

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

на тему:

**«Покращення якості обробки внутрішніх поверхонь отворів
шляхом застосовування інструменту з регульованим положенням
різальної частини»**

**«Improving the quality of processing the internal surfaces of holes by
using a tool with an adjustable position of the cutting part»**

Виконавець: здобувач гр. ГМ-23М-3

_____ Володимир НАТАЛУХА

Керівник: к.т.н., доц.

_____ Олександр ЛИСЕНКО

Рецензент: к.т.н., доц.

_____ Руслан ОСІН

Зав. каф. ММіР: к.т.н., доц.

_____ Андрій ГРЕЧКА

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	133 Галузеве машинобудування
Освітньо-наукова програма	Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММіР
Андрій ГРЕЧКА

«___» _____ 2025 р.

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

Володимира НАТАЛУХИ

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Покращення якості обробки внутрішніх поверхонь отворів шляхом застосовування інструменту з регульованим положенням різальної частини
Improving the quality of processing the internal surfaces of holes by using a tool with an adjustable position of the cutting part
2. Керівник роботи: к.т.н., доц. Олександр ЛИСЕНКО

затверджені наказом ЦНТУ від «20» січня 2025 р. № 234-02

3. Строк подання роботи до захисту 15 травня 2025 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є забезпечення необхідної якості обробки при розточуванні, шляхом внесення компенсуючого елемента в конструкцію розточувального інструменту.

Завдання:

- проаналізувати параметри якості обробки та фактори, які на них впливають;
- виконати моделювання пружної технологічної оброблювальної системи при розточуванні;
- розробити конструкцію розточувального інструмента, з компенсуючим елементом;
- дослідити процес розточування, з урахуванням особливостей розробленої конструкції розточувального інструменту;
- перевірити ефективність застосування розробленого розточувального інструменту в реальному технологічному процесі;
- розрахувати економічну ефективність результатів проведених досліджень.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Науково-дослідний	Олександр ЛИСЕНКО		
Організаційно-економічний	Ірина ЖУРИЛО		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел	Січень-лютий 2025	
2.	Вступ	Лютий 2025	
3.	Мета та задачі роботи	Лютий 2025	
4.	Методика роботи	Березень-квітень 2025	
5.	Теоретична робота	Березень-квітень 2025	
6.	Визначення економічної ефективності	Квітень-травень 2025	
7.	Висновки	Травень 2025	
8.	Оформлення роботи	Травень 2025	
9.	Здача роботи на кафедрі	Травень 2025	

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи _____ Олександр ЛИСЕНКО
(підпис)

Завдання прийнято до виконання « ____ » _____ 2025 р.

Здобувач _____ Володимир НАТАЛУХА
(підпис)

Анотація

НАТАЛУХА Володимир. Покращення якості обробки внутрішніх поверхонь отворів шляхом застосовування інструменту з регульованим положенням різальної частини. Випускна кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: ЦНТУ, м. Кропивницький, 2025. – 111 с. Матеріали презентації 10 іл.

Актуальність: У сучасному машинобудуванні обробка різанням все ще залишається переважним способом формоутворення, на частку якого припадає більше третини загальної трудомісткості виготовлення виробів. Розвиток машинобудування на сучасному етапі неможливий без постійного підвищення продуктивності праці і поліпшення якості виробів, що випускаються. Створення "розумних" інструментів, які підлаштовуються до конкретних умов обробки знаходиться в межах концепції програми Industrie 4.0 (з нім. Промисловість 4.0), яка описує основні положення переходу виробництва на засади четвертої промислової революції.

Метою роботи є забезпечення необхідної якості обробки покращенням динамічних властивостей технологічної оброблювальної системи при розточуванні, шляхом внесення компенсуючого елемента в конструкцію розточувального інструменту.

Практичне значення: керуючись результатами, отриманими у роботі, стало можливим розробити методику проектування розточувального інструменту, застосування якого дозволить підвищити або якість, або продуктивність розточування.

Ключові слова: розточування, якість обробки, регульований різець, динамічна якість, технологічна система

Annotation

NATALUKHA Volodymyr. Improving the quality of processing the internal surfaces of holes by using a tool with an adjustable position of the cutting part. Graduation thesis for the educational degree "Master": CNTU, city Kropyvnytskyi, 2025. - 111 p. Presentation materials 10 slides.

Relevance: In modern mechanical engineering, cutting is still the predominant method of forming, accounting for more than a third of the total labor intensity of manufacturing products. The development of mechanical engineering at the present stage is impossible without a constant increase in labour productivity and improvement of the quality of manufactured products. The creation of "smart" tools that adapt to specific processing conditions is within the concept of the Industrie 4.0 program (German: Industry 4.0), which describes the main provisions of the transition of production to the principles of the fourth industrial revolution.

The purpose of the work ensuring the required processing quality by improving the dynamic properties of the technological processing system during boring, by introducing a compensating element into the design of the boring tool.

Practical meaning: Guided by the results obtained in the work, it became possible to develop a method for designing a boring tool, the use of which will allow to increase either the quality or productivity of boring.

Key words: boring, processing quality, adjustable cutter, dynamic quality, technological system

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПАРАМЕТРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ ОБРОБКИ ПРИ РОЗТОЧУВАННІ.....	9
1.1. Якість, параметри якості, шорсткість, геометрична точність.....	9
1.2. Відхилення форми деталей і розміщення поверхонь	16
1.3. Параметри, що впливають на якість обробки	19
1.4. Види впливу на процес різання	21
1.5. Вплив динамічних параметрів ТОС на процес різання.....	24
1.6. Методи поліпшення динаміки технологічних систем	29
1.7. Інструменти з ефектом гасіння коливань.....	33
1.8. Конструкції інструменту з можливістю компенсації пружних деформацій	37
1.9. Інструменти з системами управління положенням різальної частини.....	39
Висновки, формування мети та задач дослідження	43
2. НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....	45
2.1. Аналіз процесу розточування	45
2.2. Математичне моделювання процесу розточування з врахуванням особливостей розробленого розточувального різця.....	51
2.3. Дослідження процесу розточування.....	62
2.4. Базова технологія обробки деталі корпус	69
2.5. Проектування та розрахунок розточувального різця	71
2.6. Модернізована технологія обробки деталі корпус	80
3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ	91
3.1. Загальні вихідні дані.....	91
3.2. Визначення витрат на підготовку виробництва.....	93
3.3. Визначення повної собівартості проектного інструменту	94
3.4. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки), на одиницю продукції в базовому та проектному варіантах	97
3.5. Розрахунок показників економічної ефективності	101
ВИСНОВКИ	104
ЛІТЕРАТУРА	105

ВСТУП

Актуальність роботи. У сучасному машинобудуванні обробка різанням все ще залишається переважним способом формоутворення, на частку якого припадає більше третини загальної трудомісткості виготовлення виробів. Розвиток машинобудування на сучасному етапі неможливий без постійного підвищення продуктивності праці і поліпшення якості виробів, що випускаються.

Шукаючи можливості підвищення якості при розточуванні, було запропоновано деякі методи. Ці методи переважно полягають у зміні конструкції одного з елементів з яких складається технологічна система це може бути як верстат, так і інструмент або затискне пристосування.

Метою таких змін у конструкцію є надання можливості всій технологічній системі змінювати свої параметри, підналагоджувати їх під змінні та швидкоплинні процеси технологічного оброблення. Таке підналагодження, наприклад, дозволяє частково або повністю невілювати негативний вплив пружної деформації елементів технологічної системи, що виникають у процесі оброблення під дією технологічного навантаження на параметри якості обробки деталі, зокрема такі, як геометрична точність та якість обробленої поверхні шорсткість.

З усіх елементів технологічної системи найбільш перспективним за параметром витрати/результат для модернізації є якраз інструмент, оскільки по перше це найменший найпростіший та змінний елемент системи.

Крім того, створення "розумних" інструментів, які підлаштовуються до конкретних умов обробки знаходиться в межах концепції програми Industrie 4.0 (з нім. Промисловість 4.0), яка описує основні положення переходу виробництва на засади четвертої промислової революції.

Мета роботи і задачі дослідження.

Метою роботи є забезпечення необхідної якості обробки покращенням динамічних властивостей технологічної оброблювальної системи при розточуванні, шляхом внесення компенсуючого елемента в конструкцію розточувального інструменту.

Щоб досягти сформульованої мети, необхідно вирішити такі **задачі**:

1. Проаналізувати параметри якості обробки та фактори, які на них впливають;
2. Виконати моделювання пружної технологічної оброблювальної системи при розточуванні;
3. Розробити конструкцію розточувального інструмента, з компенсуючим елементом;
4. Дослідити процес розточування, з урахуванням особливостей розробленої конструкції розточувального інструменту;
5. Перевірити ефективність застосування розробленого розточувального інструменту в реальному технологічному процесі;
6. Розрахувати економічну ефективність результатів проведених досліджень.

Об'єкт дослідження – процес розточування.

Предмет дослідження – зміна динамічних властивостей технологічної оброблювальної системи при розточуванні.

Наукова новизна:

– для покращення динамічної властивості технологічної системи при розточуванні запропонована динамічна модель, замкнена через процес різання, що враховує конструктивні особливості розточувального інструменту.

Практична цінність роботи:

Керуючись результатами, отриманими у роботі, стало можливим розробити методику проектування розточувального інструменту, застосування якого дозволить підвищити або якість, або продуктивність розточування.

Апробація результатів роботи.

За матеріалами роботи була зроблена доповідь на LIX науковій конференції здобувачів вищої освіти, що відбулась у м. Кропивницький на базі Центральноукраїнського національного технічного університету, присвяченої до "Дня науки-2025", яка відбулась 24-25 квітня 2025 року.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота магістра складається зі вступу, 3 розділів та висновків загальним обсягом 111 друкованих аркушів основного машинописного тексту, 30 рисунків, 72 найменувань використаних літературних джерел та 10 листів ілюстрацій.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПАРАМЕТРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ ОБРОБКИ ПРИ РОЗТОЧУВАННІ

1.1. Якість, параметри якості, шорсткість, геометрична точність

У машинобудуванні ключовими вимогами до будь-якого металорізального верстата та оброблюваної деталі є здатність забезпечити необхідну точність обробки і належну якість поверхні.

