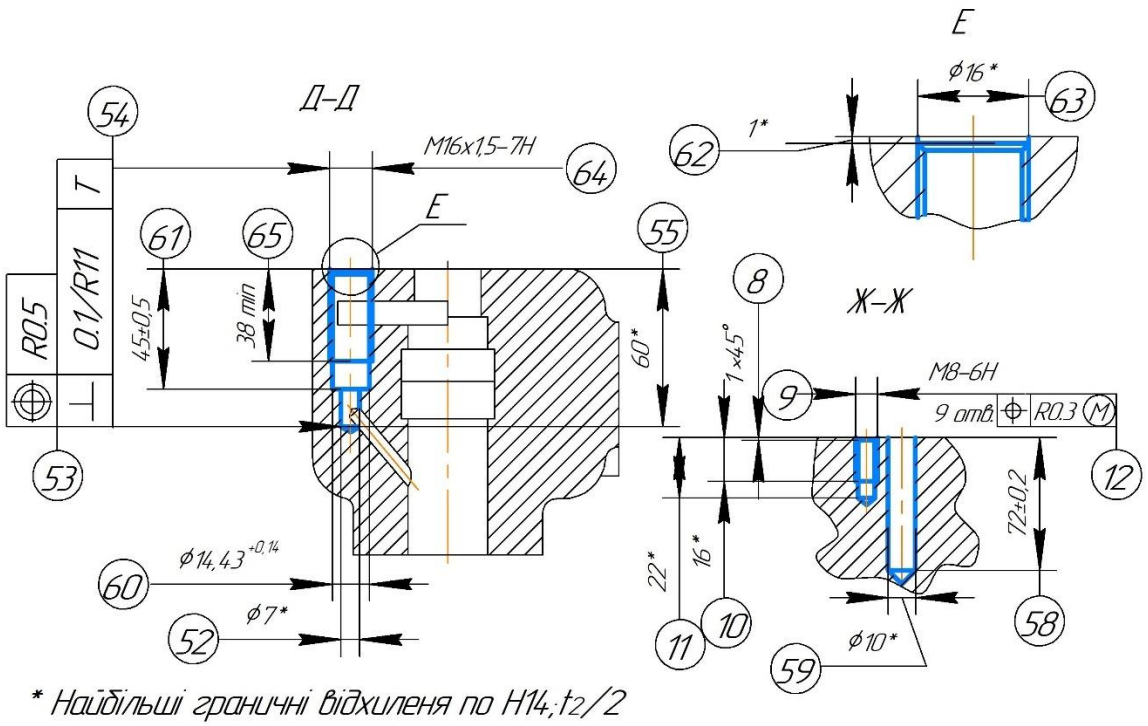
Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
			5. Свердлити два отвори напрохід витримуючи розміри 4,5,6,7,19,20,21. 6. Зенкерувати 3 отвори витримуючи розміри 19,22,23,24,25. 7. Розгорнути 3 отвори витримуючи розміри 19, 24, 25, 26 та допуски 27,28,29. 8. Зенкерувати ступінчастий отвір витримуючи розміри 13,30,31,32,33. 9. Розгорнути ступінчастий отвір витримуючи розміри 13,34,35 та допуски 36,37. 10. Фрезерувати фланці витримуючи розміри 24,25,38,39,40,41,42,43,44. 11. Свердлити отвір витримуючи розміри 13,45,46,47,48. 12. Відкріпити та знати деталь.

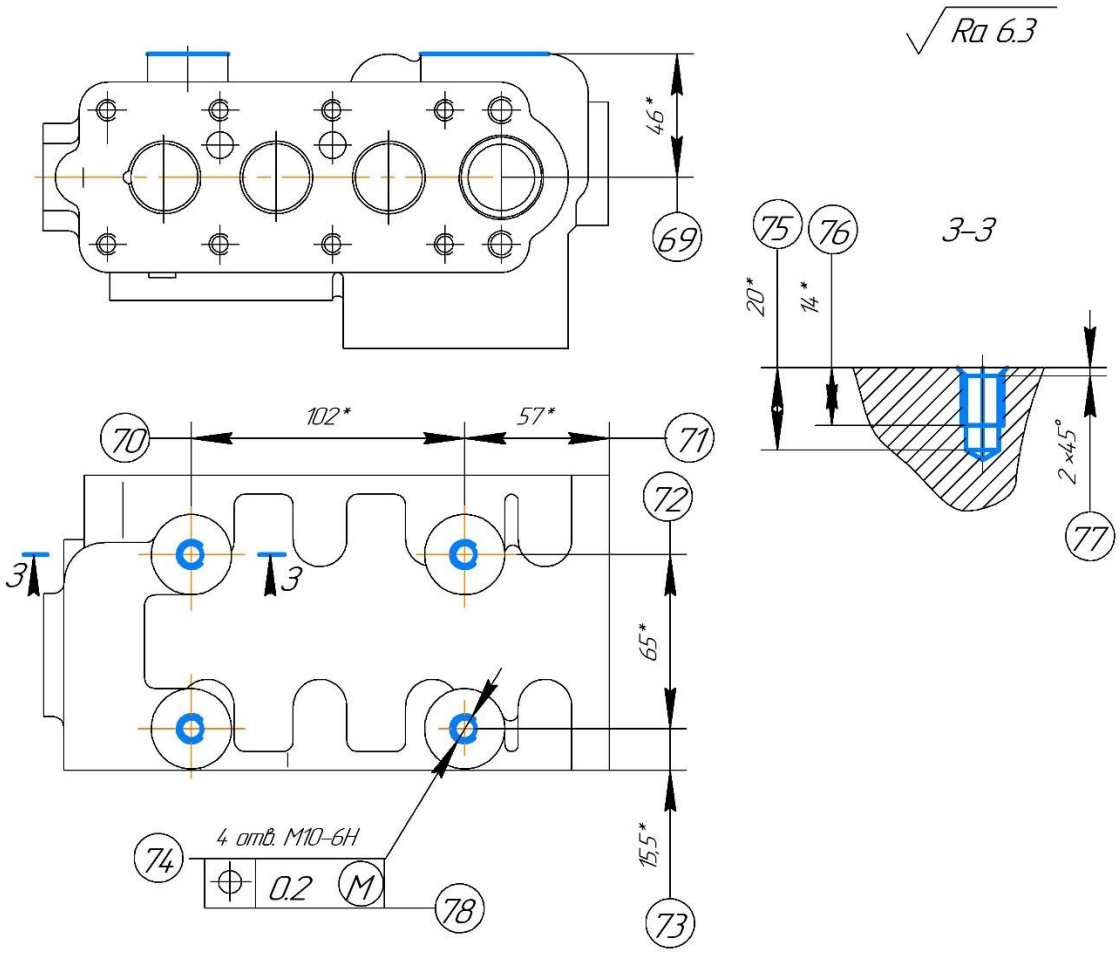
Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
010 Обробна з ЧПУ	Sigma Flexi 5-AX Обробний центр з ЧПУ		1. Встановити та закріпити деталь. Позиція 1 2. Обробити 9 отворів М8 витримуючи розміри 4,5,6,7,8,9,10,11,49 та допуск 12. 3. Свердлити отвір витримуючи розміри 50,51,52,55 та допуски 53,54. 4. Свердлити отвір витримуючи розміри 4,5,56,57,58,59.

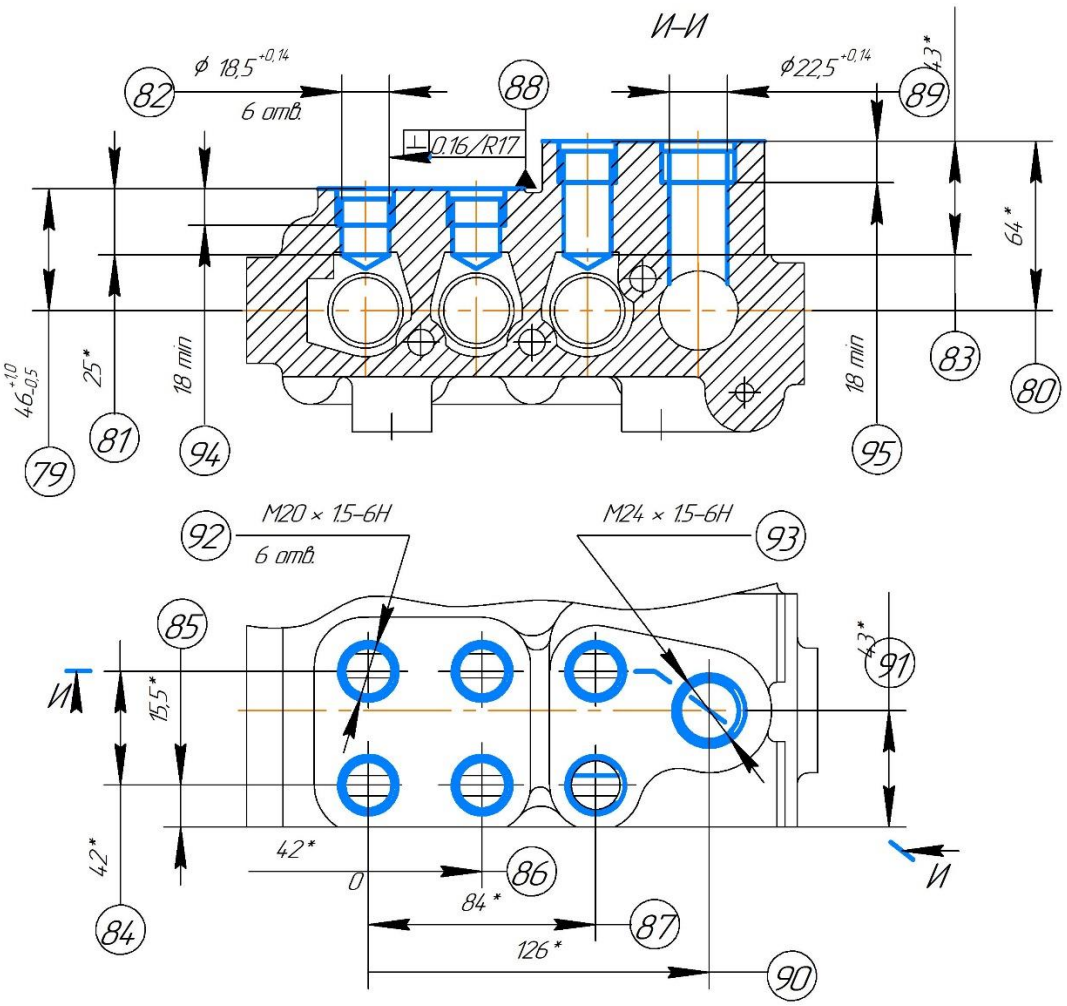
Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
			5. Зенкерувати отвір під різьбу, фаску витримуючи розміри 50,51,60,61. 6. Нарізати різьбу витримуючи розміри 50,51,64,65. 7. Зенкерувати три отвори витримуючи розміри 24,25,50,66,67,68.

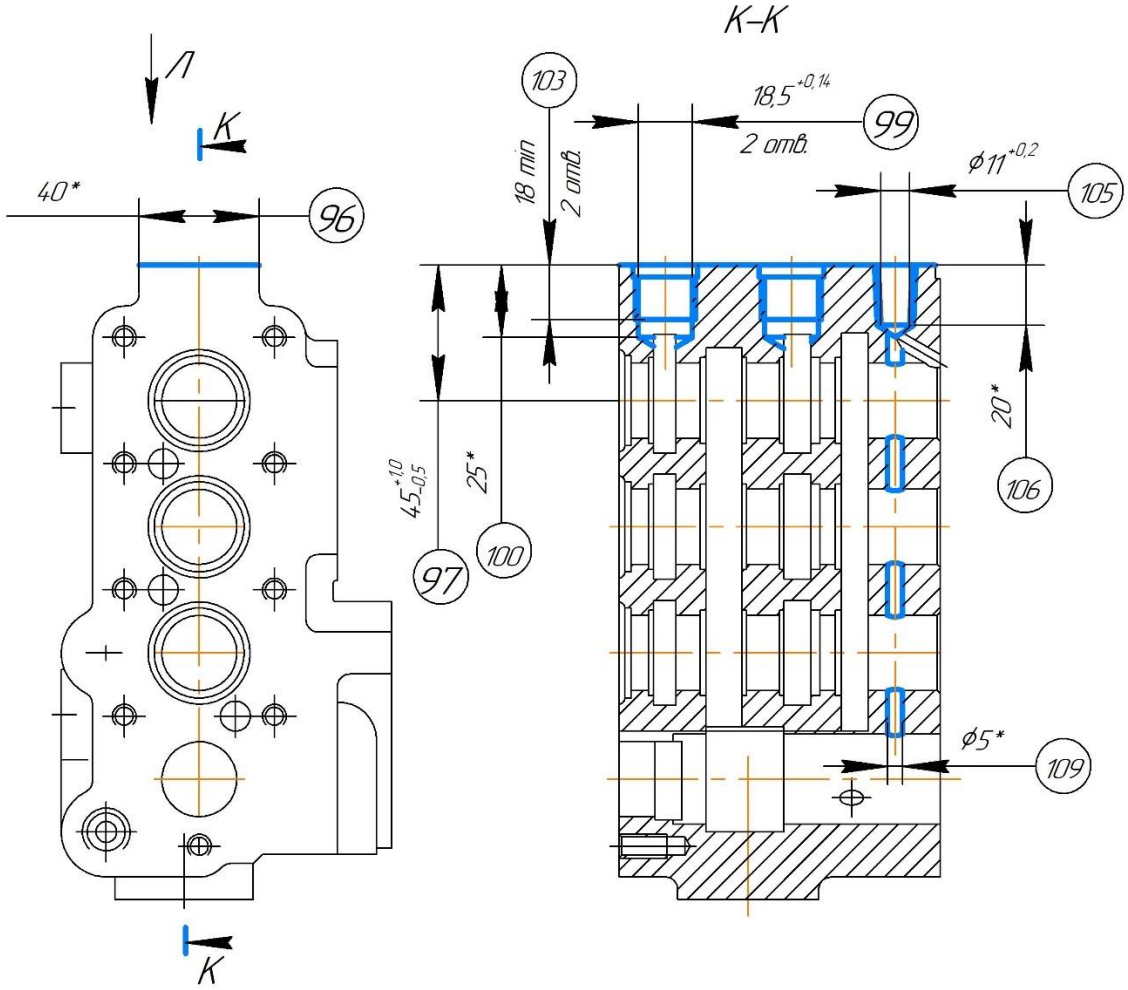
Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
			Позиція 2 8. Фрезерувати площину витримуючи розмір 69. 9. Обробити чотири отвори М10 витримуючи розміри 70,71,72,73,74,75,76, 77 та допуск 78. 10. Поворот стола верстату на 180^0.