У контексті сучасного машинобудування точність реальної деталі визначається як ступінь її відповідності геометричним і розмірним параметрам, заданим у технічному кресленні. Вона кількісно характеризується фактичними відхиленнями розмірів від номінальних значень, що задаються проектувальником. Іншими словами, точність – це міра наближення форми, розмірів окремих елементів та просторового розташування поверхонь деталі до передбачених у кресленні характеристик.

Через фізичну та технічну неможливість виготовлення абсолютно точної деталі внаслідок неминучих похибок при механічній обробці (наприклад, вібрації, зношення інструменту, температурні деформації тощо), поняття точності завжди носить відносний характер. У виробничій практиці вважається, що деталь відповідає вимогам точності тоді, коли величина похибки її виготовлення Δ не перевищує встановленого допуску δ , тобто виконується умова $\Delta \leq \delta$. Допуск, у свою чергу, визначає межі допустимих відхилень і встановлюється відповідно до вимог функціональності, надійності та економічної доцільності.

Підвищення точності виготовлення заготовок є важливим етапом оптимізації виробничого процесу. Воно дозволяє суттєво знизити трудомісткість наступних етапів механічної обробки за рахунок зменшення припусків – шару матеріалу, що видаляється при остаточній обробці. Це призводить до скорочення часу обробки, зменшення зносу інструменту та економії матеріальних ресурсів.

Крім того, висока точність виготовлення істотно впливає на ефективність складання машин і механізмів технічних систем [12]. Вона дозволяє уникнути або

звести до мінімуму пригоночні роботи, що, у свою чергу, зменшує загальні витрати праці та підвищує продуктивність. Особливо важливою перевагою є забезпечення взаємозамінності – здатності замінити одну деталь іншою без додаткової обробки. Це забезпечує можливість потокового складання, спрощує технічне обслуговування і ремонт обладнання в умовах експлуатації, а також сприяє стандартизації й уніфікації технічних систем.

Питанню забезпечення необхідної точності обробки присвятили свої праці такі дослідники, як Решетов Д.Н. [55], Коллер Я. Д. [14], Косилова А. Г. [15], Медведев Д. Д. [29], Колев К.С. [13], Пестунов В. М. [35, 37, 38, 39] та ін.

У сучасних умовах стрімкого розвитку автоматизованого виробництва питання забезпечення стабільної якості продукції набуває особливої важливості. Для ефективного вирішення цієї проблеми необхідно спиратися на глибокий аналіз технологічних чинників, що впливають на точність обробки. Важливу роль відіграє також ретельне вивчення умов експлуатації обладнання та технологічного оснащення, з урахуванням їх технічного стану, режимів роботи й взаємодії з оброблюваними матеріалами [27], а також відшуканні нових прогресивних технологічних методів, чому присвятили свої праці А.С. Проников [53, 63], Д. Д. Медведев [28], М. М. Тверской [62] та ін.

Під час розв'язання питань, пов'язаних із забезпеченням точності в машинобудуванні, насамперед визначають необхідний рівень точності виготовлення машини та її складових частин, виходячи з функціонального призначення конструкції та заданих технічних вимог. Це рішення базується на аналізі як теоретичних, так і експериментальних даних, а також враховує наявний досвід експлуатації подібних машин і механізмів. Варто зазначити, що підхід за принципом «чим точніше – тим краще» є помилковим і часто пов'язаний з недостатнім розумінням реальних умов функціонування виробу.

Призначення параметрів точності повинно здійснюватися з урахуванням економічної доцільності, ресурсу служби машини та специфіки умов її подальшої експлуатації. На основі встановленої точності обирають відповідні методи та засоби контролю, які дозволяють забезпечити надійність вимірювання й оцінку

якості. Технологічні процеси мають бути спроектовані так, щоб гарантувати досягнення заданої точності з максимальною продуктивністю та мінімальними витратами. У цьому контексті важливе значення має також призначення технологічних допусків для проміжних розмірів заготовок і допоміжних баз при виконанні операцій механічної обробки.

Фактична точність виготовлення оцінюється шляхом лабораторних та виробничих випробувань існуючих або нових технологічних методів. У процесі таких досліджень виявляються можливі причини відхилень від заданих параметрів точності у виробничому середовищі, що дозволяє своєчасно коригувати процеси та запобігати виникненню браку.

Процес різання характеризується багатьма факторами, що до обробленої поверхні. На поверхнях оброблених деталей залишаються характерні сліди механічної обробки, що проявляються у вигляді нерівностей — виступів і западин, які мають різноманітну форму та розміри.

Важливим серед розглянутих факторів є шорсткість обробленої поверхні. Шорсткість — це якісний показник, критерій оцінки обробки заготовки. Шорсткість — це висота мікронерівностей на базовій довжині. Тобто шорсткість дозволяє робити висновки, що до придатності і якості обробки деталі, її механічні характеристики, область застосування і т.п.

Шорсткість поверхні стала найзначнішим технічною вимогою, оскільки вона є одним з найважливіших показників якості поверхневого шару виробу. Постійне зростання вимог до якості продукції змушує виробників удосконалювати точність обробки та покращувати фізико-механічні властивості оброблюваних поверхонь.

Крім того, якість обробленої поверхні використовується в якості важливого параметра при діагностиці стабільності процесу обробки, де погіршення поверхні може вказувати неоднорідність матеріалу заготовки, знос, вібрації ріжучого інструменту і т.п. З цих причин важливо підтримувати високу якість оброблюваних поверхонь, що особливо важливо при сучасних вимогах при обробці виробів на нанорівні, яка повинна здійснюватися в межах 100 нм. Проте досягнення хорошої якості поверхні веде до значних економічних витрат при реалізації виробничих процесів.

Складність і багатофакторність процесу металорізання свідчить про те, що формування шорсткості поверхні зумовлюється сукупною дією низки чинників, які проявляються одночасно. У певних умовах окремі з них можуть мати переважальний вплив. До основних факторів, що визначають характер шорсткості, належать режими різання — швидкість, подача та глибина; тип обробки; жорсткість і демпфуючі властивості складових технологічної системи; а також фізико-механічні характеристики оброблюваного матеріалу. Усі ці чинники активно вивчаються як в теоретичних, так і в експериментальних дослідженнях, результати яких широко представлені у науково-дослідній літературі. Результати цих досліджень показали, що при різанні різних матеріалів низька швидкість різання (v), велика подача (s) і глибина різання (t), великий виліт (L), нерівності ріжучої кромки різця, менший розмір поперечного перерізу ріжучого інструменту і низька твердість технологічної системи збільшують вібрацію, внаслідок чого погіршується стан поверхневого шару.

Шорсткість поверхні оцінюється такими параметрами, наведеними у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Конкретизовані кількісні значення параметрів якості поверхні R_z і R_a

Параметр шорсткості, <i>мкм</i>	Стан обробленої поверхні деталі		
	грубо оброблена	чиста	особливо чиста
R_z	200; 100; 50; 25; 12,5; 10	—	0,80; 0,40; 0,20; 0,100; 0,050; 0,025
R_a	—	3,2; 1,6; 0,80; 0,40; 0,20; 0,100; 0,050; 0,025	—

На рисунку 1.1 зображено профіль реальної поверхні із позначенням окремих параметрів шорсткості. Нижче подано базові лінії відліку та наведено визначення основних параметрів шорсткості поверхні.

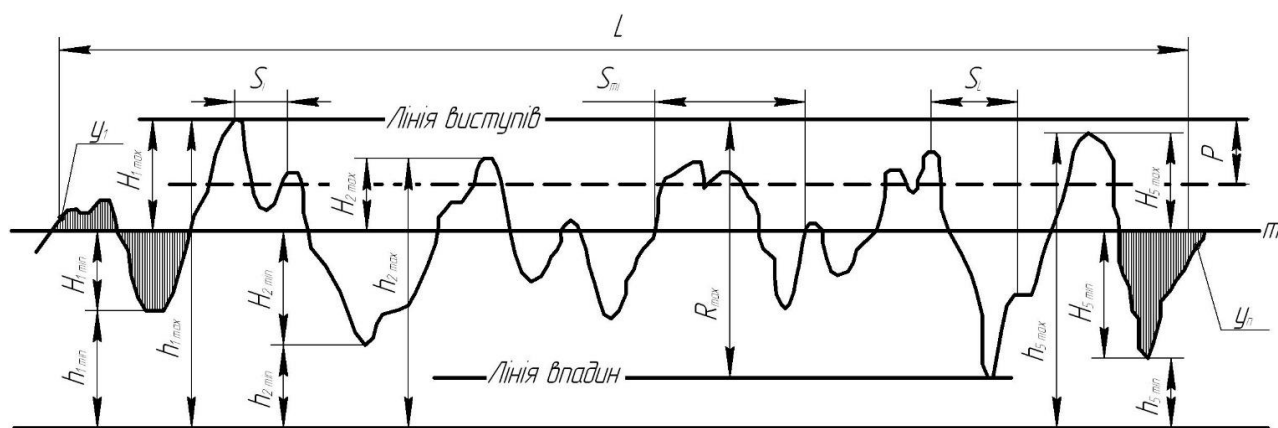


Рис. 1.1. Схематичне зображення збільшеної реальної поверхні профілю

Базова довжина L – це довжина базової лінії, яка використовується для виділення нерівностей поверхні, що характеризують її шорсткість. Базова лінія (поверхні) – лінія або поверхня заданої геометричної форми, що проводиться певним чином відносно реального профілю і слугує основою для визначення геометричних параметрів поверхні.

Система середньої лінії – система відліку, яка використовується для оцінювання параметрів шорсткості, де за базову приймається середня лінія профілю.

Виступ профілю – це ділянка профілю, що з'єднує дві сусідні точки його перетину із середньою лінією і спрямована назовні від тіла. Западина профілю – це ділянка профілю між двома точками перетину із середньою лінією, що спрямована всередину тіла. Нерівність профілю – це комбінація виступу та відповідної западини, яка характеризує локальну зміну геометрії поверхні. Крок нерівностей профілю – відрізок середньої лінії, що обмежує окрему нерівність профілю. Середній крок ρ_m – це середнє значення кроків виступів профілю в межах однієї базової довжини.

Найбільша висота нерівностей профілю $R_{\max}$ – це максимальна відстань між найвищою точкою виступу та найглибшою точкою западини профілю в межах базової довжини.

Відхилення профілю y – це відстань від окремої точки профілю до базової лінії. Середнє квадратичне відхилення R_q – це середнє квадратичне значення всіх відхилень профілю відносно базової лінії.

Відносна опорна довжина профілю t_p – сума довжин усіх відрізків, що утворюються в точках перетину профілю з лінією, яка розміщується на заданій висоті (еквідистантній до середньої лінії) в межах базової довжини.

Рівень перерізу профілю p – це відстань між лінією виступів профілю і лінією, що проходить паралельно їй на певній висоті, визначаючи рівень, на якому оцінюється контакт або опора профілю.

Шорсткість поверхні, яка формується під час обробки різанням, залежить від широкого спектра чинників, пов'язаних з умовами проведення технологічного процесу. Висота та форма нерівностей, а також їх розміщення й орієнтація визначаються такими параметрами:

- режимами різання (швидкість, подача, глибина);
- конструктивними особливостями, геометрією та жорсткістю різального інструмента;
- умовами охолодження й мастильної обробки;
- хімічним складом і властивостями матеріалу, що обробляється;
- типом, технічним станом і точністю роботи обладнання;
- характеристиками допоміжного оснащення та пристроїв.

У залежності від конкретних умов обробки той чи інший фактор може мати домінуючий вплив на утворення мікронерівностей.

Експериментальні дослідження свідчать, що основними чинниками, які суттєво впливають на шорсткість поверхні під час різання, є швидкість різання та подача. Глибина різання, як правило, не має значного впливу на висоту мікронерівностей.

На рисунку 1.2 представлено графічну залежність шорсткості поверхні сталі від швидкості різання.

Зазначена залежність пояснюється впливом наростоутворення на процес різання. Його роль у формуванні мікронерівностей можна описати наступним чином. Внаслідок адгезійної взаємодії між різальним інструментом і матеріалом деталі на контактних поверхнях утворюється наріст. З часом він збільшується в

розмірах і починає проникати в оброблювану заготовку нижче номінального рівня зрізу. Це призводить до зростання опору при заглибленні інструмента та створює передумови для зародження тріщин, що викликають руйнування матеріалу.

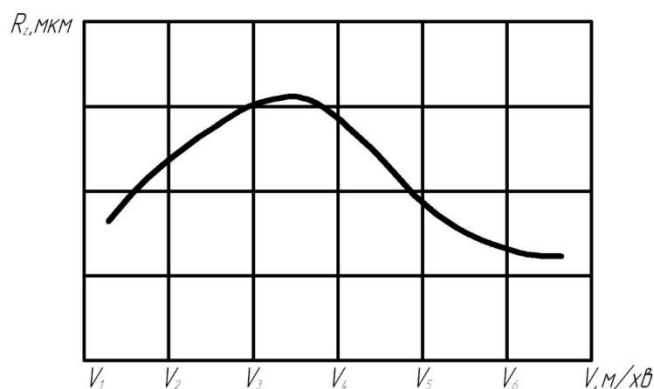


Рис. 1.2. Залежність при різанні сталі параметру висоти мікронерівностей від параметру режиму різання швидкості заготовки

Зміна значення висоти мікронерівностей на обробленій поверхні в залежності від значення подачі (рис. 1.3).

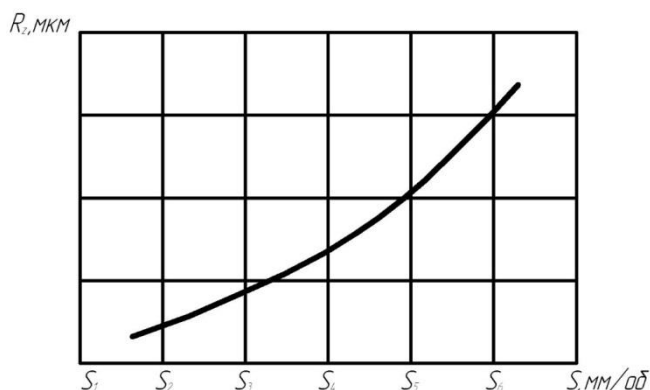


Рис. 1.3. Залежність при різанні сталі параметру висоти мікронерівностей від параметру режиму різання подачі заготовки

Мінімальний вплив глибини різання на формування мікронерівностей пояснюється тим, що збільшення ширини зрізу практично не змінює характер пластичної деформації оброблюваного металу. Хоча зміна глибини майже не впливає на інтенсивність утворення наросту на інструменті, вона може призводити до зростання коливань у зоні різання. Ці вібрації знижують стабільність процесу і можуть негативно позначатися на якості поверхні.

Графічне представлення залежності шорсткості поверхні від глибини різання наведено на рис. 1.4.

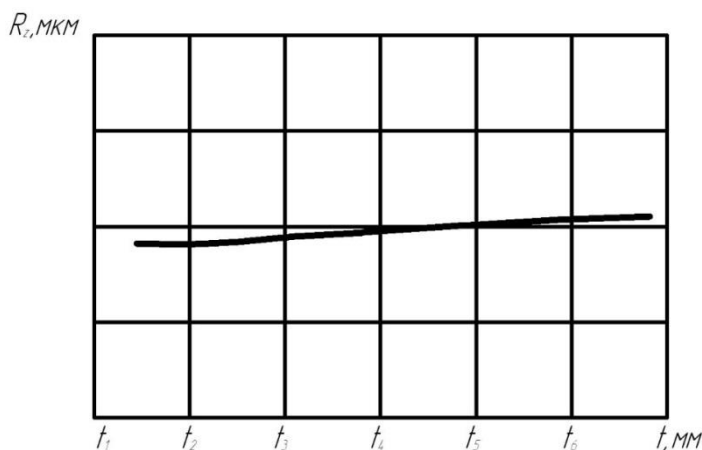


Рис. 1.4. Залежність при різанні сталі параметру висоти мікронерівностей від параметру режиму різання глибини різання заготовки

У процесі виробництва деталей виникають дві категорії похибок: систематичні і випадкові.

Систематичні похибки-це похибки постійні або ті похибки, які закономірно змінюються, в залежності від характеру невинядкових факторів. Виникають у результаті неточного настроювання обладнання, похибки вимірювального пристрою, відхилення робочої температури від нормальної, силових деформаціях. Системну похибку можна виявити і її позбутися.

Випадкові похибки-похибки які змінюються випадково при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини Характерна ознака – зміна значень, при повторних дослідах. Причина випадкових похибок – це численність (множина) факторів, які випадково змінюються, таких як припуск на обробку, механічні властивості матеріалу, сила різання, різна точність установлення деталей на вимірювальну позицію, причому, взагалі, жоден з цих факторів не є домінуючим.

1.2. Відхилення форми деталей і розміщення поверхонь

Точність виготовлення машинних деталей оцінюється за величиною відхилень від передбачених геометричних параметрів, зокрема форми поверхонь і

правильності їх просторового розміщення відносно одна одної. Такі неточності регламентуються встановленими допусками, які призначаються з урахуванням умов експлуатації та взаємодії спряжених елементів.

У разі плоских поверхонь, що з'єднуються, основними формоутворювальними відхиленнями є непрямолінійність і неплосцинність. Перше відображає відхилення профілю поперечного перерізу від прямої лінії у певному напрямку, перпендикулярному до площини. Друге — це загальна нерівність поверхні в різних напрямках, наприклад у вигляді опуклості або вгнутості, що вказує на відсутність ідеальної площини.

Циліндричні поверхні також піддаються геометричним деформаціям. У поперечному перерізі це може проявлятися у вигляді некруглості – відхилення контуру від ідеального кола, до різновидів якої належать овальність та огранка. Ці дефекти визначаються різницею між найбільшим і найменшим діаметром.

У поздовжньому напрямку можливі викривлення типу бочкоподібності, вигнутості, сідлоподібності та конусності, які порушують правильну форму вздовж осі циліндра.

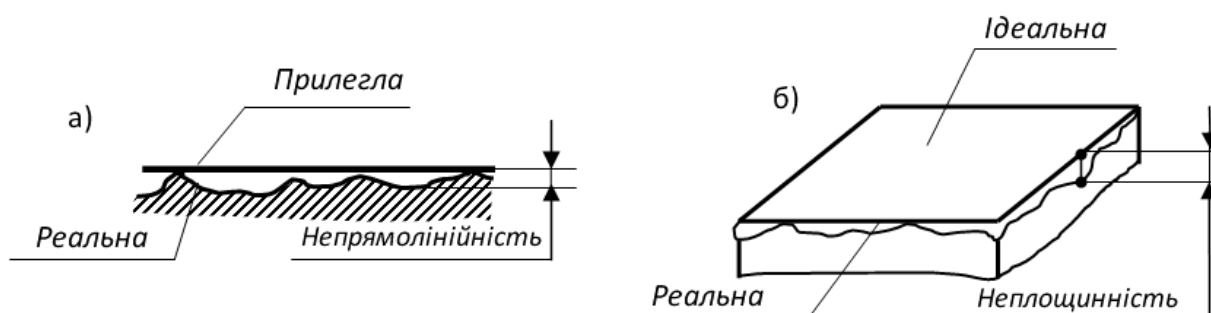


Рис. 1.5. Можливі варіанти відхилень форми деталей з плоскими поверхнями

Щодо відхилень у взаємному розміщенні поверхонь деталей, слід зазначити, що чинні стандарти визначають низку допустимих геометричних відхилень залежно від типу поверхні. Ці відхилення є критично важливими для забезпечення точності складання, надійної роботи вузлів і механізмів та забезпечення взаємозамінності елементів конструкцій.

а) Для площин стандартами передбачені такі види відхилень, як:

– непаралельність – відхилення однієї площини від паралельного розташування відносно іншої;

– неперпендикулярність – відхилення кута між площинами або між площиною та віссю від прямого кута (90°).

б) Для циліндричних поверхонь можуть спостерігатися такі відхилення:

– неспіввісність – зміщення осей двох циліндричних поверхонь, які повинні бути співвісними;

– радіальне биття – зміна відстані від осі обертання до контрольної точки поверхні при її обертанні;

– торцеве биття – відхилення торцевої поверхні від ідеальної площини, перпендикулярної до осі обертання.