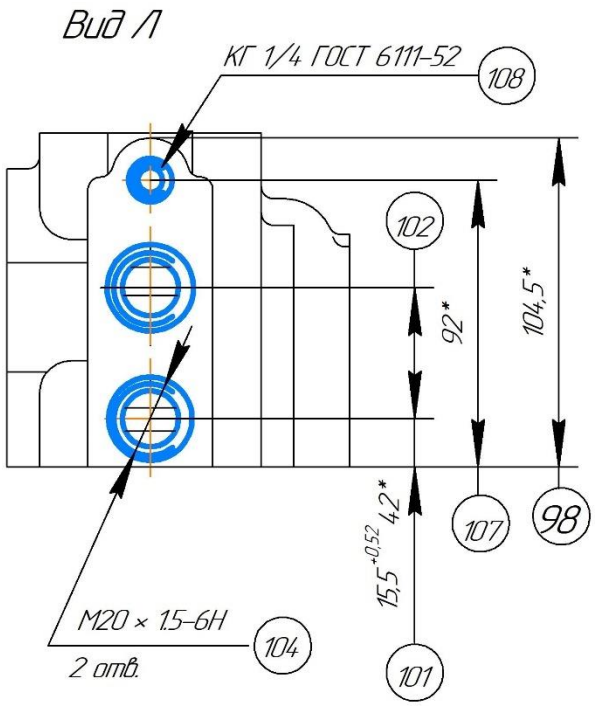
Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
			Позиція 3 11. Фрезерувати дві площини витримуючи розміри 79,80. 12. Свердлити 6 отворів під різьбу витримуючи розміри 81,82,83,84,85,86,87 та допуск 88. 13. Свердлити отвір під різьбу витримуючи розміри 89,90,91. 14. Фрезерувати різьбу витримуючи розміри 84,85,86,87,90,91,92,93,94,95. 15. Поворот стола верстату на 90^0.

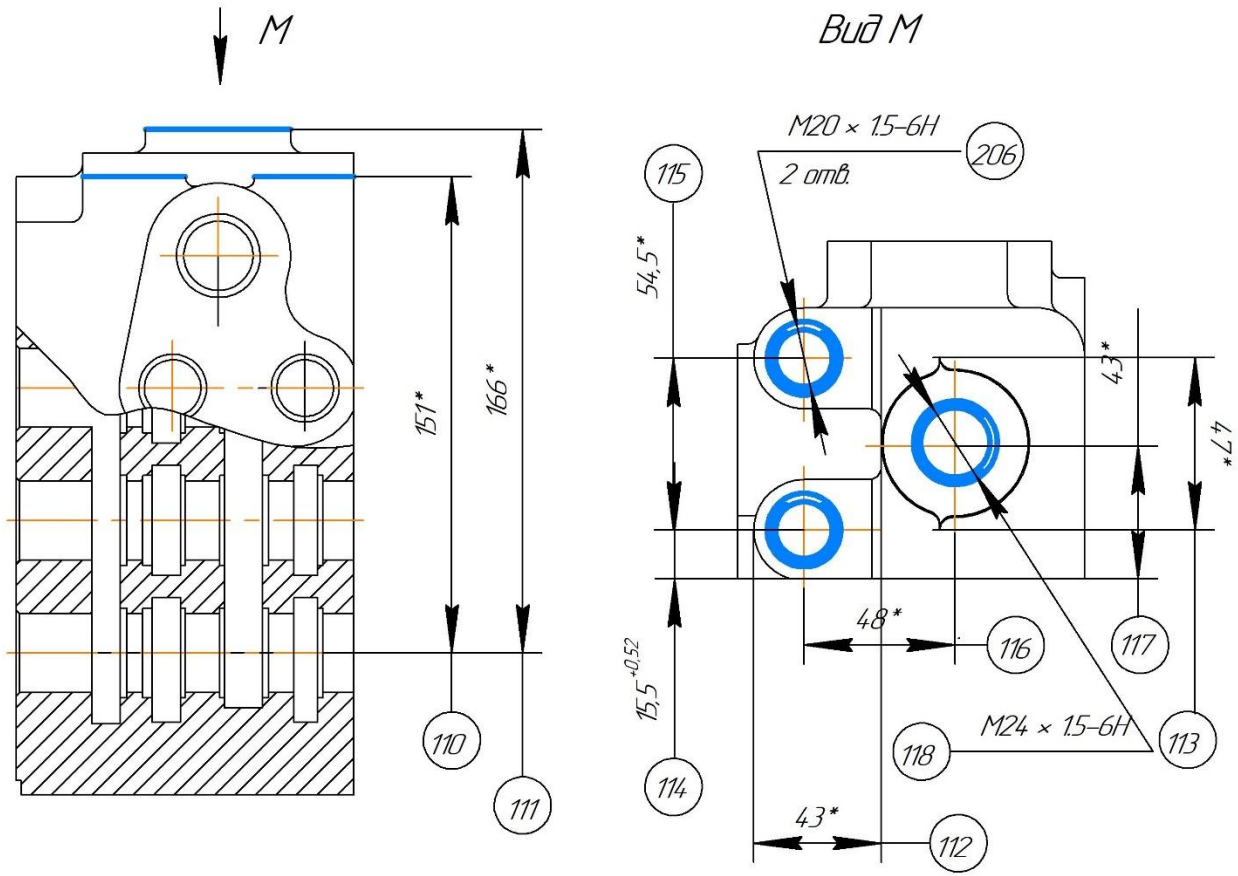
Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
			Позиція 4 16. Фрезерувати площину витримуючи розміри 96,97,98. 17. Свердлити 2 отвори витримуючи розміри 99,100,101,102. 18. Фрезерувати різь витримуючи розміри 101102,103,104. 19. Свердлити отвір витримуючи розміри 105,106,107. 20. Фрезерувати різь витримуючи розміри 106,107,108. 21. Свердлити отвір витримуючи розміри 107,109.

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
			22. Фрезерувати різь витримуючи розміри 106,107,108. 23. Свердлити отвір витримуючи розміри 107,109. 24. Поворот стола верстату на 180^0.

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
			Позиція 5 25. Фрезерувати дві площини витримуючи розміри 110,111,112,113. 26. Свердлити два отвори витримуючи розміри 114,115,116. 27. Свердлити отвір витримуючи розміри 116,117. 28. Фрезерувати різьбу витримуючи розміри 116,117,118. 29. Відкріпити та зняти деталь.

Характеристика обраних металорізальних верстатів наведена в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

Металорізальні верстати для обробки деталі корпус

№ операції	Модель та найменування верстату	Стисла технічна характеристика				
		Габаритні розміри робочого столу чи макс. діамет обробки	Ряд частот обертання ($хв^{-1}$)	Ряд подач (мм/хв)	Потужність (кВт)	Габаритні розміри верстату (мм)
005, 010	Sigma Flexi 5AX Обробний центр з ЧПУ	Стіл 1450x730 Планшайба Ø660	до 12000	1-20000	27	4100 × 3400 × 3100

Вибір пристроїв для затиску деталі

Обрані затискні пристрої та їх стисла характеристика наведені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

Затискні пристрої для деталі

Номер опера-ції	Найменування пристрою	Стандарт (код)	Вид приводу
005	Пристрій затискний	Спец.	Механічний
010	Пристрій затискний	Спец.	Механічний

Вибір різальних інструментів

Для обробки поверхонь деталі корпус обираємо різальні інструменти провідних світових виробників. Для обробки ступінчастих отворів обираємо спеціальний ступінчастий інструмент. Перелік вибраних інструментів для обробки поверхонь деталі корпус наведені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8

Ріжучий інструмент для механічної обробки деталі корпус

Номер			Найменування інструменту	Стандарт на конструкцію інструменту (код)	Різальна частина Матеріал
Опер.	Поз.	Перех.			
1	2	3	4	5	6
005	-	2	Фреза торцева	345-080Q27-13M	345R-1305M-KH 3220
		3	Різьбофреза	MTECS 08068C14 1.25	AH725

Продовження табл. 3.8

1	2	3	4	5	6
005	-	4	Різьбофреза	MMEC100A07R0.5-2T06	IC908
		5	Свердло	TCD 100-104-16S0-3D	TCD-100-M TT9080
		6	Зенкер	CM-D25-A-W25-C	H600 WXCU 050410 HP IC830
		7	Розвертка	Спеціальна	ВК8
		8	Зенкер ступінчастий	EPMT060101R-11	AH725
		9	Розвертка ступінчаста	RM-BN9-30000-H7LB	IC908
		10	Фреза т-подібна	ECR-B4505-05-C06-57	3220
		11	Свердло	860.1-0500-038A1-PM	GC4344
010	1	2	Різьбофреза	MTECS 08068C14 1.25	AH725
		3	Свердло	TCD 070-074-12S0-3D	TCD-070-M TT9080
		4	Свердло	861.1-1000-120A1-GM	GC1220
		5	Зенкер	CS M16-1.5-D16	IC908
		6	Мітчик	T300-XM100DA-M16X15	HSS-E-PM (TiCN)
		7	Зенкер	835.T-0850-A1-MF	WNMG080408-TH T5115
	2	8	Фреза торцева	345-100Q32-13M	345R-1305M-KH 3220
		9	Різьбофреза	MMEC100A07R0.5-2T06	IC908
	3	11	Фреза кінцева	TPO18R032M16.0E05	LNMU0303ZER-MJ AH725
		12	Свердло	TCD 185-189-25S0-3D	TCD-185-M TT9080
		13	Свердло	TCD 225-229-25S0-3D	TCD-225-M TT9080
		14	Різьбофреза	327-16B42EC-12	327R09-18 150VM-TH 1025
	4	16	Фреза кінцева	419-025A25-14M	419N-140408M-KH 3220
		17	Свердло	TCD 185-189-25S0-3D	TCD-185-M TT9080
		18	Різьбофреза	327-16B42EC-12	327R09-18 150VM-TH 1025
		19	Свердло	860.1-1100-055A1-PM	GC4344
		20	Різьбофреза	MTE D10-18 NPT/PT	IC908
		21	Свердло	860.1-0500-038A1-PM	GC4344
		22	Різьбофреза	MTE D10-18 NPT/PT	IC908
		23	Свердло	860.1-0500-038A1-PM	GC4344
	5	25	Фреза торцева	345-063Q22-13M	345R-1305M-KH 3220
		26	Свердло	TCD 185-189-25S0-3D	TCD-185-M TT9080
		27	Свердло	TCD 225-229-25S0-3D	TCD-225-M TT9080
		28	Різьбофреза	327-16B42EC-12	327R09-18 150VM-TH 1025

Вибір вимірювальних пристроїв та інструментів

Інструменти та пристрої, які обрано для контролю розмірів деталі корпус наведені в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9

Вимірювальний інструмент і контрольні пристрої

Номер			Параметр деталі, який контролюється	Найменування вимірювального інструменту	Стандарт на конструкцію
Операції	Позиції	Переходу			
1	2	3	4	5	6
005	-	2	110.5	Висотомір цифровий Mitutoyo Digimatic HD-60AX	ISO 13225:2012 / DIN 862
		3	M8-6H	Калібр-пробка різьбова двостороння M8-6H-GO/NOGO	ISO 1502:1996
		4	M10-6H	Калібр-пробка різьбова двостороння M10-6H-GO/NOGO	ISO 1502:1996
		5	$Ø10_{-0.15}$	Штангенциркуль цифровий Mitutoyo ABSOLUTE Digimatic 0-150 мм	ISO 13385-1:2019
		6	$Ø24.5^{+0.21}$	Нутромір мікрометричний трехточковий Mitutoyo Holtest 20-25	ISO 3611:2023 / DIN 863
		7	$Ø25^{+0.052}$	Гладка калібр-пробка 25H8-GO/NOGO	ISO 1938-1:2015
		8	$Ø29,7^{+0.052}$	Штангенглибиномір цифровий Mitutoyo Digimatic 0-200 мм	ISO 13385-2:2020
		9	$Ø29,5^{-0.025}_{-0.052}$	Нутромір індикаторний Mitutoyo 18-35	ISO 463:2006 / DIN 878
		9	$Ø30^{+0.027}_{0}$	Гладка калібр-пробка 30H7-GO/NOGO	ISO 1938-1:2015
		10	$97,2^{+0.2}_{-0.2}$	Висотомір цифровий Mitutoyo LH-600EG Linear Height	ISO 13225:2012
		11	$Ø5_{-0.12}$	Штангенциркуль цифровий Mitutoyo 500-181-30	ISO 13385-1:2019
010	1	2	M8-6H	Калібр-пробка різьбова двостороння M8-6H-GO/NOGO	ISO 1502:1996
		3	$Ø7_{-0.15}$	Штангенциркуль цифровий Mitutoyo ABSOLUTE Digimatic 500-181-30	ISO 13385-1:2019
		4	$Ø10_{-0.15}$	Штангенглибиномір цифровий Mitutoyo Digimatic 571-202-30	ISO 13385-2:2020
		5	$Ø14,43^{+0.14}$	Нутромір мікрометричний Mitutoyo Holtest 468-164	ISO 3611:2023
		6	M16×1.5-7H	Калібр-пробка різьбова двостороння M16x1.5-7H-GO/NOGO	ISO 1502:1996
		7	$Ø30_{-0.2}$	Штангенглибиномір цифровий Mitutoyo 571-202-30	ISO 13385-2:2020
	2	8	$46_{-0.3}$	Висотомір цифровий Mitutoyo LH-600EG 0-600 мм	ISO 13225:2012

Продовження табл. 3.9

1	2	3	4	5	6
010	2	9	М10-6Н	Калібр-пробка різьбова двостороння М10-6Н-GO/NOGO	ISO 1502:1996
	3	11	$46^{+1.0}_{-0.5}$	Штангенглибиномір цифровий Mitutoyo 571-202-30	ISO 13385-2:2020
		12	$Ø18{,}5^{+0.14}_{0}$	Нутромір мікрометричний Holtest 468-165	ISO 3611:2023
		13	$Ø22{,}5^{+0.14}$	Нутромір мікрометричний Mitutoyo Holtest 468-166	ISO 3611:2023
		14	М20×1.5-6Н	Калібр-пробка різьбова двостороння М20х1.5-6Н-GO/NOGO	ISO 1502:1996
		14	М24×1.5-6Н	Калібр-пробка різьбова двостороння М24х1.5-6Н-GO/NOGO	ISO 1502:1996
	4	16	$40_{-0.3}$	Штангенциркуль цифровий Mitutoyo ABSOLUTE 500-181-30	ISO 13385-1:2019
		17	$Ø18{,}5^{+0.14}$	Нутромір мікрометричний 16-20 мм Mitutoyo Holtest 468-165	ISO 3611:2023
		18	М20×1.5-6Н	Калібр-пробка різьбова двостороння М20х1.5-6Н-GO/NOGO	ISO 1502:1996
		19	$Ø11^{+0.2}$	Гладкий калібр-пробка 11Н11-GO/NOGO	ISO 1938-1:2015
		20	КГ 1/4"	Калібр-пробка різьбова конічна К 1/4" KG-1/4-PLUG	SO 7-2:2000 / DIN EN 10226-2
	5	25	$166_{-0.5}$	Висотомір цифровий Mitutoyo LH-600EG	ISO 13225:2012
		26	М20×1.5-6Н	Калібр-пробка різьбова двостороння М20х1.5-6Н-GO/NOGO	ISO 1502:1996
		27	М24×1.5-6Н	Калібр-пробка різьбова М24х1.5-6Н-GO/NOGO	ISO 1502:1996

Визначення припусків та операційних розмірів

Розраховуємо припуски для поверхні 11 (рис. 3.2) – отвору $\varnothing 30^{+0{,}027}$.

Просторові відхилення, що залишаються після зенкерування, визначають за формулою:

$$\rho_i = k_y \cdot \rho_{i-1}$$

Тоді після зенкерування $\rho_1 = 0{,}05 \cdot 200 = 10$ мкм.

Мінімальні припуски становлять:

- для зенкерування

$$2Z_{1\,\min} = 2\left[(200 + 300) + \sqrt{200^2 + 1200^2}\right] = 3433 \text{ мкм}$$

- для розгортання

$$2Z_{2\,\min} = 2\left[(30 + 40) + \sqrt{10^2 + 0^2}\right] = 160 \text{ мкм}$$

Отже, $2Z_{1\,\min} = 3{,}433$ мм, $2Z_{2\,\min} = 0{,}160$ мм.