в) Для осей можливі такі порушення взаємного розміщення:

– перекіс осей – невідповідність кутового положення осей, які мають бути паралельними або співвісними;

– відхилення в положенні осей, що повинні перетинатися – помилка в точці перетину;

– відхилення мимобіжних осей – коли осі, що повинні проходити на певній відстані одна від одної, мають порушення у своєму положенні у просторі.

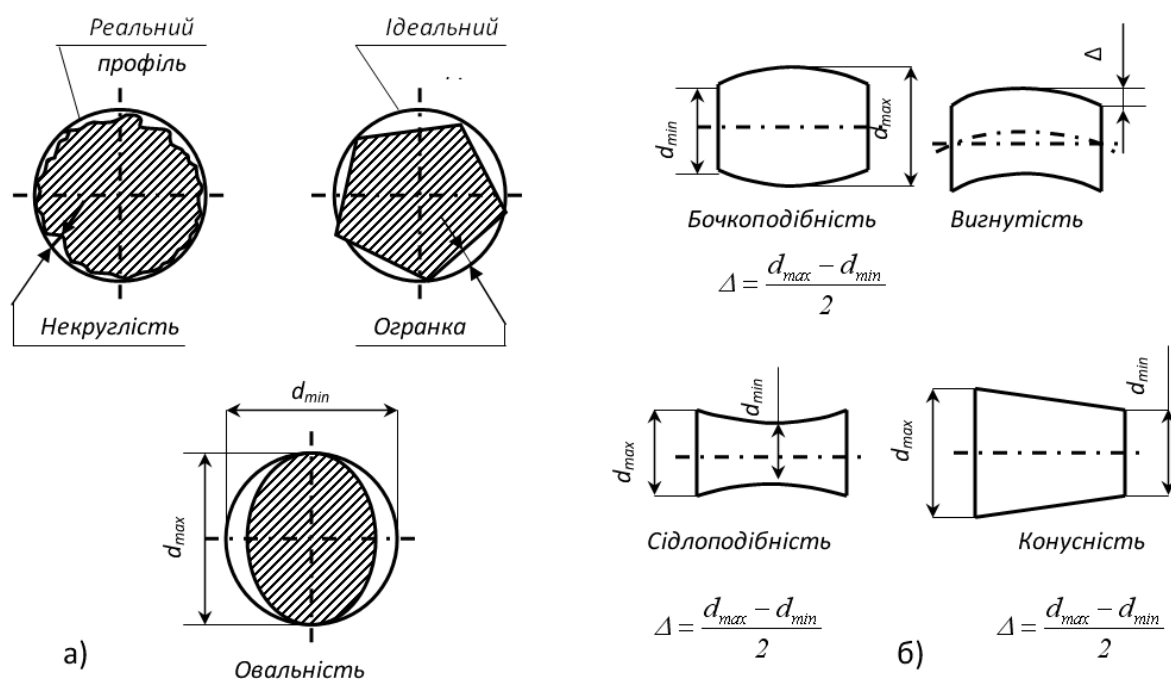


Рис. 1.6. Варіанти відхилень форми деталей з циліндричними поверхнями

Такі геометричні неточності суттєво впливають на якість складання, працездатність механізмів та знос деталей у процесі експлуатації, тому повинні жорстко контролюватися під час виробництва.

1.3. Параметри, що впливають на якість обробки

Процес обробки супроводжується різними процесами, які мають властивість впливати, як на сам процес різання, так і на точність та якість деталі.

Вплив на якість обробки теплових деформацій елементів технологічної системи.

Вплив температури на точність обробки. Точність механічної обробки деталей на завершальних стадіях технологічного процесу значною мірою залежить від температурних деформацій, які виникають як у самій заготовці, так і в складових частинах верстата. Ці деформації є наслідком нагрівання в процесі різання. Вони також впливають на точність обробки через зміну геометрії ріжучого інструмента, що зазнає сильного нагрівання під час роботи. Теплові зміни можуть бути викликані кількома причинами:

- виділенням тепла у зоні різання металу;
- теплом, що утворюється внаслідок тертя між рухомими частинами обладнання;
- температурною нестабільністю середовища, яка викликає нерівномірне прогрівання або охолодження верстата, оснащення, інструмента і деталі.

Застосування охолоджувальних рідин значно зменшує інтенсивність теплових деформацій у всій технологічній системі.

Теплові деформації верстата. Основними джерелами нагрівання верстата та його окремих частин (зокрема шпинделів, столів, напрямних, станин тощо) є втрати енергії на тертя в підшипниках, зубчастих передачах, вузлах гідроприводів, електродвигунах, а також від систем охолодження, що відводять тепло із зони різання. Додатковий вплив мають зовнішні джерела, як-от тепло від опалення або втрата тепла через фундамент. Нерівномірне нагрівання викликає викривлення конструктивних частин, що впливає на загальну точність верстата.

Теплові деформації інструмента. Під час різання значна частина тепла передається ріжучому інструменту, який зазнає суттєвого нагрівання. Особливо це помітно при обробці сплавів з низькою теплопровідністю — наприклад, титанових або жароміцних. Температура в зоні різання в таких випадках значно перевищує температуру при обробці сталей. Це зумовлено як властивостями матеріалів (теплопровідністю, теплоємністю, опором деформації), так і інтенсивністю тепловиділення.

Максимально допустимі температури нагріву інструментів залежать від матеріалу:

- до 250°C — інструменти з вуглецевої сталі,
- до 600°C — швидкорізальні сталі,
- до 1000°C — твердосплавні інструменти,
- до 1200°C — інструменти з мінералокераміки.

Найбільше на температуру впливає швидкість різання, меншою мірою — подача, і ще менше — глибина. Перегрівання інструмента призводить до швидкого зносу, втрати геометричної стабільності та зниження точності обробки.

Теплові деформації заготовки. Певна частина теплової енергії, що виникає в зоні різання, переходить у заготовку. Це викликає її нагрів і, відповідно, зміну лінійних розмірів. При рівномірному прогріванні змінюються лише розміри, а при локальному — виникають викривлення, жолоблення, що призводить до формових похибок. Нагрівання деталі напряму залежить від режимів обробки, зокрема від швидкості та подачі. Зменшення часу теплового впливу допомагає уникнути критичного підвищення температури.

Вплив теплових процесів на якість обробки. Теплові ефекти під час обробки призводять до змін у геометрії як інструмента, так і самої деталі, що спричиняє похибки розмірів і форми. У разі жорсткого закріплення заготовка може деформуватись через внутрішні напруги, спричинені нерівномірним нагріванням. За надмірних температур у поверхневому шарі можуть виникати фазові перетворення, що змінюють механічні властивості поверхні.

Вплив на якість обробки зносу (спрацювання) елементів технологічної системи:

1. Верстат. У процесі тривалої експлуатації металорізальні верстати втрачають точність через спрацювання контактних поверхонь — у підшипниках, направляючих, передачах. Це призводить до змін положення елементів конструкції, наприклад, биття шпинделя, що викликає відхилення форми при обробці.

2. Затискне пристосування. Технологічні пристосування виготовляють з урахуванням точності обробки. Для деталей із 6-9 квалітетом точність пристосування має бути в межах $\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{3}$ допуску на розмір деталі, а для грубішої — $\frac{1}{5}$ - $\frac{1}{10}$. Зношуються зазвичай базові елементи: напрямні, втулки, опори, що погіршує загальну точність.

3. Інструмент. Різальний інструмент працює в екстремальних умовах і з часом зношується. Особливо це критично для профільного інструменту (розгортки, протяжки, фрез), що відтворює свій профіль у заготовці. Найбільший вплив на знос має швидкість різання, менший — подача і глибина. Також має значення задній кут: при його збільшенні знос прискорюється. Частково вплив зносу можна компенсувати шляхом коригування налаштувань верстата.

Вплив на якість обробки похибки встановлення заготовки.

Перед початком обробки заготовку необхідно точно встановити у пристосуванні та надійно закріпити. Зусилля затиснення може викликати пружні або пластичні деформації, що впливають на точність. Для їх мінімізації необхідно правильно розташовувати опори та затискачі, забезпечуючи рівномірний розподіл навантаження.

1.4. Види впливу на процес різання

Вплив вібрацій на якість обробки. При обробці заготовок на верстатах іноді виникають періодичні коливальні рухи (вібрації) елементів системи: верстат-пристрій-інструмент-деталь. У цих умовах процес різання втрачає сталий характер.

Дослідженню впливу коливальних процесів на якість обробки присвячені праці Голоскокова Е.Г. [7], Тимошенка С.П. [64], Хомякова В.С. [67] та ін.

Вібраційні коливання ріжучого інструмента відносно заготовки істотно впливають на результат обробки, суттєво погіршуючи якість поверхні. У таких умовах спостерігається різке зростання шорсткості, поява хвилястих нерівностей, а також нестабільність і коливальний характер сил різання. Особливо критичним є випадок резонансу – коли частота зовнішніх збурень під час обробки збігається з власною частотою коливань технологічної системи. У результаті навантаження на рухомі частини верстата можуть зрости в десятки разів, що призводить до швидкого зносу вузлів.

В процесі різання вимушені коливання виникають під дією зовнішніх періодичних збурюючих сил, внаслідок перервності процесу різання, незрівноваженості обертових мас, похибок виготовлення і збирання передач, а також ритмічності роботи поблизу розташованих машин. Вимушені коливання усувають, зменшивши величину збурюючих сил і підвищуючи жорсткість частин верстата.

Автоколивання (незатухаючі коливання, що самопідтримуються) характеризує те, що сили, які підтримують коливальний процес системи, виникають у процесі різання. Збурююча сила створюється і керується самим процесом і після припинення його зникає. Причинами автоколивань системи у процесі різання є зміни величини сил різання і тертя на робочих поверхнях інструментів, а також площі поперечного перетину зрізуваного шару металу; утворення і зриви наростів; пружні деформації заготовки і інструмента.

Автоколивання поділяються за частотними характеристиками на низькочастотні $f = 50 \div 500 \text{ Гц}$ та високочастотні $f = 800 \div 6000 \text{ Гц}$. Коливання з малою частотою зазвичай призводять до появи хвилястих дефектів на поверхні оброблюваної деталі, тоді як високочастотні коливання спричиняють утворення дрібної, майже незримої брижі.