Розрахунок операційних розмірів виконують у напрямку від готового розміру до заготовки. Найбільший діаметр отвору на попередньому переході, який ще забезпечує мінімальний припуск наступного переходу, визначають за формулою:

$$d_{i-1\,\max} = d_{\mathrm{i}\,\min} - 2Z_{\mathrm{i}\,\min}$$

Для зенкерування, виходячи з найменшого граничного розміру готового отвору Ø30,000 мм:

$$d_{1\,\max} = 30{,}000 - 0{,}160 = 29{,}840 \text{ мм};$$

$$d_{1\,\min} = 29{,}840 - 0{,}14 = 29{,}700 \text{ мм}$$

Приймаємо розмір після зенкерування $Ø29{,}7^{+0\cdot 14}$ мм. Для заготовки найбільший допустимий діаметр отвору та розрахунковий номінальний діаметр становлять:

$$d_{0\,\max} = 29{,}700 - 3{,}433 = 26{,}267 \text{ мм};$$

$$d_{0\,\min} = 26{,}267 - 1{,}2 = 25{,}067 \text{ мм}$$

$$d_0 = \frac{26{,}267 + 25{,}067}{2} = 25{,}66$$

Граничні розміри отвору на кожному переході визначають за формулою:

$$d_{\max} = d_{\min} + \delta$$

Для заготовки:

$$d_{0\,\min} = 25 - 0{,}6 = 24{,}4 \text{ мм};$$

$$d_{0\,\max} = 25 + 0{,}6 = 25{,}6 \text{ мм}$$

Після зенкерування та розгортання:

$$d_{1\,\max} = 29{,}7 + 0{,}14 = 29{,}84 \text{ мм}$$

$$d_{2\,\max} = 30{,}000 + 0{,}027 = 30{,}027 \text{ мм}$$

Фактичні граничні значення двосторонніх припусків обчислюють за формулами:

$$2Z_{\mathrm{i}\,\min} = d_{\mathrm{i}\,\min} - d_{i-1\,\max}$$

$$2Z_{\mathrm{i}\,\max} = d_{\mathrm{i}\,\max} - d_{i-1\,\min}$$

Для зенкерування:

$$2Z_{1\,\min} = 29{,}7 - 25{,}6 = 4{,}10 \text{ мм};$$

$$2Z_{1\,\max} = 29{,}84 - 24{,}4 = 5{,}44 \text{ мм}$$

Для розгортання:

$$2Z_{2\,\min} = 30{,}000 - 29{,}84 = 0{,}16 \text{ мм};$$

$$2Z_{2\,\max} = 30{,}027 - 29{,}7 = 0{,}327 \text{ мм}$$

Умова забезпечення мінімального припуску виконується на обох переходах:

$$4{,}10 \geq 3{,}433 \text{ мм}; \quad 0{,}16 \geq 0{,}160 \text{ мм}$$

Перевіряємо правильність обчислень за залежністю:

$$2Z_{\text{i max}} - 2Z_{\text{i min}} = \delta_{i-1} + \delta_i$$

$$5{,}44 - 4{,}10 = 1{,}34 = 1{,}2 + 0{,}14$$

$$0{,}327 - 0{,}16 = 0{,}167 = 0{,}14 + 0{,}027$$

Загальні припуски на обробку отвору від заготовки до деталі:

$$2Z_{0\,\min} = 30{,}000 - 25{,}6 = 4{,}40 \text{ мм};$$

$$2Z_{0\,\max} = 30{,}027 - 24{,}4 = 5{,}627 \text{ мм}$$

$$2Z_{0\,\max} - 2Z_{0\,\min} = 5{,}627 - 4{,}40 = 1{,}227 = \delta_0 + \delta_2 = 1{,}2 + 0{,}027$$

Підсумкові результати розрахунку наведено в таблиці 3.10.

Схема графічного розташування припусків представлена на рис. 3.3.

Таблиця 3.10

Розрахунок припусків і граничних розмірів внутрішньої циліндричної поверхні деталі корпус

Технологічні переходи обробки поверхні	Елементи припуску, мкм			Розрахунковий припуск, мкм	Розрахунковий розмір, мм	Допуск, мм	Граничний розмір, мм		Граничні відхилення припусків, мм	
	R_z	T	$\rho + \varepsilon$	$2z_{min}$	d_p	δ	d_{min}	d_{max}	$2z_{\min}^{np}$	$2z_{\max}^{np}$
Заготовка	200	300	200		26,267	1,2	24,4	25,6	—	—
Зенкерування	30	40	1210	3433	29,752	0,052	29,7	29,752	4,10	5,44
Розгортання			-	160	30,0	0,027	30,000	30,027	0,16	0,327
Разом									4,26	5,767

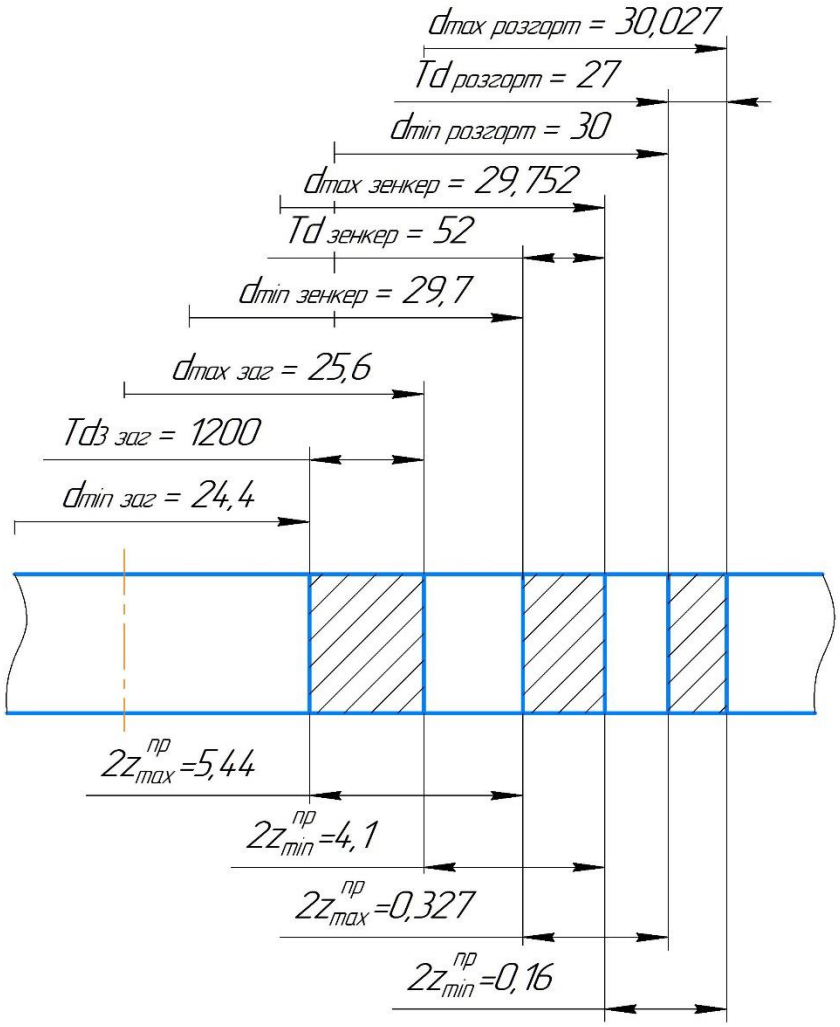


Рис. 3.3. Схема графічного розташування припусків обробки отвору 11

Таблиця 3.11

Припуски на поверхні деталі корпус

№ поверхні	Маршрут обробки	Припуск, мм		Допуск, мм	Розмір, мм
		Табличний	Визначений		
1	2	3	4	5	6
1,5	Фрезерування	3	-	0,29	126±0,29
2	Фрезерування	2,5	-	1,5	$46^{+1.0}_{-0.5}$
3,6	Фрезерування	3	-	0,54	110±0,54
4	Фрезерування	3	-	0,63	151±0,63
7	Фрезерування	3,5	-	0,22	107±0,22
8	Фрезерування	3,5	-	0,22	107±0,22
9	Зенкерування Розгортання	1,25 0,25	-	0,21 0,08	$\varnothing 24{,}5^{+0{,}21}$ $\varnothing 25^{+0{,}052}$

Продовження табл. 3.11

1	2	3	4	5	6
10	Фрезерування	1,75	-	0,21	$\varnothing 28{,}5^{+0{,}84}$
11	Зенкерування Розгортання	2,35 0,15	-	0,052 0,027	$\varnothing 29{,}7^{+0{,}052}$ $\varnothing 30^{+0{,}027}$
12	Зенкерування Розгортання	2,35 0,15	-	0,052 0,021	$\varnothing 29{,}2^{+0{,}052}$ $\varnothing 29{,}5^{-0.025}_{-0.052}$
13	Зенкерування	1	-	1	$\varnothing 25^{+1}$
14	Свердління	2,5	-	0,12	$\varnothing 5^{+0{,}12}$
15	Свердління	2,5	-	0,12	$\varnothing 5^{+0{,}12}$
21	Свердління	5	-	0,12	$\varnothing 10^{+0{,}12}$
23	Свердління	3,5	-	0,15	$\varnothing 7^{+0{,}15}$
24	Свердління	2,5	-	0,12	$\varnothing 5^{+0{,}12}$
25	Свердління	2	-	0,3	$\varnothing 4^{+0{,}3}$
26	Зенкерування	1,55	-	0,15	$\varnothing 21{,}6^{+0{,}15}$
27	Зенкерування	2,05		0,15	$\varnothing 26{,}6^{+0{,}15}$

Визначення режимів різання

Розрахунок виконуємо для переходу 12 позиції 3 операції 010 - свердління шести отворів $Ø18{,}5^{+0\cdot 14}$ мм на глибину 25 мм. Інструментом є свердло із корпусом TCD 185-189-25S0-3D, зі змінною головкою TCD-185-M та пластинами із твердого сплаву TT9080.

Глибина різання при свердлінні дорівнює половині діаметра:

$$t = \frac{D}{2} = \frac{18{,}5}{2} = 9{,}25 \text{ мм}$$

Подачу визначаємо за каталогом різального інструменту $s_{\text{табл}} = 0{,}41 - 0{,}47$ мм/об. Приймаємо середнє значення 0,44 мм/об і зменшуємо його для твердосплавного свердла коефіцієнтом $K_{\text{ts}} = 0{,}6$:

$$s = s_{\text{табл}} \cdot K_{\text{ts}} = 0{,}44 \cdot 0{,}6 = 0{,}264 \text{ мм/об}$$

Період стійкості свердла з твердого сплаву T = 45 хв.

Швидкість різання при Cv = 34,2; q = 0,45; y = 0,30; m = 0,20 і Kv = 1 (HB 190; l/D = 25/18,5 = 1,35 < 3, отже Klv = 1,0):

$$v = \frac{34{,}2 \cdot 18{,}5^{0{,}45}}{45^{0{,}2} \cdot 0{,}264^{0{,}3}} \cdot 1 = 88{,}5 \text{ м/хв}$$

Частота обертання шпинделя:

$$n = \frac{1000 \cdot 88{,}5}{3{,}14 \cdot 18{,}5} = 1523 \text{ хв}^{-1}$$

Значення не перевищує максимальної частоти обертання шпинделя верстата.

Хвилинна подача:

$$s_{\text{хв}} = s \cdot n = 0{,}264 \cdot 1523 = 402 \text{ мм/хв}$$

Крутний момент і потужність різання:

$$M_{\text{кр}} = 10 \cdot C_{\text{М}} \cdot D^{2,2} \cdot s^{0,8} \cdot K_p = 10 \cdot 0{,}012 \cdot 18{,}5^{2,2} \cdot 0{,}264^{0,8} \cdot 1 = 25{,}4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$N = \frac{M_{\text{кр}} \cdot n}{9750} = \frac{25{,}4 \cdot 1523}{9750} = 4{,}0 \text{ кВт} < 30 \text{ кВт}$$

Довжина врізання при куті при вершині свердла 2φ = 140°:

$$y = 0{,}5 \cdot D \cdot ctg\varphi = 0{,}5 \cdot 18{,}5 \cdot \text{ctg } 70° = 3{,}37 \text{ мм}$$

$$L = l + y + \Delta = 25 + 3{,}37 + 2 = 30{,}37 \text{ мм}$$

$$T_0 = \frac{L}{s_{\text{хв}}} = \frac{30{,}37}{402} = 0{,}0755 \text{ хв}$$

Основний час для свердлінні 6 отворів:

$$T_0 = 6 \cdot 0{,}0755 = 0{,}453 \text{ хв}$$

Розрахунок режимів різання для решти переходів виконано аналогічно на підставі каталогів різальних інструментів виробників та рекомендацій щодо режимів зазначених в каталогах, результати наведено в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12

Режими різання

Номер			t, мм	S_o, мм/об, $S_{хв}$, мм/хв	v, м/хв	n, об/хв
операції	Поз.	переходу				
1	2	3	4	5	6	7
005	-	2	3,00	0,20 мм/зуб	110,6	440
		3	0,68	0,13 мм/зуб	60,0	3183
		4	0,81	0,10 мм/зуб	95,0	4320
		5	5,00	0,165 мм/об	86,9	2767
		6	1,25	0,70 мм/об	87,1	1131
		7	0,25	0,70 мм/об	35,5	452
		8	2,35	0,77 мм/об	86,7	978
		9	0,15	мм/об	35,1	373
		10	1,75	0,3	150	1910
		11	2,50	0,090 мм/об	52,4	3337

Продовження табл. 3.12

1	2	3	4	5	6	7
010	1	2	0,68	0,13 мм/зуб	60,0	3183
		3	3,50	0,126 мм/об	48,2	2190
		4	5,00	0,165 мм/об	55,6	1771
		5	3,71	0,49 мм/об	88,7	1957
		6	0,81	1,50 мм/об	20,0	398
		7	2,00	0,30 мм/об	145,0	1538
	2	8	2,50	0,20 мм/зуб	124,3	396
		9	0,81	0,10 мм/зуб	95,0	4320
	3	11	3,00	0,15 мм/зуб	117,9	1173
		12	9,25	0,264 мм/об	88,5	1523
		13	11,25	0,30 мм/об	90,8	1285
		14	0,81	0,10 мм/зуб	95,0	1890
	4	16	3,00	0,15 мм/зу	117,6	1497
		17	9,25	0,264 мм/об	88,5	1523
		18	0,81	0,10 мм/зуб	95,0	1890
		19	5,50	0,198 мм/об	76,4	2210
		20	0,76	0,10 мм/зуб	95,0	3024
		21	2,50	0,090 мм/об	52,4	3337
		22	0,76	0,10 мм/зуб	95,0	3024
		23	2,50	0,090 мм/об	52,4	3337
	5	25	3,00	0,20 мм/зуб	107,2	542
		26	9,25	0,264 мм/об	88,5	1523
		27	11,25	0,30 мм/об	90,8	1285
		28	0,81	0,10 мм/зуб	95,0	1890

Технічне нормування операцій

Технічне нормування полягає в установленні науково обґрунтованої норми часу на виконання операції в заданих організаційно-технічних умовах. Норма часу є основою для розрахунку продуктивності обладнання, потрібної кількості верстатів і собівартості обробки. Для серійного виробництва, до якого належить виготовлення корпусу гідророзподільника, норму встановлюють у вигляді штучно-калькуляційного часу.

Результати вибору та розрахунку норм часу на операції механічної обробки деталі корпус занесено в таблицю 3.13.

Таблиця 3.13

Нормування операцій

№ операції	t_0 хв.	$t_{техн.об}$ хв.	$t_{орг.обс}$	$t_{пер}$ хв.	$t_{шт}$ хв.	$T_{п.з}$ хв.	$T_{шт.к}$ хв.
005	2,11	0,06	0,06	0,004	2,28	25	2,33
010	8,99	0,27	0,27	0,18	9,71	25	9,76

3.3. Висновки

Розроблений технологічний процес виготовлення деталі корпус складається з двох операцій механічної обробки, що виконуються на обробних центрах з ЧПУ. Базовий технологічний процес складався із 10 операцій на яких застосовувались застарілі моделі свердлильних, розточувальних та фрезерних верстатів. За рахунок того, що обраний обробний центр має поворотний стіл, в деталі корпус стало можливим обробити всі поверхні, які знаходяться на п’яти гранях на одній операції за один установ та 5 позицій. Завдяки раціоналізації технології обробки корпусу вдалося зменшити кількість металообробного обладнання та зменшити час обробки деталі. Під час проєктування технологічного процесу було обрано затискні та вимірювальні пристрої, а також різальні інструменти. Розраховано припуски, режими різання та норми часу.

Аналіз точності поверхонь деталі показав, що найбільш точною поверхнею корпусу є три внутрішні циліндричні поверхні $\varnothing 25^{+0,052}$ мм (поз.9 рис. 3.2), що мають шорсткість Ra1,25. До вказаних отворів висуваються вимоги щодо допуску циліндричності та допуску перпендикулярності.

Спроєктувати розвертку для обробки отворів $\varnothing 25^{+0,052}$ мм, вибрати кількість зубців за критерієм Q, визначити кути між зубцями з урахуванням обмежень на нерівномірність і зрівноваженість, оцінити навантаження на зуби, жорсткість і власну частоту інструмента.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РОЗВЕРТКИ ДЛЯ ОБРОБКИ ОТВОРІВ ДЕТАЛІ КОРПУС

4.1. Вихідні дані та проєктування розвертки

Для виконання задач оптимізації, що розглянуто в розділі 2 обираємо спроєктувати розвертку для обробки отвору ∅25 мм, що застосовується на 7 переході 005 обробної з ЧПУ операції. На даному переході виконується послідовне розгортання трьох наскрізних отворів глибиною 110,5 мм кожен в деталі із сірого чавуну СЧ20. Припуск під розгортання складає 0,25 мм на сторону. Досягається 9 квалітет точності $\varnothing 25^{+0,052}$ та шорсткість Ra1,25. Матеріал розвертки – твердий сплав.

На основі проаналізованих (розділ 1) конструкцій розверток, для боротьби із огранюванням отвору вирішено проєктувати інструмент із різними кроками між зубцями.

Діаметр розвертки визначаємо за формулою:

$$D = D_O + \delta - P,$$

де: D_O – діаметр отвору, отримуваного після розгортання, мм;

δ – допуск на діаметр обробленого отвору, мм;

P – величина розбивки отвору, мм:

$$P = \frac{1}{3}\delta$$

$$P = \frac{1}{3}0{,}052 = 0{,}0173 \text{ мм}$$

$$D = 25 + 0{,}052 - 0{,}0173 = 25{,}035 \text{ мм}$$

Діаметр калібруючої частини в кінцевій точці зворотного конусу:

$$d_1 = D - \frac{1}{3}\delta$$

$$d_1 = 25{,}035 - 0{,}0173 = 25{,}018 \text{ мм}$$

Діаметр забірного конуса розвертки в початковій точці визначається за формулою:

$$d_{\text{заб}} = D - (0{,}5 \dots 1{,}0)$$

$$d_{заб} = 25{,}035 - 0{,}7 = 24{,}335 \text{ мм}$$

Кут при вершині розвертки φ=12^0.

Відповідно до стандарту [1] для розверток діаметром 22-28 мм кількість зубців $Z = 8 - 10$.

Застосовуючи критерій оптимізації Q (формула 2.11) визначаємо амплітуду огранювання для трьох стандартних розверток із рівномірним кроком зубців, що мають різну кількість зубців: 8, 9 та 10.

Також розраховуємо критерій оптимізації Q для проєктуємої розвертки у трьох варіантах кількості зубців. Умовою для розрахунку є:

- відхилення кроку від рівномірного не більше ±12%;
- розвертка повністю зрівноважена за радіальною силою, показник урівноваженості сил C = 0 (рівняння 2.16).

Результати розрахунків наведено в таблиці 4.1. За результатами розрахунків будуємо графік (рис. 4.1).

Таблиця 4.1

Результати розрахунку критерію Q

Z	Q, рівномірний крок	Q, оптимізований крок	Зменшення Q, %
8	75,0	64,6	13,9
9	75,8	66,8	11,8
10	76,4	68,4	10,5

З таблиці видно, що вигода від нерівномірного кроку за моделлю найбільша при Z = 8, а при Z ≥ 9 – зменшується зі зростанням Z. Обираємо $Z = 8$ з таких міркувань: оптимальне значення Q та простіше виготовлення та контроль діаметру інструменту порівняно із непарною кількістю зубців.



Рис. 4.1. Критерій Q для розверток із Z = 8, 9 та 10

4.2. Граничні значення колового кроку розвертки

Обмеження $\varphi_{min} \leq \varphi_j \leq \varphi_{max}$ (формула 2.15) було введено як технологічне, а умова зрівноваженості (формула 2.16) прийнята у вигляді C = 0. Нижня межа визначається тим, що на дузі між двома сусідніми зубами мають вміститися стрічка зуба (ширина f), канавка для стружки (ширина $w_к$) і запас міцності тіла зуба. Довжина дуги між зубами на діаметрі D дорівнює $\frac{\varphi_j \cdot D}{2}$, тому:

$$\varphi_{min} = \frac{2(f + w_к)}{D}$$

Верхня межа обирається з умови, щоб найбільший проміжок не збільшував стружкову канавку настільки, що зменшиться товщина тіла зуба (міцність зуба на згин) або навантаження на зуб, який іде за найбільшим проміжком, перевищить допустиме:

$$\varphi_{max} = \frac{2\pi}{Z} \cdot (1 + \delta_{доп})$$

де $\delta_{доп}$ – допустиме відносне збільшення кроку.

Для визначення $\delta_{доп}$ використовується залежність Q від допустимої нерівномірності (рис. 4.2). Умовою є те, що чим ширші межі, тим менший коефіцієнт

Q, але при цьому відбувається зростання навантаження на окремі зуби й обмеження за міцністю.

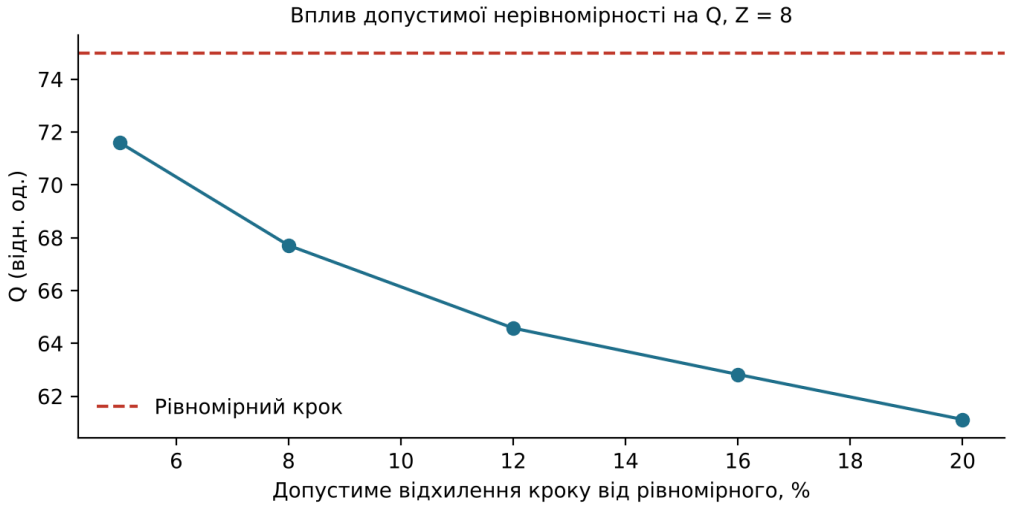


Рис. 4.2. Залежність критерію Q від допустимої нерівномірності кроку

Приймемо межі варіювання відхилення кроку від рівномірного не більше ±15%. Для Z = 8, рівномірний крок розташування зубців складає $360°/8 = 45°$. Відхилення ±15% становить: $45° \cdot 0{,}15 = \pm 6{,}75°$. Оптимальні кути для Z = 8 при ±15% представлено в таблиці 4.2 та на рисунку 4.3. Порівняльна схема кутового розташування зубців рівномірної та оптимізованої варіантів розверток наведено на рисунку 4.4.

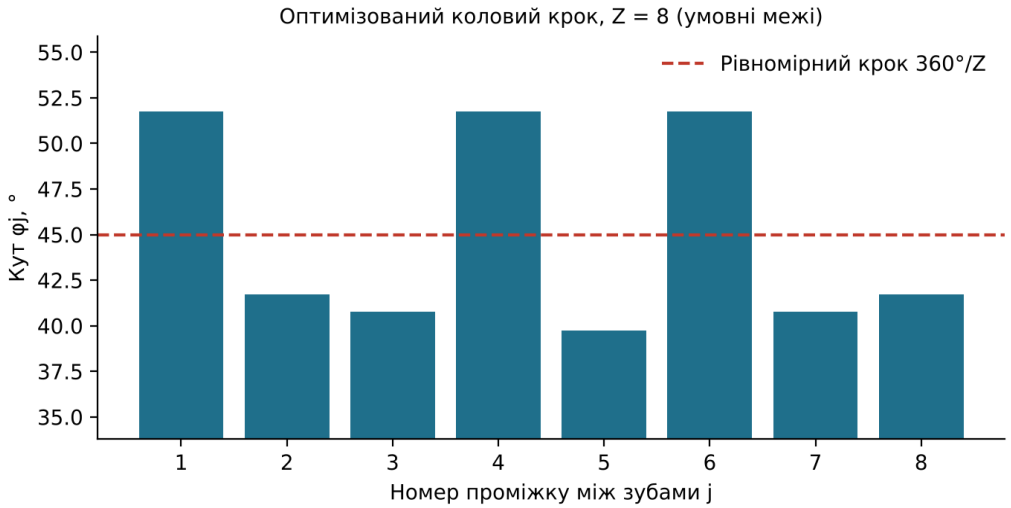


Рис. 4.3. Оптимізований коловий крок для Z = 8 при ±15%

Таблиця 4.2

Значення кутових кроків

j	1	2	3	4	5	6	7	8
φ_j	51,7	41,8	40,8	51,7	39,7	51,7	40,8	41,8
θ	0	51,7	93,5	134,3	186,0	225,7	277,3	318,2

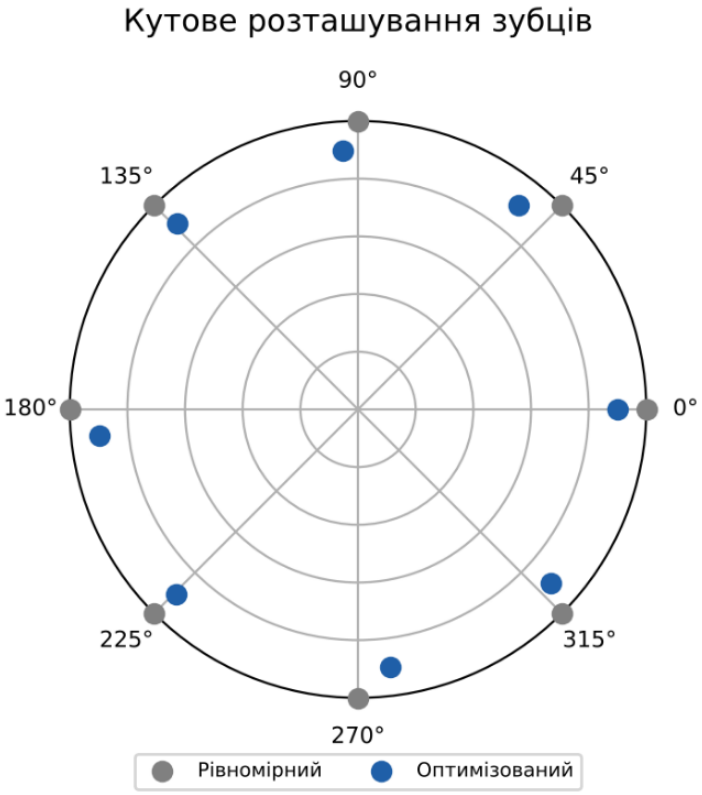


Рис. 4.4. Кутове розташування зубців, рівномірний і оптимізований варіанти (±15%)

З рисунка 4.4 видно, що таке розташування зубців робить розвертку незбалансованою, що призведе до розбивки отвору та не забезпечить виконання вимоги допуску на діаметр та допуску циліндричності, що висувається до отвору 9 деталі корпус.

Розглянемо оптимальні кути для Z = 8 при ±12 %.

$$45° \cdot 0{,}12 = \pm 5{,}4°.$$

Оптимальні кути для Z = 8 при ±12% представлено в таблиці 4.3 та на рисунку 4.5. Порівняльна схема кутового розташування зубців рівномірної та оптимізованої варіантів розверток наведено на рисунку 4.6.