Запобігти виникненню автоколивань можливо шляхом комплексного впливу на процес обробки: зокрема, шляхом коригування режимів різання, зміни геометрії ріжучого інструмента, раціонального розміщення інструмента й заготовки у верстаті, а також переходу до вищих швидкостей різання, що знижують ймовірність самозбудження коливального процесу.

Щоб зменшити ймовірність виникнення автоколивань, вживають заходів для підвищення жорсткості технологічної системи, зокрема конструкції верстата та ріжучого інструмента. Одночасно прагнуть до зменшення маси елементів, що беруть участь у коливальному процесі, особливо маси самої заготовки, яка обробляється. Ефективним методом боротьби з автоколиваннями є також використання віброгасильних пристроїв.

Для придушення автоколивань застосовують різні типи вібропоглинаючих систем: динамічні, пружні, гідравлічні та інші спеціалізовані механізми, які поглинають або розсіюють енергію коливань, запобігаючи їх розвитку та самопідтриманню.

Однак вібрації під час обробки не завжди мають виключно негативний вплив – за певних умов їх можна використовувати з користю для процесу. Зокрема, вібраційна обробка здатна покращити умови різання і якість поверхні, особливо при роботі з важкооброблюваними матеріалами. У таких випадках навмисне створення контрольованих коливань допомагає зменшити силу різання, покращити відведення стружки та знизити зношування інструмента.

Сутність вібраційного різання полягає в тому, що на відміну від вимушених коливань і автоколивань системи у процесі обробки створюються штучні коливання (вібрації) інструмента з регульованою частотою, заданою амплітудою й у заданому напрямку. Джерелами штучних коливань слугують механічні вібратори або високочастотні генератори. Частоту коливань задають від 200 до 20 000 Гц, амплітуду коливань – від 0,02 до 0,002 мм. Параметри коливань, зокрема їх амплітуда та частота, повинні підбиратися відповідно до конкретного методу обробки та заданих режимів різання. Вібрації можуть накладатися як у напрямку подачі, так і вздовж вектора швидкості різання – залежно від цілей процесу та характеру оброблюваного матеріалу. Правильно вибрані параметри коливань забезпечують стабільність процесу і підвищують його ефективність.

1.5. Вплив динамічних параметрів ТОС на процес різання

Процес різання завжди виконується у часі і тому повинен обов'язково розглядатися з урахуванням динамічних явищ, які достатньо повно розглянуті у роботах Ельясберг М. Е. [68], Кудинова В.А. [16], Орликова М. Л. [33], Кедрова С.С. [11], Петракова Ю.В. [24, 44, 45, 46, 47, 48], Струтинського В. Б. [60, 61], Равської Н.С. [54], та ін.

За результатами виконаних раніше досліджень вплив динамічних параметрів ТОС на процес різання можна розділити за наступними наслідками:

- 1) Точність обробки – отримання необхідних геометричних розмірів та відносного розташування поверхонь деталей;
- 2) Макро- та мікро-геометрія обробленої поверхні;
- 3) Якість матеріалу поверхневого шару деталі;
- 4) Стійкість різального інструменту;
- 5) Енергетичні показники процесу різання;
- 6) Акустичні явища;
- 7) Інші наслідки.

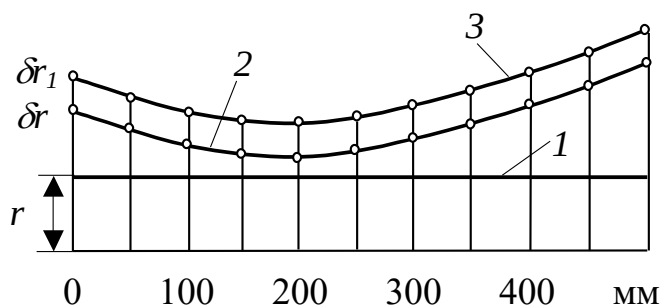
З огляду на спрямованість досліджень, проведених у межах цієї роботи, основна увага буде зосереджена на аналізі наслідків, наведених у першій черзі переліку. Відповідно до отриманих результатів, а також на основі даних машинобудівельної практики, встановлено, що серед джерел похибок найбільший внесок у загальну неточність обробки становлять пружні деформації елементів технологічної системи.

З похибками обробки, що залежать від деформацій технологічної системи, тісно пов'язані такі проблеми, як статичні і динамічні параметри і характеристики ТОС, допустимі і оптимальні режими різання, оптимальна геометрія інструменту, припуск на обробку, нормування жорсткості тощо.

Так, виходячи з теоретичних розрахунків, що виконані на базі статичних залежностей, похибки обробки при точінні з різними способами установки деталі

(рис. 1.7) даються розрахункові залежності для визначення допустимої сили різання за заданою максимальною похибкою.

При цьому не ураховується вплив всіх параметрів як режиму різання так і динамічної пружної системи верстату, що не дає можливості використати такі розрахунки для визначення впливу на похибку обробки та управляти ними з цієї точки зору.



1 – в ідеальному випадку; 2 – при різній жорсткості шпинделя і заднього центру; 3 – при урахуванні жорсткості супорту

Рис. 1.7. Криві викривлення форми деталі при токарній обробці у центрах

Експериментальне дослідження статичних і динамічних деформацій і похибок обробки при перервному і безперервному різанні показало, що всі параметри режиму різання суттєво впливають на параметр якості обробки – точність. Підкреслюється, що це проявляється не тільки у кількісних змінах сили різання, а й зміні їх динамічної дії, а також динамічних властивостей технологічної системи, тобто у змінах якісної картини процесів, що протікають у технологічній системі при різанні. Проте, вплив режиму різання розглядається тільки при перервному різанні, де виявлений значний вплив швидкості різання на динамічні похибки, сталість процесу різання. Такий підхід запропоновано у працях В. Н. Подураєва [49, 50].

Першою роботою, що започаткувала новий підхід до вібрацій верстатів можна вважати роботу В.О. Кудинова [16], що відрізняється вивченням зв'язків верстату і процесу різання. Він довів, що при розв'язанні динамічних проблем у верстатах неможливо відривати будь-який вузол від всієї технологічної системи і пояснювати виникнення коливань тільки цим вузлом.

У роботах М. Е. Эльясберга [68] розширене уявлення про динамічні залежності сили різання від зміни товщини шару матеріалу, що зрізується. Залежності представлені з використанням функції з запізнюючим аргументом. Експериментально отримана величина запізнення для деяких режимів різання металів.

Подальший розвиток вивчення впливу динамічних параметрів ТОС на точність обробки представлений у роботах професора С.С. Кедрова [20]. Він започаткував класифікацію динамічних похибок обробки, у відповідності до якої вони розділяються на чотири групи.

Перша група включає похибки, що залежать тільки від координат обробки або їх похідних за часом. Похибки, що залежать від координати у загальному випадку є статичними, тоді як похибки, що залежать від швидкості або прискорення формоутворюючих рухів є динамічними. Взагалі, розподіл за статичними і динамічними похибками можна вважати досить умовним, бо він передбачає порівняння з динамічними властивостями всієї системи, які змінюються у широкому діапазоні, на що вказує сам автор.

Друга група об'єднує похибки за характером їх залежності у часі. Тут визначаються стаціонарні похибки як такі, що виникають при незмінному векторі швидкості формоутворюючого руху, а також періодичні, закон зміни яких у часі залишається незмінним. Перехідні динамічні похибки провокуються і визначаються різними перехідними процесами у технологічній системі при різанні, що викликані, наприклад, різкими змінами умов різання, чи напрямку формоутворюючого руху.

Третя група включає похибки обробки, що обумовлені кінематичними або геометричними похибками кінематичних ланцюгів верстату, неточністю геометричних розмірів і форми поверхонь, які визначають напрям формоутворюючих рухів.

Четверта група поділяє похибки за їх достовірністю на випадкові залежні і незалежні. У найпростішій ситуації, коли випадкові похибки підпорядковуються

нормальному закону розподілу, їх сумарне значення доцільно визначати за стандартною квадратичною залежністю.

Така класифікація може бути використана для з'ясування причин виникнення динамічної похибки обробки і визначення шляхів її зменшення чи усунення.

Динамічні процеси технологічної оброблювальної системи мають великий вплив на утворення макро- і мікронерівностей на обробленій поверхні. Так, професор В.О. Прилуцький [52] розглядає основну причину утворення хвилястості поверхні як коливання пружної системи, що приводять до розходження заданої і фактичної траєкторій формоутворюючого руху. Він розділяє такі коливання на власні, вимушені, параметричні та автоколивання.

Власні коливання виникають у системі після будь-якого зовнішнього збурення і характеризуються частотою, яка залежить від динамічних параметрів. Розглядається тільки одномасова динамічна модель без урахування самого процесу різання. Вимушені коливання характеризуються як результат дії зовнішніх періодичних сил, що можуть бути обумовлені процесом різання при нерівномірному припуску, обробці перервних поверхонь, багатолезової обробки тощо. Параметричні коливання викликаються періодичною зміною деякого фізичного параметру системи – маси, жорсткості, а автоколивання визначаються без урахування замкненості пружної технологічної системи через процес різання.

Разом з тим розглядається вплив динамічних параметрів технологічної оброблювальної системи на технологічну спадковість. Але автор обмежується тільки впливом на хвилястість і мікрорельєф обробленої поверхні. Робиться висновок про необхідність управління процесом шляхом зміни режиму обробки, або використанням віброгасників.

Подальший розвиток досліджень з динамічних явищ при обробці матеріалів різанням свідчить про все більше застосування амплітудно-фазово частотних характеристик, отриманих експериментально-розрахунковим шляхом. Встановлено, що математична модель відносного переміщення різця і заготовки визначається трьома основними динамічними ланками пружної системи верстата:

1) шпиндельним вузлом у напрямку вісі X; 2) супортом у тому ж напрямку; 3) супортом у напрямку вісі Z. Визначені діапазони частот вільних коливань вузлів токарних верстатів (на прикладі верстату УТ16): шпиндельний вузол 400-600 Гц, супорт 30-60 Гц, станина 100-140 Гц.

Коефіцієнт розсіяння енергії знаходиться у межах 0,1-0,3. На АФЧХ суттєво проявляються два витка відносного коливання різця і заготовки. Перший обумовлений супортом, другий – шпиндельним вузлом. Переважна більшість таких досліджень спрямована на визначення показників сталості технологічної системи і критичних параметрів режиму різання – глибини і ширини шару припуску, що зрізується.