Таблиця 4.3

Значення кутових кроків

j	1	2	3	4	5	6	7	8
φ_j	39,6	50,4	39,6	50,4	39,6	50,4	39,6	50,4
θ	0	39,6	90,0	129,6	180,0	219,6	270,0	309,6

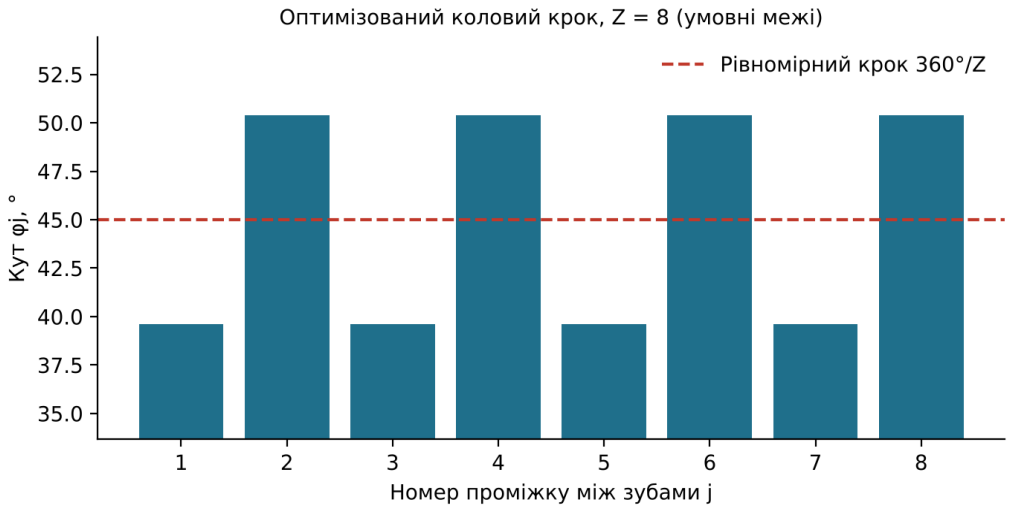


Рис. 4.5. Оптимізований коловий крок для Z = 8

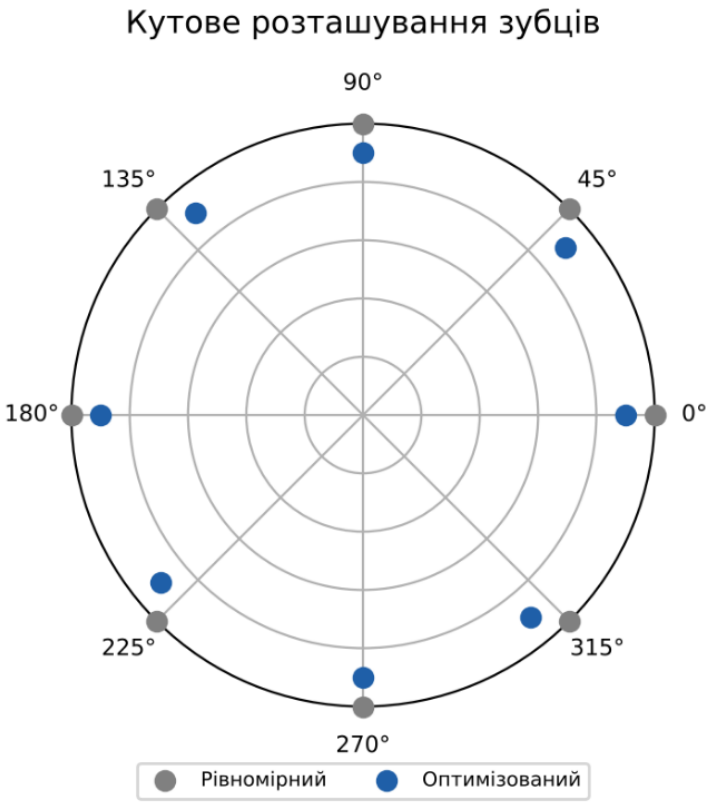


Рис. 4.6. Кутове розташування зубців, рівномірний і оптимізований варіанти (±12%)

4.3. Навантаження на зуби та міцність розвертки

Порівняння навантажень на зубці розвертки засноване на кінематиці різання. Подача s за оберт розподіляється між зубцями пропорційно кутам між ними. Зуб, що йде після проміжку φ_j, знімає шар завтовшки $h_j = \frac{s \cdot \varphi_j}{2\pi}$. За силовою моделлю (розділ 2) сила на зуб пропорційна h_j. Тому відношення сили на j-й зуб до сили в разі рівномірного кроку:

$$\lambda_j = \frac{F_{t,j}}{F_{t,\text{рів}}} = \frac{Z \cdot \varphi_j}{2\pi}$$

Для оптимізованої схеми Z = 8 із кутами 39,6° і 50,4° коефіцієнти дорівнюють

$$\lambda = 39{,}6/45 = 0{,}88 \text{ та } \lambda = 50{,}4/45 = 1{,}12.$$

Отже, найбільш навантажений зуб несе на 12 % більше за зуб при рівномірному кроці, а найменш навантажений – на 12 % менше. Сума навантажень за оберт не змінюється, оскільки $\sum \varphi_j = 2\pi$, тому середній крутний момент той самий, що й у розвертки з рівномірним кроком.

Другий підхід - обернена задача. Припустимо, що в різанні одночасно бере участь Z_p зубів на вході. Крутний момент:

$$M_{\text{кр}} = k_t \cdot t \cdot s \cdot \frac{Z_\text{p}}{Z} \cdot \frac{D}{2}$$

де t – припуск на сторону;

s – подача на оберт. Умова міцності хвостовика діаметром d_x на кручення

$$\tau = \frac{16 \cdot M_{\text{кр}}}{\pi \cdot {d_x}^3} \leq [\tau]$$

дає граничне значення питомої сили, при якій міцність ще забезпечена:

$$k_{t,\text{доп}} = \frac{\pi \cdot d^3 \cdot [\tau]}{8 \cdot t \cdot s \cdot \frac{Z_\text{p}}{Z} \cdot D}, \text{Н/мм}^2$$

де $[\tau]$ – гранична міцність матеріалу хвостовика розвертки, МПа.

Аналогічно виконуємо перевірку точності. Радіальна сила $F_r = \frac{k_r}{k_t} \cdot F_t$ згинає інструмент, і ця деформація не повинна перевищувати частки допуску діаметра. Позначимо допустиму деформацію:

$$\delta_{\text{доп,ж}} = \eta \cdot T_D$$

де η – прийнята частка допуску.

З умови

$$F_r \leq k \cdot \delta_{\text{доп,ж}},$$

отримуємо обмеження на відношення сил:

$$\frac{k_r}{k_t} \leq \frac{k \cdot \eta \cdot T_D}{F_t}$$

Результатом є вимога забезпечення жорсткості k не менше потрібної.

4.4. Жорсткість та власна частота розвертки

Рівняння руху центра інструмента (формула 2.6) описує його осциляторами де жорсткість k і маса m визначають власну частоту. Розвертку з оправкою розглянемо як консольну балку вильотом L суцільного круглого перерізу еквівалентним діаметром $d_{\text{екв}}$. Жорсткість на згин в точці прикладання сили, момент інерції та площа перерізу:

$$k = \frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3}, \qquad I = \frac{\pi \cdot d^4}{64}, \qquad A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Перша власна частота консолі (результат теорії коливань пружних тіл, коефіцієнт $1{,}875^2$ для защемленого кінця) дорівнює:

$$f_0 = \frac{(1{,}875)^2}{2\pi} \cdot \frac{d}{4} \cdot \sqrt{E / \rho} \cdot \frac{1}{L^2}$$

де E – модуль пружності першого роду (модуль Юнга);

ρ – густина матеріалу, кг/м³;

d – еквівалентний діаметр консолі (розвертка з оправкою замінюється суцільним круглим стрижнем).

З графіка залежності відносної жорсткості та власної частоти від вильоту видно, що при збільшенні вильоту на 20% жорсткість падає в $1{,}2^3 \approx 1{,}73$ рази, а частота – в $1{,}2^2 = 1{,}44$ рази. Це відображено на рисунку 4.7.

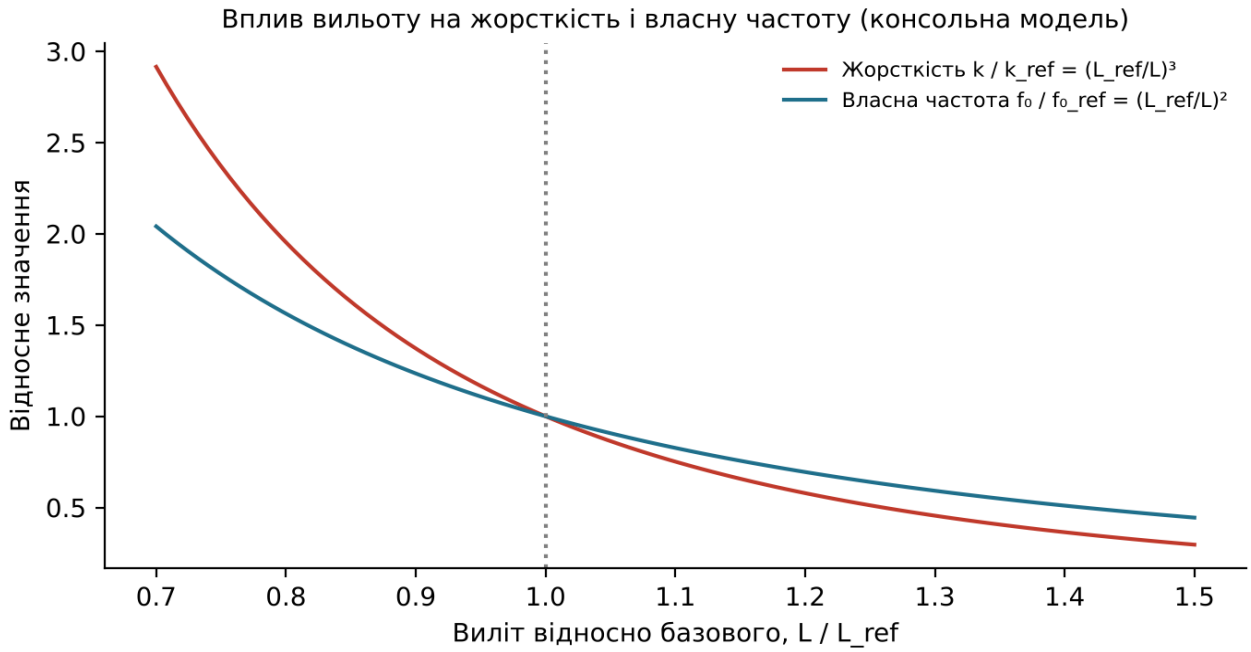


Рис. 4.7. Відносна жорсткість і власна частота залежно від вильоту

Отже, мінімальний виліт, який дозволяє конструкція та схема обробки, дає найбільшу жорсткість і найвищу власну частоту. Вибране значення L має забезпечити можливість розгортання отворів глибиною 110,5 мм.

За моделлю розділу 2 найбільше підсилення коливань відбувається на частотах $\omega_- = (Z - 1)\cdot\Omega$ та $\omega_+ = (Z + 1)\cdot\Omega$. У герцах це $(Z \mp 1)\cdot n/60$. Якщо власна частота f_0 близька до однієї з цих ліній, небезпека вібрації зростає. Введемо безрозмірну частоту обертання $\nu = n/(60\cdot f_0)$. Тоді лінії збігу з власною частотою припадають на $\nu = 1/(Z - 1)$ та $\nu = 1/(Z + 1)$, і режим слід обирати поза вікнами шириною $\pm\varepsilon$ навколо них:

$$\nu \notin \left[\frac{1 - \varepsilon}{Z \mp 1}; \frac{1 + \varepsilon}{Z \mp 1}\right]$$

Власна частота f_0 розвертки з оправкою обчислена за наближеною консольною моделлю. Запас ε має покривати цю невизначеність, якщо реальна f_0 відрізняється від розрахункової на величину в межах ε, небезпечне вікно частот обертання все одно буде враховане.

4.5. Проєктування розвертки

Вже було розраховано деякі розміри проєктуємої розвертки. Циліндрична розвертка виготовляється із сталі 40Х та має в своїй конструкції напайні пластини, що виготовлено із твердого сплаву ВК8.

Довжина забірної частини розвертки:

$$l_{\text{заб}} = \frac{D - d_{\text{заб}}}{2} ctg\ \varphi + (1 \dots 3)$$

$$l_{\text{заб}} = \frac{25{,}035\ - 24{,}335}{2} ctg\ 12° + 3 = 5 \text{ мм}$$

Довжина робочої частини розвертки:

$$l_{\text{роб}} = (0{,}8 \dots 7)D$$

$$l_{\text{роб}} = \ 2{,}6 \cdot 25 = 65 \text{ мм}$$

Нерівномірні кутові кроки зубців мають такі значення: $\varphi_1 = 39{,}6°$, $\varphi_2 = 50{,}4°$, $\varphi_3 = 39{,}6°$, $\varphi_4 = 50{,}4°$, $\varphi_5 = 39{,}6°$, $\varphi_6 = 50{,}4°$, $\varphi_7 = 39{,}6°$, $\varphi_8 = 50{,}4°$.

Передній кут зубців 2°, а задній – $\alpha = 12°$.

Стрічка калібруючої частини зубців забезпечую направлення розвертки в отворі. Також стрічка слугує для контролю інструменту по діаметру.

Ширина стрічки:

$$f = 0{,}05 \dots 0{,}3 \text{ мм}$$

Приймаємо $f = 0{,}2$ мм.

Висота зубця розвертки $h = 2{,}2$ мм;

Кут стружкової канавки $\beta = 77° \dots 90°$.

Радіус закруглення дна канавки $r = 0{,}9$ мм.

Довжина зворотного конуса калібруючої частини $l_{\text{зк}} = 5$ мм.

Діаметр в кінці калібруючої частини:

$$D_{\text{зк}} = D - (0{,}05 \dots 0{,}07)$$

$$D_{\text{зк}} = 25{,}035 - (0{,}05 \dots 0{,}07) = 25{,}035 - 0{,}05 = 24{,}985 \text{ мм}$$

Креслення розробленої розвертки представлено на рисунку 4.8.

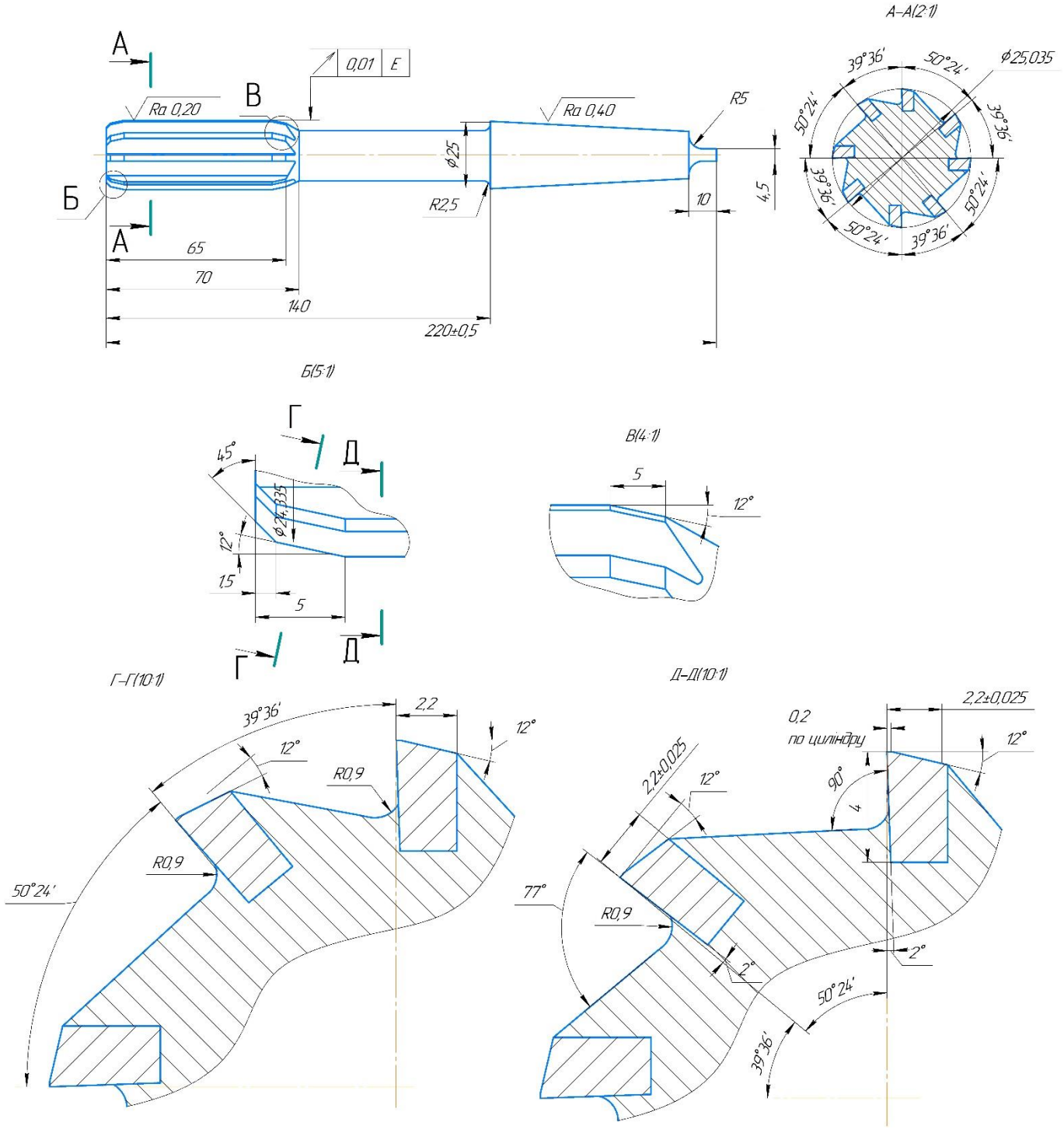


Рис. 4.8. Креслення розвертки

4.6. Висновки

Розроблено конструкцію розвертки для обробки отвору Ø25 в деталі корпус із чавуну СЧ20 за методикою розділу 2. З метою зменшення огранювання отвору спроєктовано розвертку з нерівномірним кроком між зубцями.