Відома ще одна концепція оцінки точності виготовлення деталей [69, 70, 71]. Вона дозволяє оцінити ступінь впливу параметрів технологічної системи в процесі обробки на точність. Однак розроблена програма в своїй основі спирається на залежності у статиці, а динамічні явища представлені через використання траєкторій відхилень осі шпинделя (биття), отриманих експериментально, у різних поперечних перерізах уздовж довжини деталі.

В результаті створена програма “ТТМdiagnostic”, за допомогою якої вперше була отримана розрахунковим шляхом віртуальна деталь, що побудована за перерізами при тонкому точінні.

Доведено, що формування точного відносного положення між інструментом і заготовкою, необхідного для стабільного формоутворення, значною мірою визначається динамічними чинниками, які діють у складі технологічної обробної системи (ТОС) під час процесу різання. Цей вплив особливо помітний при обробці заготовок із нерівномірним припуском, а також у спеціалізованих видах токарної обробки, зокрема при токарно-копіювальних операціях. У таких випадках ТОС постійно зазнає періодичних збурень, зумовлених, наприклад, варіаціями глибини припуску у поперечних перерізах деталі, що істотно ускладнює забезпечення сталої точності.

Доведено, що формування точного відносного положення між інструментом і заготовкою, необхідного для стабільного формоутворення, переважно

визначається динамічними чинниками, які діють у складі технологічної системи в процесі різання. Цей вплив помітно проявляється при обробці заготовок із нерівномірним припуском. У таких випадках технологічна система постійно зазнає періодичних збурень, зумовлених, наприклад, варіаціями глибини припуску у поперечних перерізах деталі, що істотно ускладнює забезпечення сталої точності.

Компенсація таких похибок може бути досягнута за методиками, запропонованими у роботах або при використанні активного контролю. Для підвищення точності прогнозування якісних параметрів виготовлення деталей важливо враховувати динамічні властивості технологічної системи, які проявляються безпосередньо в процесі обробки та визначають рівень технологічної спадковості, зумовленої пружними деформаціями елементів системи, і змінюються в залежності від координати формоутворювального руху. Їхній вплив істотно позначається на точності кінцевої геометрії деталі, особливо при складних або змінних умовах різання.

Практично всі дослідники динаміки процесу різання підтверджують великий вплив динамічних параметрів на стійкість різального інструменту. Отримані експериментальні дані однозначно підтверджують, що з підвищенням амплітуди автоколивань спрацювання різальних інструментів зростає, але частота впливає неоднозначно: низькочастотні коливання (до 150 Гц) починають впливати лише при амплітудах вищих за 35-40 мкм, тоді як із збільшенням частоти темпи спрацювання різко зростають.

Робиться висновок про неприпустимість автоколивань при різанні тому, що це приводить до значного погіршення якості обробки.

1.6. Методи поліпшення динаміки технологічних систем

Прискіпливе вивчення питання поліпшення динаміки технологічних систем, дозволило встановити наступні шляхи:

- збільшення жорсткості конструктивних елементів верстата, що дозволяє зменшити деформації та підвищити стабільність обробки;

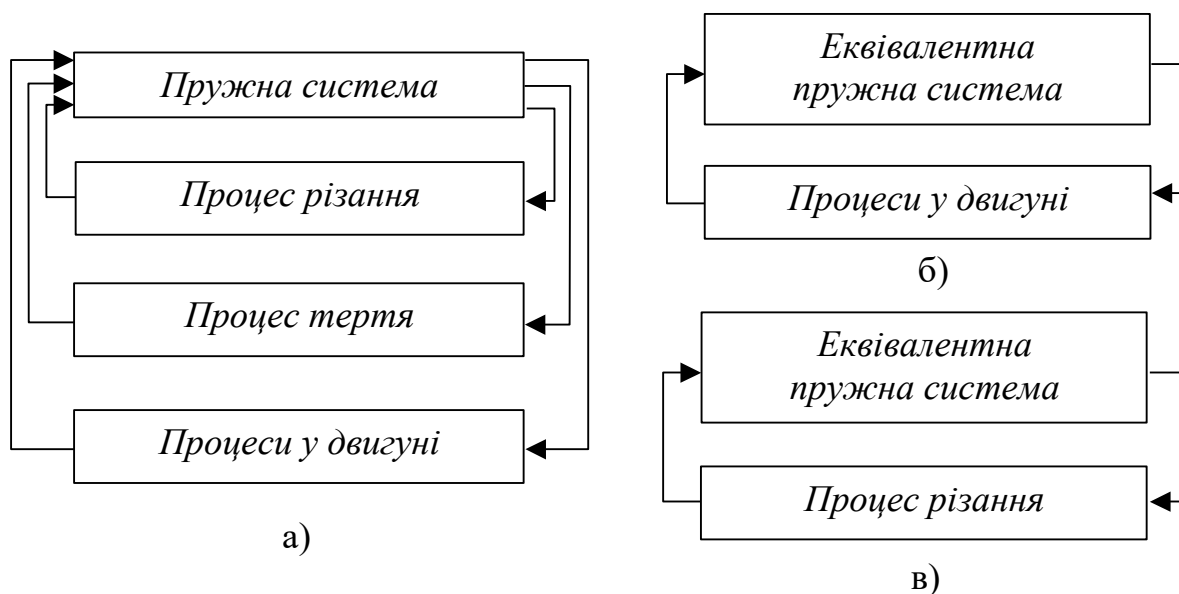
- зменшення маси рухомих частин у поєднанні з підвищенням демпфувальних властивостей, що сприяє зниженню амплітуди коливань;
- активне управління жорсткістю технологічної системи, зокрема адаптація до змін у процесі обробки.
- оптимізація режимів різання, що дозволяє зменшити збудження коливань і стабілізувати силовий вплив;
- застосування засобів динамічного гасіння коливань для локалізації і пригнічення вібраційних процесів у системі.
- раціональне проектування динамічних характеристик пружної системи верстата, з урахуванням її природних частот, демпфування і масоінерційних властивостей.
- комплексна реалізація цих заходів забезпечує істотне підвищення точності та надійності обробки.

Помічено, що основні особливості динамічної системи верстату полягають у її замкненості і багатоконтурності. Робочі процеси взаємозв'язані через пружну систему, проте, у кожному випадку можливо ураховувати тільки найбільш сильні зворотні зв'язки.

Таким чином, можна перейти до уявлення еквівалентної динамічної системи як одноконтурної замкненої (рис. 1.8). Так при розв'язанні задач, пов'язаних з вибором або дослідженням впливу привода на роботу верстата, можна представляти еквівалентну пружну систему, що взаємодіє з процесами у двигуні, а при розв'язанні технологічних завдань, аналізі та розрахунку режиму різання зручно перейти до системи, складеної з еквівалентної пружної системи та процесу різання.

Таке уявлення дало можливість перейти від якісного вивчення динамічних процесів до їх кількісного представлення і таким чином значно просунутись по шляху підвищення вібросталості верстатів.

Однак, ураховуючи складність процесу різання як елемента замкненої технологічної системи, а також неможливість теоретичного визначення такого важливого параметру динамічної системи як коефіцієнту затухання коливань чи демпфірування, для отримання математичної моделі ТОС при різанні одночасно застосовують теоретичні та експериментальні методи досліджень.



а) – багатоконтурна, б), в) – еквівалентні одноконтурні

Рис. 1.8. Динамічна система верстату

Завдяки такому підходу вдалося визначити амплітудно-фазово частотні характеристики верстатів при різанні та знайти динамічну характеристику процесу різання. Це дало можливість розробити методику визначення параметрів динамічного гасника коливань, який може значно покращити динамічну якість всієї пружної технологічної системи.

Оскільки математична модель є суттєво нелінійною для розв'язання такої задачі використовують чисельні методи з застосуванням комп'ютера.

Визначено що застосування вірно розрахованого динамічного гасника коливань приводить до зменшення площі, яка охоплюється АФЧХ системи та наближення графіка до початку координат, з набуттям додаткового витка. Це свідчить про зменшення амплітуди коливань та зрушення у фазовій характеристиці.

Усунення неприпустимих коливань та забезпечення сталості процесу різання (а значить і необхідної точності обробки) досягається за рахунок зменшення амплітуди коливань впливів, що збурюють, раціональною побудовою технологічних процесів, оптимальними законами рухів робочих органів, раціональним підбором характеристик пружних і демпфіруючих властивостей технологічної системи.

Зменшення амплітуди збурень та раціональна побудова технологічного процесу означає певну стабілізацію процесу обробки. Обробка на занижених режимах застосовується для зменшення коливання сили різання. Цим досягається підвищення точності обробки за рахунок зменшення похибок, що виникають в результаті модифікацій сили різання. Обробка у декілька проходів, що виконуються на одному й тому ж верстаті, на різних верстатах однієї і тієї ж конструкції чи призначення і на різних типах верстатів завдяки зменшенню припуску на кожному проході, а значить і коливання сили різання, забезпечує покращення якості обробки, зокрема точності.

Ці шляхи зв'язані з втратами штучної продуктивності та збільшенням собівартості з причини збільшення часу обробки особливо при використанні декількох верстатів. Ще однією вадою цих методів є те, що чим більш високу точність деталі вимагається забезпечити, тим більше кількість проходів та різних верстатів для цього необхідно, а значить із зменшенням допуску, тобто із збільшенням точності, що вимагається, зростає відносна собівартість деталі, що характеризує відповідна діаграма наведена у роботі

Традиційний підхід зменшення маси рухомих вузлів і підвищення їх жорсткості безумовно завжди дає позитивний результат, проте у більшості випадків він вже себе вичерпав. Підходи, засновані на забезпеченні певного динамічного балансу у системі, яка може розглядатись як складена з кількох мас, при проектуванні верстатів та верстатних пристроїв вважаються найбільш перспективними, однак їх застосування доцільне при складних схемах вузлів, що виконують формоутворюючий рух.

Підходи, що використовують спеціальні пристрої для компенсації та корегування динамічних явищ, наприклад, динамічні компенсатори коливань, дають позитивний ефект при точному розрахунку їх параметрів. Спеціально створені системи, (сюди ж можна віднести так звані системи автоматичного підналагоджування призначені для гнучкого регулювання динамічних параметрів ТОС не знайшли широкого застосування у виробництві і поки що неспроможні корегувати швидкоплинні процеси у металообробці

1.7. Інструменти з ефектом гасіння коливань

Існують різноманітні технічні засоби для гасіння коливань у технологічних системах, які можна класифікувати відповідно до напрямів покращення їхньої динамічної якості. Залежно від принципу дії такі пристрої поділяють на кілька основних категорій:

- пристрої для підвищення демпфірування, що сприяють розсіюванню енергії коливань і зменшенню їх амплітуди;
- системи, які генерують сили, рівні за величиною та протилежно спрямовані до збурюючих сил, – таким чином досягається часткове або повне скасування зовнішніх впливів;
- комбіновані пристрої, що поєднують кілька принципів дії для досягнення більшої ефективності;
- активні системи, які керуються в режимі реального часу з використанням датчиків і виконавчих механізмів;
- пасивні системи, що не потребують зовнішнього керування й працюють за рахунок внутрішніх властивостей матеріалів чи конструкції.

Вибір типу пристрою залежить від специфіки обробки, типу обладнання та умов виникнення коливань.

В процесі обробки деталі у патроні [52] між дисками, що закріплені на патроні розміщують пружні демпфіруючі елементи з високополімерних матеріалів, а між ними – масу гасника. Коливання на резонансній частоті, що раніше мали амплітуду 5,3 *мкм* після застосування такого динамічного гасника зменшились до 0,6 *мкм*. Границя сталості за глибиною різання збільшена з 3 до 7 *мм*. Віброгасники широко застосовують при розточуванні (рис. 1.9). Додаткові маси 1 з'єднують з розточувальною оправкою демпфіруючими прокладками 2, або розміщують з зазором 3. Енергія розсіюється за рахунок удару маси гасника і оправки, причому маса гасника утричі менша за масу оправки.

Також при розточування важливо забезпечити достатню стійкість різального клину [17], особливо при розточуванні отворів, що мають

Підбір амплітуди, що забезпечує мінімізацію вібрацій ріжучого інструмента, здійснюється за допомогою екстремального пошукового регулятора. Такий регулятор складається з аналізатора екстремуму (АЕ), пошукового пристрою крокового типу (УП) і виконавчого механізму (ВП), що регулює амплітуду коливань на виході підсилювача потужності. Уся система функціонує під керуванням логічного модуля управління (УУ), який визначає послідовність виконання операцій.

Проте запропонована система автоматичного регулювання має низку суттєвих недоліків, які обмежують її застосування у виробничих умовах. По-перше, система є надмірно складною: вона потребує великої кількості функціонально пов'язаних блоків, що мають працювати у чітко скоординованому режимі. По-друге, використання адаптивних методів, зокрема екстремального пошуку, призводить до зниження швидкодії – що є критичним недоліком, оскільки динамічні процеси в технологічній системі мають високу частоту через властивості пружних елементів верстатів [47]. У результаті система не встигає оперативно реагувати на швидкі зміни коливань, що унеможлиблює ефективне керування в реальному часі.

Щодо практичного зменшення хвилястості поверхні деталі, яка виникає під впливом коливань ТОС, ефективними заходами є модифікація конструкції ріжучого інструмента, оптимальний вибір просторової орієнтації ріжучих кромок, а також правильне позиціонування інструмента відносно еліпса жорсткості пружної системи. Ці заходи дозволяють зменшити амплітуду збурень та покращити якість обробленої поверхні.

Так, у схемі, наведеної на рис. 1.11, *а* при прогині різця, коли його вершина розташована нижче нейтральної осі, задня поверхня інструмента не врізається в оброблювану деталь. У такій конфігурації змінна контактна сила, що діє на задню грань, не стимулює розвиток коливань, а навпаки – сприяє їх приглушенню. Це створює сприятливі умови для зменшення вібрацій, оскільки відсутня зворотна сила, що могла б підтримувати автоколивання системи.

За такою ж системою працюють конструкції токарних різців К.В. Лакури та модульних пристроїв [5, 65, 66], пружні різці тощо (рис. 1.11, б). Якщо зорієнтувати різець забезпечивши узгодженні напрямків основних сил різання P_y та P_z з осями максимальної жорсткості технологічної системи, вібростійкість технологічного процесу суттєво підвищується (див. рис. 1.11, в).

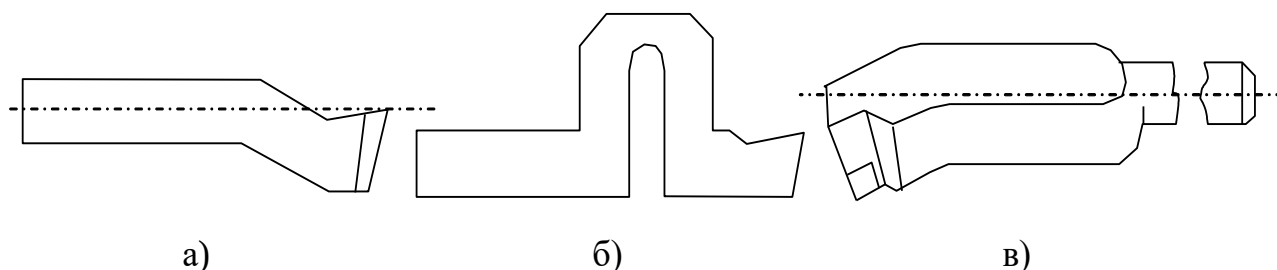


Рис. 1.11. Особливості складу вібросталих токарного інструменту

Першим створювати динамічні гасники коливань запропонував А. П. Соколовський. Він розробив та виготовив гідравлічні демпфери, принцип дії яких базувався на властивостях гідродинамічного опору. Суть роботи таких пристроїв полягає в тому, що при русі рідини через вузький канал опір змінюється залежно від швидкості потоку: на низьких швидкостях опір незначний, проте при зростанні швидкості – що характерно для умов вібрацій – опір суттєво зростає. Це дозволяє ефективно гасити коливання без необхідності підвищення загальної жорсткості технологічної системи. Проте через складність експлуатації та обмеження у практичному використанні гідравлічні демпфери залишилися на рівні дослідницьких пристроїв, що застосовувались для аналізу та вивчення можливостей вібраційного демпфірування.

Ефективним для покращення дії динамічних гасників є розділення масивного вантажу, що поглинає енергію коливань, на кілька частин (рис. 1.12). Такий підхід дозволяє точніше налаштувати систему на гасіння вібрацій у широкому діапазоні частот. Застосування подібних конструкцій особливо доцільне при розточуванні глибоких отворів, коли навіть використання додаткових шпинделів не дає очікуваного результату в боротьбі з вібраціями [51].

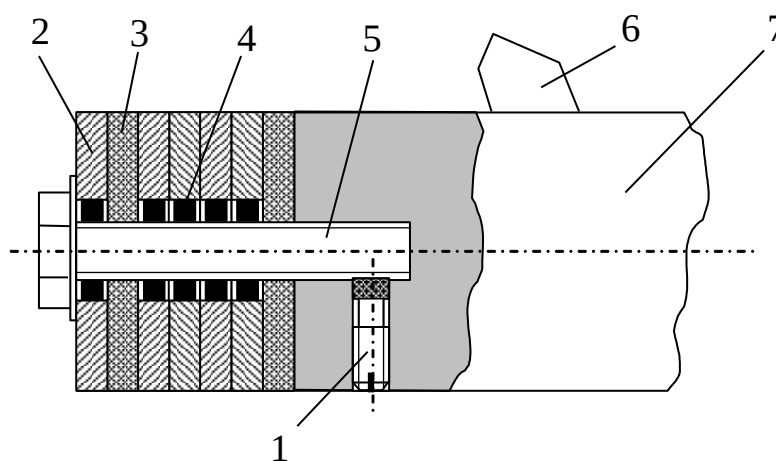


Рис. 1.12. Борштанга з різцем, що має регульований віброгасник

Конструкція віброгасника для борштанги 7 з установленим на ній різцем 6 передбачає використання регульовального гвинта 5, на якому розміщені кільця 2. Між цими кільцями та гвинтом розташовуються гумові втулки 4. Уся система – набір кілець 2 з проміжними гумовими елементами 3 – стискається гвинтом 5, що дозволяє змінювати силу затиску та, відповідно, характеристики демпфування. Після налаштування гвинт 5 фіксується від мимовільного розкручування за допомогою стопорного гвинта 1, мідної прокладки та пружного кільця.

Результати випробувань цієї конструкції продемонстрували суттєве зниження рівня вібрацій під час обробки. Унаслідок цього зменшується шорсткість обробленої поверхні, що безпосередньо покращує загальну якість механічної обробки.

1.8. Конструкції інструменту з можливістю компенсації пружних деформацій

Розвиток систем адаптивного управління, в тому числі і призначених для токарних операцій, відбувався двома шляхами: перший з них передбачає стабілізацію відповідних складових сил різання і в кінцевому рахунку розміру обробки; другий – повну або часткову компенсацію деформацій, що викликані технологічним навантаженням на технологічну систему в процесі обробки, в напрямку формоутворення. Розвитком систем адаптивного управління займалися Б.С. Балакшин [2], Б. М. Базров [4], М. С. Невельсон [3, 30], Гейлер З.Ш. [6], Ю. М. Соломенцев [56], О. В. Лисенко [10, 26] та ін.

Дослідниками та конструкторами для реалізації вказаних шляхів була запропонована широка гама конструктивних рішень від складних, розгалужених систем управління параметрами процесу обробки (наприклад, величиною подачі, швидкістю головного руху і т. п. у функції технологічного навантаження, крутильного моменту і т.д.).

Як показала практика машинобудівних заводів складні та розгалужені системи автоматичного управління через складність виготовлення, налагодження та експлуатації, велику собівартість та неможливість застосування при переналагоджуванні обладнання на випуск інших деталей не знайшли широкого застосування.

Розглянемо існуючі конструктивні рішення інструменту, призначені для токарної обробки та реалізують вказані шляхи підвищення точності для цих операцій. На рис. 1.13 представлений приклад механізму, що дозволяє компенсувати технологічну силу різання P_y , таким чином, щоб зробити ТОС не чутливою до впливу цієї складової на вихідну точність обробки [37, 38].