За критерієм Q порівняно розвертки з 8, 9 і 10 зубцями. У всіх випадках нерівномірний крок забезпечив менше значення Q, ніж рівномірний. Оптимальна кількість зубців розвертки – 8. Крок зубців обмежено ±12% порівняно із рівномірним розташуванням. Знайдено кути між зубцями, які чергуються: 39,6° і 50,4°.

Запропоновано розрахунки для оцінки міцності та жорсткості інструменту. Зазначено, як уникнути частот, при яких коливання підсилюються. Ефект від нерівномірного кроку оцінено лише за прийнятою моделлю, а випробувань розвертки не проводилось.

Розроблено конструкцію розвертки з геометрією різальної частини та кресленням.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

5.1. Розрахунок потрібної кількості обладнання та коефіцієнту його завантаження

Середній коефіцієнт завантаження робочих місць, зайнятих у виготовленні даних деталей, розраховуємо у такій послідовності.

Кількість робочих місць на операціях проектного техпроцесу деталі «кришка» визначаємо за формулою:

$$q_{p(i)} = \frac{N_з \cdot t_{шт(i)}}{F_{дрм} \cdot 60 \cdot k_в}, \tag{5.1}$$

де $t_{шт(i)}$ - штучний час i-ої операції, хв.;

$F_{дрм}$ - дійсний річний фонд часу роботи обладнання, годин;

$k_в$ - нормативний коефіцієнт виконання норм часу ($k_в$ = 1,0-1,1 [2, с. 4]).

На операції 005 техпроцесу обробки деталі:

$$q_{p(005)} = \frac{10000 \cdot 2,28}{3890 \cdot 60 \cdot 1,0} = 0,098$$

Аналогічно виконані розрахунки по інших операціях техпроцесів зведемо до табл. 5.1.

Коефіцієнт завантаження обладнання по кожній детале-операції:

$$\eta_{з(i)} = \frac{q_{p(i)}}{q_{пр(i)}} \tag{5.2}$$

$$\eta_{з(005)} = \frac{0,098}{1} = 0,098$$

Середній коефіцієнт завантаження робочих місць на усіх операціях технологічного процесу виготовлення деталі:

$$\overline{\eta}_з = \frac{\sum_{i=1}^{m} q_{p(i)}}{\sum_{i=1}^{m} q_{пр(i)}} = \frac{0,514}{2} = 0,26 \tag{5.3}$$

де $q_{пр(i)}$ - прийнята (ціла) кількість робочих місць;

m - кількість операцій технологічного процесу.

Таблиця 5.1

Розрахунок завантаження обладнання

№ опер.	Найменування операції	$t_{шт}$, хв.	Кількість обладнання		$\eta_з$	$\overline{\eta}_з$
			q_p	$q_{пр}$		
005	Обробна з ЧПУ	2,28	0,098	1	0,098	0,26
010	Обробна з ЧПУ	9,71	0,416	1	0,416	
	Всього	11,99	0,514	2	0,514	

Середній коефіцієнт завантаження по цеху $\overline{\eta}_з$ =0,26, що відповідає великосерійному типу виробництва (ВС) [2, дод. 1].

5.2. Розрахунок календарно-планових нормативів

До календарно-планових нормативів серійного виробництва належать: розмір партії деталей; кількість запусків партії деталей; періодичність (ритм) запуску-випуску партії деталей; тривалість операційних та технологічного циклів обробки деталі; розмір циклового запасу деталей.

Розмір партії деталей розраховуємо у два етапи: спочатку визначимо розрахунковий розмір партії, а потім цю величину скорегуємо з урахуванням виробничих умов.

Для визначення розрахункового розміру партії деталей n_p скористаємося методом [2, с. 5], який застосовується тоді, коли в технологічному процесі відсутні трудомісткі за переналагоджуванням операції (тобто підготовчо-заключний час не перевищує 30 хв.). Щоб не допускати частих переналагоджувань обладнання, час виготовлення партії деталей на найбільш продуктивній операції не повинен бути меншим, ніж половина зміни. Тобто:

$$n_p = \frac{0,5 \cdot F_{зм}}{t_{шт}^{\min}}, \qquad (5.4)$$

де $F_{зм}$ – дійсний фонд часу зміни (440 хв.)

$t_{шт}^{\min}$ – штучний час найбільш продуктивної операції:

$$n_p = \frac{0,5 \cdot 440}{2,28} = 97 \text{ шт.}$$

Для спрощення планування та обліку, партія деталей повинна укладатися в річну програму запуску ціле число разів. Тому, після визначення розрахункової *кількості партій* протягом року за формулою:

$$A_p = \frac{N_з}{n_p} = \frac{10000}{97} \approx 103, \tag{5.5}$$

визначимо фактичну кількість партій ($A_ф$) шляхом підбору найближчого до A_p цілого значення з уніфікованого ряду: 1, 2, 4, 8, 12, 18, 24, 36, 48, 52, 104, 250, і скорегуємо, відповідно до отриманого значення $A_ф$, розмір партії деталей: $A_ф = 104$.

$$n_{пр} = \frac{10000}{104} = 96 \text{ шт.} \tag{5.6}$$

Періодичність (ритм) запуску-випуску партій деталей:

$$R_з = \frac{253}{96} = 2,6 \text{ роб. дні} \tag{5.7}$$

де $T_р$ - кількість робочих днів протягом року.

Тривалість багатоопераційного виробничого циклу виготовлення партії деталей залежить від тривалості операційних циклів, способу їхнього сполучення у часі (прийнятого виду руху партії деталей) та часу межопераційних перерв.

Тривалість операційного циклу:

$$T_{o(i)} = \frac{n_{пр} \cdot t_{к-д(i)}}{S \cdot F_{зм.д}}, \tag{5.8}$$

де $n_{пр}$ - остаточно прийнятий розмір партії деталей, шт.;

$t_{к-д(i)}$ – калькуляційно-дійсний час на даній детале-операції, хв.

$$t_{к-д(i)} = \frac{t_{шт(i)}}{k_в \cdot p_{т(i)} \cdot q_{пр(i)}} + \frac{t_{п-з(i)}}{n_{пр}}, \tag{5.9}$$

де $k_в$ - коефіцієнт виконання норм на даній операції;

$p_{т(i)}$ - технологічна партія деталей (кількість деталей, що одночасно оброблюються в багатопозиційному пристосуванні), шт.

$q_{пр(i)}$ - кількість робочих місць, які працюють на даній операції паралельно.

Наприклад, для першої операції техпроцесу:

$$t_{к-д(005)} = \frac{2,28}{1,0 \cdot 1 \cdot 1} + \frac{25}{96} = 2,540 \text{ хв.}$$

$$T_{о(005)} = \frac{96 \cdot 2,54}{2 \cdot 440} = 0,28 \text{ дн.}$$

Результати розрахунків $t_{к-д(і)}$ і $T_{о(і)}$ зведемо до табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Розрахунок тривалості циклу

№ опер.	Найменування операції	$t_{шт}$, хв.	$t_{п-з}$, хв.	$t_{к-д}$, хв.	$T_о$, днів	$t_{мо}$, днів
005	Обробна з ЧПУ	2,28	25	2,540	0,28	0,17
010	Обробна з ЧПУ	9,71	25	9,970	1,09	0,17
	Всього	11,99	-	12,510	1,37	0,34

Для даної партії деталей може бути обраний послідовний рух, який рекомендується приймати при груповому розташуванні обладнання, невеликій масі деталей та тривалості операційних циклів, що в середньому не перевищують два дні.

Тривалість виробничого циклу визначаємо за формулою:

$$T_n = \sum_{i=1}^{m} T_{o_i} + \sum_{i=1}^{m} t_{мо} = 1,37 + 0,34 = 1,71 \text{ днів}, \quad (5.10)$$

де $t_{мо}$ - час міжопераційної перерви, днів.

$$t_{мо} = \frac{(0,25...0,8) \cdot \sum_{i=1}^{m} T_{o_i}}{m} = \frac{0,25 \cdot 1,37}{2} = 0,17 \text{ дні}, \quad (5.11)$$

Середній розмір *циклового запасу* деталей визначається за формулою:

$$З_ц = \frac{n_{пр} \cdot T_ц}{R_з} = \frac{96 \cdot 1,71}{2,6} = 63 \text{ шт.}, \quad (5.12)$$

де $T_ц$ - тривалість виробничого циклу виготовлення партії деталей, дн.

Визначення чисельності основних робітників цеху

До основних належать робітники, безпосередньо зайняті виконанням технологічних операцій. Їх чисельність у серійному виробництві визначається за формулою:

$$R_o = \frac{T_p}{F_{др}}, \tag{5.13}$$

де T_p - трудомісткість річної виробничої програми, нормо-годин.

$$T_p = N_з \cdot \frac{\sum_{i=1}^{m} t_{шт_i}}{60} \cdot K_{дов} \cdot (1 + 0,01 \cdot d), \tag{5.14}$$

де $K_{дов}$ - коефіцієнт довантаження обладнання до нормативного ($\eta_{зн}$) для даного типу виробництва [2, дод. Д1]:

$$K_{дов} = \frac{\eta_{зн}}{\bar{\eta}} = \frac{0,8}{0,26} = 3,1 \tag{5.15}$$

d - процент додаткових робіт, непередбачених технологічним процесом (виправлення браку, доробка, комплектація тощо), d=15...20% [2, с. 8];

$F_{др}$ - дійсний річний фонд часу роботи одного робітника, год. (залежить від номінального фонду часу поточного року $F_н$, зменшеного на процент невиходів на роботу з поважних причин $C_н$ (8...10%)):

$$F_{др} = F_н \cdot (1 - 0,01 \cdot C_н) = 2000 \cdot (1 - 0,01 \cdot 8) = 1840 \text{ год.}, \tag{5.16}$$

$$T_{р.пр} = 10000 \cdot \frac{11,99}{60} \cdot 3,1 \cdot (1 + 0,01 \cdot 20) = 7434,0 \text{ нормо-год.}$$

$$R_{о.пр} = \frac{7434}{1840} = 4 \text{ особи.}$$

Порівняємо розраховані показники з відповідними показниками базового варіанту техпроцесу:

$$T_{р.пр} = 10000 \cdot \frac{13,436}{60} \cdot 14,3 \cdot (1 + 0,01 \cdot 20) = 38427,0 \text{ нормо-год.}$$

$$R_{о.баз} = \frac{38427}{1840} = 21 \text{ осіб.}$$

5.3. Аналіз варіантів технологічного процесу

Для визначення доцільності впровадження запропонованого варіанту техпроцесу механічної обробки деталі «золотник», проведемо його економічний аналіз шляхом

визначення та порівняння технологічної собівартості виготовлення деталі по кожному з альтернативних варіантів:

$$C_{тех} = V \cdot N_з + P, \tag{5.17}$$

де V – змінні витрати у технологічній собівартості, величина яких змінюється пропорційно зміні обсягу випуску продукції, грн/рік.

P – постійні витрати, величина яких не змінюється або змінюється неістотно в залежності від зміни річного випуску продукції грн/рік.

При цьому, аналізувати та порівнювати доцільно лише ті операції та статті витрат, які відрізняються у базовому та проєктному техпроцесах (табл. 5.3).

Таблиця 5.3

Характеристика змін при обробці деталі «золотник»

Номер опер.	Базовий варіант		Номер опер	Проектний варіант	
	Модель обладнання	$t_{шт}$, хв.		Модель обладнання	$t_{шт}$, хв.
005, 090	Радіально-свердлильний 2М55	1,164	005-010	Обробний центр з ЧПУ Sigma Flexi 5-AX	11,99
010, 080, 085	Вертикально-фрезер-ний консольний 6Р13	1,907			
015	Вертикально-свердлильний 2Н150	0,305			
020, 025	Горизонтально-розточувальний 2620В	8,72			
030, 035	Вертикально-свердлильний 2Н135	1,34			
	Всього	13,436		Всього	11,99

5.3.1. Розрахунок змінних витрат

За поелементним методом розрахунку змінні витрати визначаються за формулою:

$$V = M_o + З_{одв} + E_c + B_р + B_{мд} + B_{ін.ун} + B_{пр.ун} + B_{ам.у} + B_{еп}, \tag{5.18}$$

де M_o – вартість основних матеріалів (не розраховуються, оскільки не змінюються в порівнюваних варіантах), грн;

$З_{одв}$ – заробітна плата виробничих робітників основна, додаткова з урахуванням єдиного соціального внеску, грн;

$Е_с$ – витрати на електроенергію силову, грн;

$В_р$ – витрати на ремонт обладнання, грн;

$В_{мд}$ – витрати на матеріали допоміжні, грн;

$В_{ін.ун}$ – витрати на експлуатацію універсального ріжучого інструменту, грн;

$В_{ам.у}$ – витрати на амортизацію універсального обладнання, грн;

$В_{еп}$ – витрати на експлуатацію приміщень, грн.

Витрати на заробітну плату основну, додаткову з урахуванням єдиного соціального внеску:

$$З_{одв} = С_{г(і)} \cdot \frac{t_{шт(і)}}{60} \cdot К_{дс}, \qquad (5.19)$$

де $С_{г(і)}$ – годинна тарифна ставка відповідного розряду $і$-тої операції техпроцесу, грн./год.;

$t_{шт(і)}$ - штучний час $і$-тої операції, хв.;

$К_{дс}$ = 1,342 – коефіцієнт, який враховує додаткову заробітну плату та відрахування на соціальні потреби (єдиний соціальний внесок ЄСВ).

Наприклад, для операцій 005 проєктного техпроцесу:

$$З_{одв.пр(005)} = 127,847 \cdot \frac{11,99}{60} \cdot 1,342 = 34,286$$

Розрахунок витрат на заробітну плату зведемо до табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Розрахунок витрат на заробітну плату

Базовий варіант					Проектний варіант		
Номер операції	Роз-ряд	$С_{г(і)}$, грн/год	$t_{шт}$, хв.	$З_{одв.баз}$, грн	Номер операції	$t_{шт}$, хв.	$З_{одв.баз}$, грн
005-015,030-090	3	115,062	4,716	12,137	-	-	-
020,025	4	127,847	8,720	24,935	005,010	11,99	34,286
Всього	-	-	13,436	37,072	Всього	11,99	34,286

Наступні статті витрат пов’язано з утриманням та експлуатацією обладнання. Його характеристики зведено до табл. 6.3.

Таблиця 5.5

Характеристика обладнання

Модель обладнання	Габаритні розміри: довжина × ширина, м	Потужість електро-двигунів верстата, кВт	Група ремонтної складності механічної/електричної частини, УРО	Площа в плані $S_{од}$, м^2	Ціна, тис. грн.
Базовий варіант					
2М55	2,665×1,031	4,5	12/9	2,748	425,5
6Р13	2,570×2,252	11,0	15/7,5	5,788	220,0
2Н150	0,900×1,050	7,5	10/5	0,945	165,0
2620В	5,700×3,500	10,0	24/45	19,950	460,5
2Н135	0,825×1,031	4,0	8/2	0,851	128,1
Проектний варіант					
Sigma Flexi 5-AX	4,100×3,400	27,0	20/18	13,940	3937,0

Витрати на електроенергію силову:

$$E_c = \frac{N_в \cdot K_o \cdot K_N \cdot K_д}{\eta_в \cdot \eta_м} \cdot \frac{t_{шт}}{60} \cdot Ц_{ел}, \qquad (5.20)$$

де $N_в$ – встановлена потужність електродвигунів обладнання, кВт;

K_o – коефіцієнт одночасної роботи двигунів, K_o=0,65...0,8;

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (приймається у розмірі 0,4…0,5 – для розточувальних верстатів; 0,5…0,6 – для свердлильних верстатів; 0,6…0,7 – для фрезерних верстатів; 0,7…0,8 – для обробних центрів);

$K_д$ – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за часом, $K_д$=0,3...0,5;

$\eta_в$ – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі, $\eta_в$=0,92…0,96;

$\eta_м$ – ККД електродвигунів, $\eta_м$=0,86…0,9;

$Ц_{ел}$ – ціна 1 кВт-год електроенергії без ПДВ, грн.

Наприклад, для операцій 005 проєктного техпроцесу:

$$E_{с.пр(005)} = \frac{27 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,5}{0,95 \cdot 0,88} \cdot \frac{11,99}{60} \cdot 10,13 = 13,729 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконані розрахунки за іншими операціями зведемо до табл. 5.6.

Таблиця 5.6

Розрахунок витрат на електроенергію

Базовий варіант					Проектний варіант				
Обладн.	$N_в$, кВт	K_N	$t_{шт}$, хв.	$E_{с.баз}$, грн	Обладн.	$N_в$, кВт	K_N	$t_{шт}$, хв.	$E_{с.пр}$, грн.
2М55	4,5	0,6	1,164	0,190	Sigma	27,0	0,7	11,99	13,729
6Р13	11,0	0,7	1,907	0,890					
2Н150	7,5	0,6	0,305	0,083					
2620В	10,0	0,5	8,72	2,642					
2Н135	4,0	0,6	1,34	0,195					
Всього	-	-	13,436	4,000	Всього	-	-	11,99	13,729

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_р = \frac{W_м \cdot R_м + W_е \cdot R_е}{F_{дрм}} \cdot \frac{t_{шт}}{60}, \qquad (5.21)$$

де $W_м$, $W_е$ – витрати на всі види ремонту та обслуговування за ремонтний цикл, які припадають на одиницю ремонтної складності, відповідно механічної та електричної частини обладнання, грн.;

$R_м$, $R_е$ – категорія ремонтної складності відповідно механічної та електричної частин обладнання, УРО;

$F_{дрм}$ – дійсний річний фонд часу роботи обладнання, год.

$$B_{р.пр(005)} = \frac{980 \cdot 20 + 850 \cdot 18}{3890} \cdot \frac{11,99}{60} = 1,793 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконані розрахунки за іншими операціями зведемо до табл. 5.7.

Таблиця 5.7

Розрахунок витрат на ремонт обладнання

Базовий варіант					Проектний варіант				
Обладн.	$W_м$, УРО	$W_е$, УРО	$t_{шт}$, хв.	$B_{р.баз}$, грн.	Обладн.	$W_м$, УРО	$W_е$, УРО	$t_{шт}$, хв.	$B_{р.пр}$, грн.
2М55	12	9	1,164	0,097	Sigma	20	18	11,99	1,793
6Р13	15	7,5	1,907	0,172					
2Н150	10	5	0,305	0,018					
2620В	24	45	8,72	2,308					
2Н135	8	2	1,34	0,055					
Всього	-	-	13,436	2,650	Всього	-	-	14,65	1,793

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{мд} = \frac{M_{гв} \cdot R_{м} \cdot t_{шт}}{100 \cdot 60} \cdot K_{в}, \quad (5.22)$$

де $M_{гв}$ – годинні витрати на допоміжні матеріали, коп.;

$K_{в}$ – коефіцієнт, який враховує тип виробництва (для ВС $K_{в}$ = 1,1).

$$B_{мд.пр(005)} = \frac{79,5 \cdot 20 \cdot 11,99}{100 \cdot 60} \cdot 1,1 = 3,495 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконані розрахунки за іншими операціями зведемо до табл. 5.8.

Таблиця 5.8

Розрахунок витрат на допоміжні матеріали

Базовий варіант				Проектний варіант			
Обладн.	$W_{м}$, УРО	$t_{шт}$, хв.	$B_{мд.баз}$, грн.	Обладн.	$W_{м}$, УРО	$t_{шт}$, хв.	$B_{мд.пр}$, грн.
2М55	12	1,164	0,204	Sigma	20	11,99	3,495
6Р13	15	1,907	0,417				
2Н150	10	0,305	0,044				
2620В	24	8,72	3,050				
2Н135	8	1,34	0,156				
Всього	-	13,436	3,871	Всього	-	11,99	3,495

Витрати на амортизацію універсального обладнання:

$$B_{ам} = \frac{Ф_{бал} \cdot H_{а} \cdot t_{шт}}{F_{дрм} \cdot 60 \cdot 100 \cdot \eta_{зн}}, \quad (5.23)$$

де $Ф_{бал}$ – балансова вартість одиниці обладнання, грн.

$$Ф_{бал} = Ц_{опт} \cdot K_{тмф}, \quad (5.24)$$

де $Ц_{опт}$ – оптова ціна обладнання, грн.;

$K_{тмф}$ – коефіцієнт, який враховує витрати на транспортування обладнання (0,05...0,1), його монтаж (0,04...0,06), улаштування фундаменту (0,02...0,08);

$H_{а}$ – норма амортизації на реновацію, %.

$$B_{ам.пр(005)} = \frac{4370070 \cdot 20 \cdot 11,99}{3890 \cdot 60 \cdot 100 \cdot 0,8} = 24,719 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконані розрахунки за іншими операціями зведемо до табл. 5.9.

Таблиця 5.9

Розрахунок витрат на амортизацію обладнання

Базовий варіант					Проектний варіант				
Обладн.	$Ц_{опт}$, тис. грн	$Ф_{бал}$, тис. грн	$t_{шт}$, хв	$В_{ам.баз}$, грн.	Обладн.	$Ц_{опт}$, тис. грн	$Ф_{бал}$, тис грн	$t_{шт}$, хв.	$В_{ам.пр}$, грн.
2М55	425,5	506,345	1,164	0,631	Sigma	3937,0	4370,07	11,99	56,123
6Р13	220,0	261,8	1,907	0,535					
2Н150	165,0	196,35	0,305	0,064					
2620В	460,5	547,995	8,72	5,118					
2Н135	128,1	152,439	1,34	0,219					
Всього	-	-	13,436	6,567	Всього	-	4370,07	11,99	56,123

Витрати на експлуатацію приміщення:

$$B_{еп} = \frac{S_{од} \cdot k_f \cdot C}{F_{дрм} \cdot \eta_{зн}} \cdot \frac{t_{шт}}{60}, \qquad (5.25)$$

де $S_{од}$ – площа в плані, яку займає одиниця обладнання, м^2;

k_f – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (проходи, проїзди, транспортно-складскі приміщення) [2, табл. 4].

C – річні витрати, пов'язані з експлуатацією 1м^2 виробничого приміщення, грн.

$$B_{еп.пр(005)} = \frac{27,88 \cdot 780}{3890 \cdot 0,8} \cdot \frac{11,99}{60} = 0,453 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконані розрахунки за іншими операціями зведемо до табл. 5.10.

Таблиця 5.10

Розрахунок витрат на утримання приміщення

Базовий варіант						Проектний варіант					
Обладн.	$S_{од}$, м^2	k_f	$S_{од} \times k_f$ м^2	$t_{шт}$, хв.	$В_{еп.баз}$, грн.	Обладн.	$S_{од}$, м^2	k_f	$S_{од} \times k_f$, м^2	$t_{шт}$, хв.	$В_{еп.пр}$, грн.
2М55	2,748	3,5	9,618	1,164	0,047	Sigma	13,94	2,0	27,88	11,99	1,396
6Р13	5,788	3,0	17,364	1,907	0,138						
2Н150	0,945	4,0	3,78	0,305	0,005						
2620В	19,95	2,0	39,9	8,72	1,453						
2Н135	0,851	4,0	3,404	1,34	0,019						
Всього	-	-	123,77	13,436	1,662	Всього	-	-	27,88	11,99	1,396

5.3.2. Розрахунок постійних витрат

За поелементним методом розрахунку постійні витрати включають:

$$P = B_{нал} + B_{сп.осн} + B_{ам.сп} + B_{пр}\,, \qquad (5.26)$$

де $B_{нал}$ – витрати на налагодження обладнання, грн;

$B_{сп.осн}$ – витрати на експлуатацію спеціального оснащення, грн (у порівнюваних варіантах відсутні), грн;

$B_{ам.сп}$ – витрати на амортизацію спеціального обладнання (у порівнюваних варіантах відсутні), грн;

$B_{пр}$ – витрати на створення програмного забезпечення верстату з ЧПУ (в проєктному варіанті ПЗ для верстатів з ЧПУ входить до їхньої вартості), грн.

Витрати на налагодження обладнання:

$$B_{нал} = C_{гн} \cdot \frac{t_{п-з}}{60} \cdot K_{дс} \cdot A\,, \qquad (5.27)$$

де $C_{гн}$ – годинна тарифна ставка наладчика відповідного розряду грн./год.;

$t_{п-з}$ – підготовчо-заключний час даної операції, хв.;

A – кількість партій, що відповідає кількості переналагоджень за рік.

$$B_{нал.баз} = \frac{170,464 \cdot 18 \cdot 2 + 144,892 \cdot (12 \cdot 5 + 14 \cdot 2 + 15)}{60} \cdot 1,342 \cdot 12 = 5652,60 \text{ грн.}$$

$$B_{нал.пр} = \frac{170,464 \cdot 25 \cdot 2}{60} \cdot 1,342 \cdot 104 = 19826,10 \text{ грн.}$$

5.3.3. Розрахунок технологічної собівартості

Усі виконані розрахунки змінних та постійних витрат, а також розрахунок технологічної собівартості зведемо до табл. 5.11.

Технологічна собівартість:

$$C_{тех.баз} = 32,186 \cdot 10000 + 5652,60 = 327513 \text{ грн.}$$

$$C_{тех.пр} = 110,822 \cdot 10000 + 19826,10 = 1128046 \text{ грн.}$$

За критерієм мінімуму технологічної собівартості більш ефективним для заданої програми запуску деталей «корпус» $N_з$=10000 шт. є базовий варіант технологічного процесу механічної обробки даної деталі.

Таблиця 5.11

Розрахунок технологічної собівартості

№ з/п	Статті витрат	Витрати, грн.	
		Базовий	Проект
1.	*Змінні витрати V*		
1.1	Заробітна плата виробничих робітників основна, додаткова з єдиним соціальним внеском	13,436	34,286
1.2	Електроенергія силова	4,000	13,729
1.3	Ремонт обладнання	2,650	1,793
1.4	Матеріали допоміжні	3,871	3,495
1.5	Амортизація універсального обладнання	6,567	56,123
1.6	Експлуатація приміщень	1,662	1,396
	Всього змінних витрат	32,186	110,822
2.	*Постійні витрати P*		
2.1	Налагодження обладнання	5652,60	19826,10
	Технологічна собівартість річного випуску деталей	327513	1128046

5.3.4. Розрахунок показників економічної ефективності проектного варіанту технологічного процесу

Річний економічний ефект від застосування варіанту технологічного процесу визначається як різниця приведених витрат за порівнюваними варіантами $B_{пр(і)}$:

$$E_р = B_{пр.баз} - B_{пр.пр} = \left(C_{тех.баз} + E_н \cdot K_{баз}\right) - \left(C_{тех.пр} + E_н \cdot K_{пр}\right), \quad (5.28)$$

де $E_н$ – нормативний коефіцієнт порівняльної економічної ефективності капітальних вкладень;

$K_{баз}$, $K_{пр}$ – відповідно капітальні вкладення базового і проектного варіантів техпроцесу, грн.

Капітальні вкладення по кожному варіанту складаються із вкладень в обладнання $Ф_{бал}$ (табл. 6.6), оснащення $B_{осн}$ (вважаємо, що вартість оснащення входить до вартості обладнання), а також у приміщення, яке це обладнання займає $K_{буд}$, скореговані на коефіцієнт завантаження обладнання тих детале-операцій, які відрізняються у порівнюваних варіантах:

$$K = \left(Ф_{бал} + B_{осн} + K_{буд}\right) \cdot \eta_{з_і}, \quad (5.29)$$

Капітальні вкладення в будівлі розраховуємо за формулою:

$$K_{буд} = S_{од} \cdot K_f \cdot q_{пр} \cdot h \cdot Ц_{буд}, \quad (5.30)$$

де h - висота приміщення цеху, м;

$Ц_{буд}$ – ціна 1м^2 виробничої площі висотою 8-10 м, грн./м^3.

$$K_{буд.баз} = (9,618 \cdot 2 + 17,364 \cdot 3 + 3,78 + 39,9 \cdot 2 + 3,404 \cdot 2) \cdot 8 \cdot 5500 = 7115504 \text{ грн.}$$

$$K_{буд.пр} = 27,88 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 5500 = 2453440 \text{ грн.}$$

Балансова вартість обладнання (табл. 5.9):

$$Ф_{бал.баз} = (506345 \cdot 2 + 261800 \cdot 3 + 196350 + 547995 \cdot 2 + 152439 \cdot 2 = 3395308 \text{ грн.}$$

$$Ф_{бал.пр} = 4370070 \cdot 2 = 8740140 \text{ грн.}$$

$$K_{баз} = (7115504 + 3395308) \cdot 0,056 = 591387 \text{ грн.}$$

$$K_{пр} = (2453440 + 8740140) \cdot 0,26 = 2910331 \text{ грн.}$$

Вищенаведені розрахунки показують, що і технологічна собівартість проєктного варіанту, і капітальні витрати, необхідні для його впровадження перевищують відповідні показники базового варіанту, що свідчить про від‘ємне значення річного економічного ефекту. Тому доцільно обмежитися розрахунком приведених витрат за варіантами:

$$B_{пр.баз} = 327513 + 0,16 \cdot 591387 = 422135 \text{ грн;}$$

$$B_{пр.пр} = 1128046 + 0,16 \cdot 2910331 = 1593699 \text{ грн.}$$

Висновок: впровадження запропонованого технологічного процесу впливає на збільшення технологічної собівартості виготовлення деталі та потребує значних капітальних вкладенньь на придбання нового обладнання, що впливає на від’ємне значення економічного ефекту. Проте в базовому варіанті для розрахунку узято середні ціни верстатів, які були у використанні, оскільки їхні нові зразки наразі не випускаються. Придбання підприємством на вторинному ринку такого фізично та морально зношеного обладнання мало б свої негативні наслідки, а саме: збільшення потреби в робочій сили, а отже витрат на заробітну плату, а також витрат на його утримання і ремонт, зростання браку виготовлюваної продукції, необхідність їх скорішої заміни через неможливість подальшої експлуатації таке інше. Таким чином,

впровадження проєктного варіанту техпроцесу було б правильним рішенням для підприємства.

Зниження трудомісткості виготовлення деталі при впровадженні проектного варіанту техпроцесу (у відсотках) розраховуємо за формулою:

$$\Delta T_p = \frac{\sum_{i=1}^{m} t_{шт(i)}^{баз}}{\sum_{i=1}^{m} t_{шт(i)}^{пр}} \cdot 100 - 100 = \frac{13,436}{11,99} \cdot 100 - 100 = 12,1\%, \quad (5.31)$$

5.4. Розрахунок планової цехової собівартості деталі

Цехова собівартість виготовлення деталей визначається як сума калькуляційних статей витрат:

$$C_{цех} = M_o + З_{од} + B_c + B_{ін} + B_o + B_ц, \quad (5.32)$$

де M_o - вартість основних матеріалів, грн.:

$З_{од}$ - основна та додаткова заробітна плата основних виробничих робітників, грн.;

B_c - відрахування на соціальні потреби (єдиний соціальний внесок), грн.;

$B_{ін}$ - витрати на експлуатацію спеціального оснащення, грн.;

B_o - витрати на утримання та експлуатацію обладнання, грн.;

$B_ц$ - цехові витрати, грн.

Вартість основних матеріалів:

$$M_o = a_p \cdot Ц_м \cdot K_{тр} - a_в \cdot Ц_в, \quad (5.33)$$

де a_p - норма витрат матеріалу на деталь (чавун СЧ20), кг;

$Ц_м$ - ціна матеріалу, грн./кг.;

$K_{тр}$ - коефіцієнт, який враховує транспортно-заготівельні витрати, витрати на зберігання матеріалів (приймається у розмірі 1,05...1,08);

$a_в$ - маса відходів, кг.;

$Ц_в$ - ціна відходів, грн./кг.

$$M_o = 10,2 \cdot 93,00 \cdot 1,05 - (10,2 - 8,82) \cdot 9,00 = 983,610 \text{ грн.};$$

Заробітна плата основна й додаткова виробничих робітників:

$$З_{од} = P_в\left(1 + K_д\right), \tag{5.34}$$

де $P_в$ - відрядний розцінок на деталь (основна зарплата), що визначається, як сума операційних розцінок $P_{оп(і)}$:

$$P_в = \sum_1^m P_{оп_i} = \sum_1^m \frac{e^в_{год_i} \cdot t_{шт-к_i}}{60}, \tag{5.35}$$

де $e^в_{годі}$ - годинна тарифна ставка відрядника відповідного розряду роботи *і*-ої операції технологічного процесу, грн./год.;

$t_{шт-кі}$ - штучно-калькуляційний час *і*-ої операції технологічного процесу, хв.:

$n_{пр}$ – розмір партії деталей, шт.

На першій операції техпроцесу обробки деталі:

$$P_{оп(005)} = 127,847 \cdot \frac{2,540}{60} = 5,412 \text{ грн./шт.}$$

Розрахунок відрядної розцінки на деталь зведемо до табл. 5.12.

Таблиця 5.12

Розрахунок відрядної розцінки на деталь

№ оп.	Найменування операції	$t_{шт-к}$, хв.	Розряд	Годинна тарифна ставка, грн./год.	Розцінка на деталь, грн.
005	Обробна з ЧПУ	2,540	4	127,847	5,412
010	Обробна з ЧПУ	9,970	4	127,847	21,244
	Всього	12,510	–	–	26,656

$$З_{од} = 26,656 \cdot \left(1 + 0,1\right) = 29,322 \text{ грн.}$$

Відрахування на соціальні потреби виробничих робітників:

$$B_c = З_{од} \cdot \frac{K_c}{100}, \tag{5.36}$$

де K_c - відсоток єдиного соціального внеску.

$$B_c = 29,322 \cdot \frac{22}{100} = 6,451 \text{ грн.}$$

Витрати на експлуатацію спеціального оснащення, що припадають на одну деталь, складають 40-55 грн. на одну нормо-годину трудомісткості виготовлення деталі (менше значення відповідає ДС, більше – ВС).

$$B_{осн} = 55 \cdot \frac{11,99}{60} = 10,991 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання і експлуатацію обладнання:

$$B_o = З_o \cdot \frac{П_{во}}{100}, \quad (5.37)$$

де $П_{во}$ - процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання;

$З_o$ - основна заробітна плата за виготовлення деталі, грн.

$$B_o = 26,656 \cdot \frac{320}{100} = 85,011 \text{ грн.}$$

Загальноцехові витрати в собівартості деталі:

$$B_ц = З_o \cdot \frac{П_ц}{100}, \quad (5.38)$$

де $П_ц$ – процент цехових витрат.

$$B_ц = 26,656 \cdot \frac{240}{100} = 63,758 \text{ грн.}$$

Калькуляцію цехової собівартості деталей зведено до табл. 5.13.

Таблиця 5.13

Калькуляція цехової собівартості виготовлення деталі

№ з/п	Найменування статей	Витрати, грн.
1.	Матеріали основні з відрахуванням зворотних відходів	983,610
2.	Основна заробітна плата виробничих робітників	26,656
3.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	2,666
4.	Відрахування у соціальні фонди	6,451
5.	Експлуатація спеціального оснащення	10,991
6.	Витрати на утримання і експлуатацію обладнання	85,011
7.	Цехові витрати	63,758
8.	Всього цехова собівартість $С_ц$	1179,143

5.5. Планування підсумкових техніко-економічних показників

Крім показників, розрахованих у попередніх розділах дипломної роботи, слід додатково визначити такі:

- виробіток продукції на одного робітника:

$$B_n = \frac{T_p}{R_o} = \frac{7434}{2} = 1858,5 \text{ нормо-год./ос.,} \quad (5.39)$$

де T_p – трудомісткість річної виробничої програми цеху, нормо-год.;

R_o – чисельність основних робітників цеху, осіб.

- зарплатомісткість продукції:

$$З_{зп} = \frac{З_{од}}{C_ц} \cdot 100, \quad (5.40)$$

де $З_{од}$ – основна й додаткова заробітна плата у собівартості деталі, грн.;

$C_ц$ - цехова собівартість деталі, грн.

$$З_{зп} = \frac{29,322}{1179,143} \cdot 100 = 2,5\%$$

- матеріаломісткість продукції:

$$З_{мп} = \frac{M_o}{C_ц} \cdot 100, \quad (5.41)$$

де M_o – матеріали основні з відрахуванням зворотних відходів у собівартості деталі, грн.

$$З_{мп} = \frac{983,610}{1179,143} \cdot 100 = 83,4\%$$

- собівартість товарної продукції цеху:

$$C_{тп} = C_ц \cdot N_з \cdot K_{дов} \quad (5.42)$$

де $N_з$ - річна програма запуску деталей, шт./рік.

$$C_{тп} = 1179,143 \cdot 10000 \cdot 3,1 = 36553433 \text{ грн.}$$

Підсумкові техніко-економічні показники роботи цеху зведемо до табл. 5.14.

Таблиця 5.14

Техніко-економічні показники цеху

№ з/п	Показник	Величина
1.	Програма запуску деталі ($N_з$), шт./рік	10000
2.	Трудомісткість виробничої програми ($T_р$), нормо-год.	7434
3.	Цехова собівартість деталі, грн.	1179,143
4.	Собівартість товарної продукції цеху ($C_{тп}$), тис. грн./рік	36553,4
5.	Чисельність основних робітників, осіб	4
6.	Виробіток продукції на одного робітника, нормо-год.	1858,5
7.	Матеріаломісткість продукції, %	83,4
8.	Зарплатомісткість продукції, %	2,5
9.	Приведені витрати при впровадженні, грн/рік - базового варіанту техпроцесу - проектного варіанту техпроцесу	 422135 1593699
10.	Зниження трудомісткості виготовлення деталі, %	12,1
11.	Економія чисельності основних робітників, осіб	17

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі на тему: «Дослідження впливу геометричних параметрів розвертки на огранювання отвору при обробці деталі корпус гідророзподільника» виконано дослідження конструктивних параметрів розверток на точність обробки отворів та на похибку круглості, а саме огранювання отвору.

Проаналізовано відомі конструктивні та технологічні особливості інструменту та процесу розгортання, які забезпечують зменшення похибки круглості отвору, а саме огранювання. Виконано аналіз відомих математичних моделей коливань розвертки та визначено геометричні параметри інструмента, що мають вплив на огранювання. Розроблено методику оптимізації параметрів розвертки з метою зменшення огранювання оброблюваних отворів.

Виконано аналіз базового технологічного процесу виготовлення деталі корпус гідророзподільника та визначено його переваги й недоліки. На основі аналізу запропоновані зміни та розроблено новий технологічний процес обробки даної деталі в якому застосовано сучасне металорізальне обладнання та різальні інструменти, а також виконується розгортання отворів як чистовий метод їх обробки.

Визначено критерії оцінювання схильності розвертки до огранювання, складено розрахункову модель параметрів інструменту. Виконано оптимізацію параметрів та розроблено удосконалену конструкцію розвертки для обробки отворів деталі корпус гідророзподільника, яка здатна зменшити огранювання. Виконано необхідні економічні розрахунки.

Всі прийняті технічні рішення підтверджено відповідними розрахунками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ ISO 521:2015 «Машинні розгортки з циліндричними хвостовиками і конусними хвостовиками Морзе».
2. Економічні та організаційно-планові розрахунки при проектуванні цеху механічної обробки. Методичні вказівки до виконання економічної частини дипломного проекту для студентів спеціальності 133 – «Галузеве машинобудування» / Укл. Журило І.В., Романюк Л.М. – Кропивницький: ЦНТУ, 2017. – 35 с.
3. Пат. на винахід 37558 Україна, B23D77/00. Розвертка / О.Г. Татьянченко, І.О. Малишко, В.В. Дядюшек. – № 99116483; заявл. 30.12.1999; опубл. 15.05.2001, Бюл. № 4. – 3 с. : іл.
4. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. 2nd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2012. 382 p.
5. Altintas Y., Engin S., Budak E. Analytical Stability Prediction and Design of Variable Pitch Cutters. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1999. Vol. 121, No. 2. P. 173–178.
6. Bayly P. V., Young K. A., Calvert S. G., Halley J. E. Analysis of Tool Oscillation and Hole Roundness Error in a Quasi-Static Model of Reaming. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2001. Vol. 123, No. 3. P. 387–396.
7. Bayly P. V. Optimal “White-Noise” Spacing of Reamer Blades. Proceedings of the 1997 ASM International Non-Ferrous Processing and Technology Conference. Materials Park, OH : ASM International, 1997. P. 419–423.
8. Bhat R., Bekinal S., Naik N., Kamath C. R., Kuttan A. Mechanistic and dynamic cutting force model for reaming operation. Engineered Science. 2021.
9. Budak E. An Analytical Design Method for Milling Cutters With Nonconstant Pitch to Increase Stability, Part 2: Application. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2003. Vol. 125, No. 1. P. 29–38.
10. Budak E. Analytical Models for High Performance Milling. Part II: Process Dynamics and Stability. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2006. Vol. 46, No. 12–13. P. 1489–1499.

11. Chandiramani N. K., Pothala T. Dynamics of 2-DOF Regenerative Chatter during Turning. Journal of Sound and Vibration. 2006. Vol. 290, No. 1–2. P. 448–464.
12. Dilley D. N., Bayly P. V., Whitehead B. T., Calvert S. G. An Analytical Study of the Effect of Process Damping on Reamer Vibrations. Journal of Sound and Vibration. 2005. Vol. 280, No. 3–5. P. 997–1015.
13. Epureanu B. I. An Investigation of Stability and Pattern Formation in Reaming. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2003. Vol. 217, No. 2. P. 269–281.
14. FixReam — Chatter-free Reaming Technology. MAPAL official website. URL: mapal.com/en-us/a/fixream.
15. Halley J. E., Luner J. J., Young K., Bayly P. V. United States Patent US 6,379,090 B1 FORCE BALANCED IRREGULAR PITCH REAMER AND ASSOCIATED REAMING METHOD. Apr. 30, 2002. 10 p.
16. Lanc K., Fiala Z. Chatter mitigation in reaming: Exploring effective tool holder design. MM Science Journal. 2024. Vol. 2024, No. 06. P. 7100–7106.
17. Leveille T., Valiorgue F., Claudin C., Rech J., Van-Robaeys A., Masciantonio U., Brosse A., Dorlin T. Influence of the reaming process on hole's surface integrity and geometry in a martensitic stainless steel 15-5PH. Procedia CIRP. 2022. Vol. 108. P. 384–389.
18. Manoilov O., Kudinova E. Сучасні концепції підвищення вібростійкості інструменту при розвертанні // Prospektive globale wissenschaftliche Trends 2021: INNOVATIVE TECHNOLOGY, TRANSPORT, SECURITY: monograph [S. Denysiuk, I.V. Verbytskyi, A.V. Bernatskyi, I.V. Bondarenko, V.I. Burlakov] - Karlsruhe: Sergeieva&Co, 2021 – P. 87-94.
19. Metzler S. A., Bayly P. V., Young K. A., Halley J. E. Analysis and Simulation of Radial Chatter in Drilling and Reaming. Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences (DETC'99), 17th Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise, Las Vegas, 1999. P. 1711–1719.
20. Metzler S. A., Bayly P. V., Young K. A., Halley J. E. Analysis and Simulation of Radial Chatter in Drilling and Reaming. Proceedings of the ASME Design

Engineering Technical Conferences (DETC'99), 17th Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise, Las Vegas, 1999. P. 1711–1719.

21. Pull reamer. Заявка на пат. US 2011/0103908 A1 США : МПК B23D 77/00 / заявка № US 12/991,217 ; заявл. 24.02.2009 ; пріор. 15.05.2008 (DE 102008023814) ; опубл. 05.05.2011.
22. Reamer and method for reaming. Пат. US 7 207 752 B2 США : МПК B23D 77/00 / винахідник Paul Martin Schulte ; заявник та патентовласник Star Cutter Co. – № US 10/770,888 ; заявл. 03.02.2004 ; опубл. 24.04.2007.
23. Ryu T., Nakae T., Matsuzaki K., Matsumoto Y., Tsukamoto K., Hirata N. Countermeasures against Polygonal Deformation of Borehole in Reaming Process. Journal of Physics: Conference Series. 2023. Vol. 2643. Art. 012002.
24. Taskarina A., Kassenov A., Mussina Zh., Iskakova D., Lub T., Mussina L., Ibragimova Z. A Comprehensive Approach to Improving Accuracy, Tool Life, and Surface Quality in Hole Reaming. Engineering, Technology & Applied Science Research. 2026. Vol. 16, No. 3. P. 35630–35637.
25. Tobias S. A., Fishwick W. A Theory of Regenerative Machine Tool Chatter. The Engineer. 1958. Vol. 205. P. 199–203, 238–239.
26. Towfighian S., Behdinan K., Papini M., Saghir Z., Zalzal P., de Beer J. Finite Element Modelling of Low-Speed Femur Reaming Using Reamers with Irregular Tooth Spacing. Journal of Sound and Vibration. 2008. Vol. 318, No. 4–5. P. 868–883.
27. Wang M., Zan T., Yang Y., Fei R. Design and implementation of nonlinear TMD for chatter suppression: An application in turning processes. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2010. Vol. 50, No. 5. P. 474–479.
28. Zugreibahle [Pull reamer]. Міжнар. заявка на пат. WO 2009/138144 A1 (PCT) : МПК B23D 77/00 / заявка № PCT/EP2009/001278 ; заявл. 24.02.2009 ; пріор. 15.05.2008 (DE 102008023814) ; опубл. 19.11.2009.