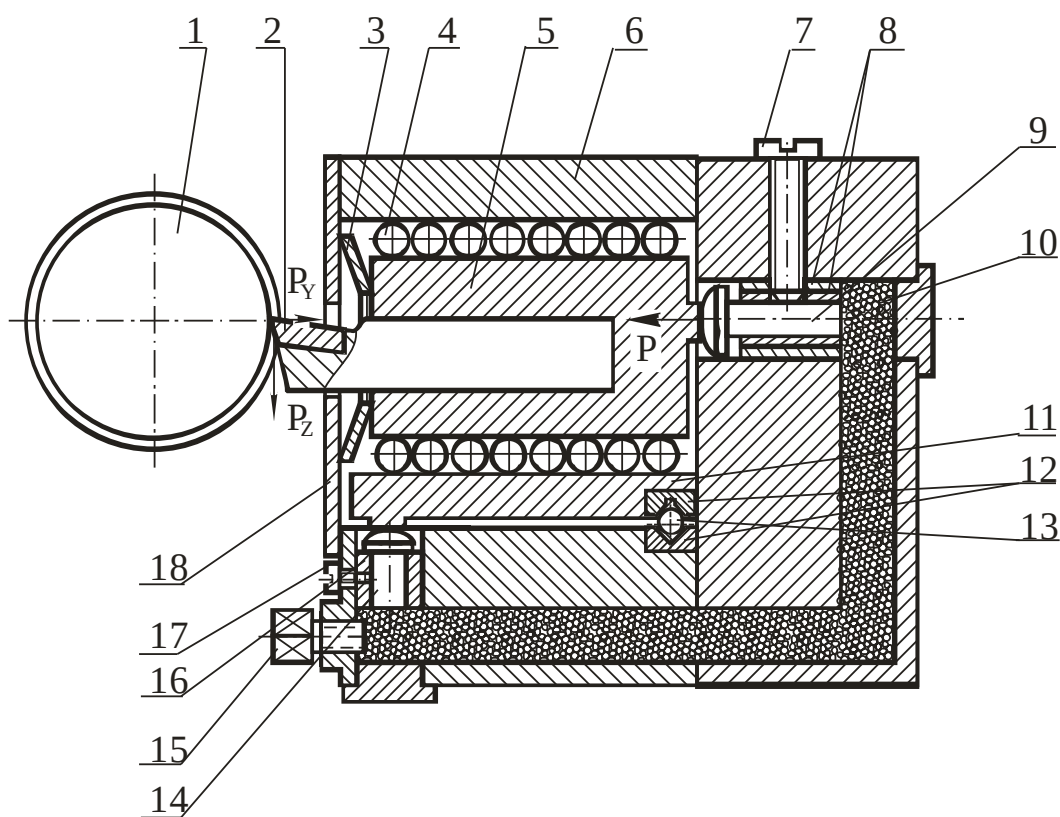


Рис. 1.13. Пристрій, що дозволяє підвищити точності токарної обробки шляхом стабілізації складової сили різання P_y

У напрямку дії складової P_Z різцетримач спирається на плиту 11. Один кінець якої через призми 12 і ролик 13 спирається на корпус 6. Другий кінець плити 11 спирається на плунжер 14 і під впливом складової P_Z створює тиск в системі сполучених циліндрів, заповнених кульками 10, внаслідок чого плунжер 9 натискає на різцетримач силою P , направленої назустріч складовій P_Y . При їх рівності сила P компенсує складову P_Y і при незмінному співвідношенні P_Z і P_Y робить систему не чутливою до дії складової P_Y , що визначає розмір обробки. Для рівності сили P і складовою P_Y діаметри плунжерів підібрані таким чином, що співвідношення площ їх перетину рівне відношенню сил P_Z і P_Y .

Для настройки системи при зміні геометрії і інструменту, оброблюваної і т.п. (у випадках, коли міняється величина співвідношення складових P_Z і P_Y) встановлені перехідні втулки 8 і 16, які за допомогою гвинтів 7 і 17 можуть закріплюватися на корпусі або упираючись в буртик плунжерів 9 і 14 з'єднуватися з плунжерами. Це забезпечує зміну співвідношення діаметрів плунжерів за умов обробки, що змінилися. Попередній тиск в системі створюється гвинтом 15.

1.9. Інструменти з системами управління положенням різальної частини

На основі проведеного огляду існуючих рішень [20, 21, 36, 40, 41, 42, 43], зазначимо, що для досягнення мети підвищення точності на токарній операції і таким чином скорочення необхідної кількості технологічних операцій технічні рішення повинні відповідати ряду наступних вимог:

- гасити коливання, що виникають у процесі обробки;
- компенсувати пружну деформацію ТОС, що виникає під час обробки, у напрямку утворення розміру обробки;
- бути по можливості простими в реалізації та експлуатації;
- використовувати значну кількість стандартних деталей;
- не вимагати модернізації та переоснащення існуючого верстатного обладнання.

Вказаним вимогам відповідають конструкції інструментальних пристроїв, призначених для токарної обробки, наведені у роботі [1].

Проаналізуємо, можливості інструментів, побудованих на основі розглянутих схем. Схема конструкції різця з горизонтальним пазом зображена на рис. 1.14. Різець складається із корпусу 1, головки 2 з вершиною 3, що поєднує грані та кромки, відкритого поперечного паза 4, неметалевого еластичного наповнювача 5, жорсткого упора 6, регулювального повздовжнього гвинта 7, пружини 8.

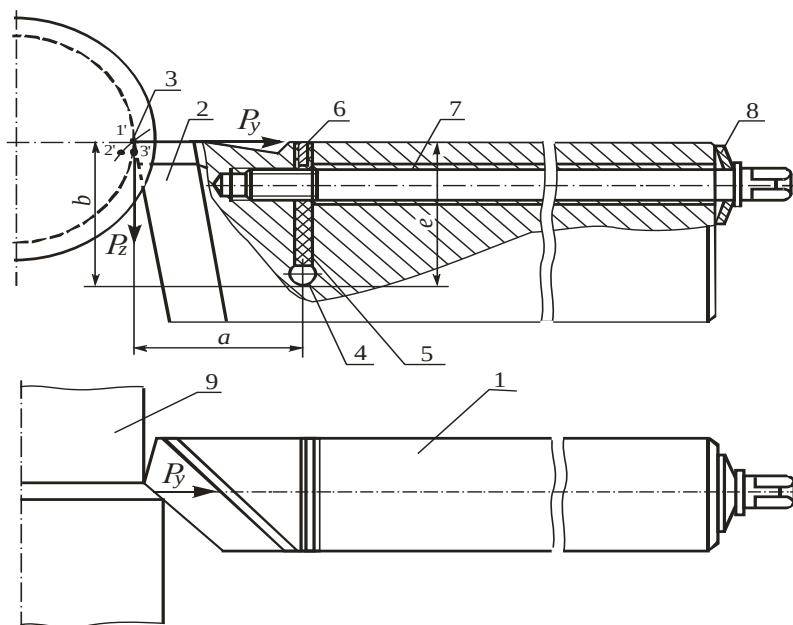


Рис. 1.14. Конструкції різця з регульованою різальною частиною

У корпусі 1 виконаний відкритий поперечний паз 4. Паз 4 заповнений неметалевим еластичним наповнювачем (гумою) 5. Корпус 1 споряджений регулювальним гвинтом 7, який знаходиться у повздовжньому отворі, який виконаний у тілі різця, спирається на тарілчасту пружину 8 та поєднує головку різця 2, з корпусом 1, які відокремлені повздовжнім поперечним пазом 4. Регулювальному гвинту 7 передається сила попереднього натягу пружини.

В процесі обробки деталі 9 виникають сили різання P_Z і P_Y , завдяки яким відбувається деформації технологічної системи верстата. Величина цієї деформації залежить від пружної податливості технологічної системи верстата та значення сил різання. В свою чергу сили різання залежать від вихідних параметрів обробки. Зміна цих параметрів призводить до зміни величини відтиснення у радіальному напрямку технологічної системи верстата, що

приводить до зниження точності обробки. В процесі обробки складова сили різання P_Z віджимає головку, яка утримує різальну кромку. В результаті вершина 3 різця переміщується при обробці заготовки 9 з точки 1' у точку 2'. Одночасно з цим складова сили різання P_Y деформує технологічну систему верстата у радіальному напрямку та переміщує вершину 3 різця з точки 2' в точку 3'. Наявність відкритого поперечного паза 4 дозволяє у процесі обробки компенсувати пружну деформацію технологічної системи верстата під дією радіальної складової сили різання P_Y .

Жорсткість різця попередньо регулюється гвинтом 7, щоб різець не деформувався мінімально можливою для даного настроювання силою P_Z . Різець працює як звичайний з жорстким кріпленням змінної твердосплавної пластинки.

Зі зростанням технологічної сили P_Z відбувається пружна деформація різця, т. б. головка різця 2 починає додатково віджиматись в бік деталі 9, що обробляється, в результаті чого відбувається переміщення вершини 3 різця із точки 1' у точку 2', а значить відбувається зміщення вершини різця 3 у радіальному напрямку у тіло деталі 9, що обробляється. При віджиманні головки 2 відбувається переміщення повздовжнього регулювального гвинта 7 у напрямку зміщення головки 2 різця.

На рис. 1.15 зображена схема конструкції різця з принциповою схемою системи управління положенням різальної частини в процесі різання, в залежності від технологічного навантаження. Різець складається з корпусу 1, що має поперечний паз 2, у якому встановлений датчик 3, наприклад п'єзоелектричний, який вимірює величину радіальної (P_Y) складової сили різання. У корпусі різця виконаний також поперечний паз 4, у якому встановлений механізм малих переміщень, який виконаний у вигляді п'єзoeлемента 5, що забезпечує поворот різця у поздовжній площині (площині дії складових зусиль різання P_Z і P_Y , що виникають при обробці деталі 11). У поздовжньому отворі, який виконаний у тілі різця, знаходиться регулювальний гвинт 6, що поєднує головку різця 7 з корпусом 1. Система управління включає у себе задавальний пристрій 8, порівняльний пристрій 9, перетворювач 10 і механізм малих переміщень 5 (п'єзoeлемент).

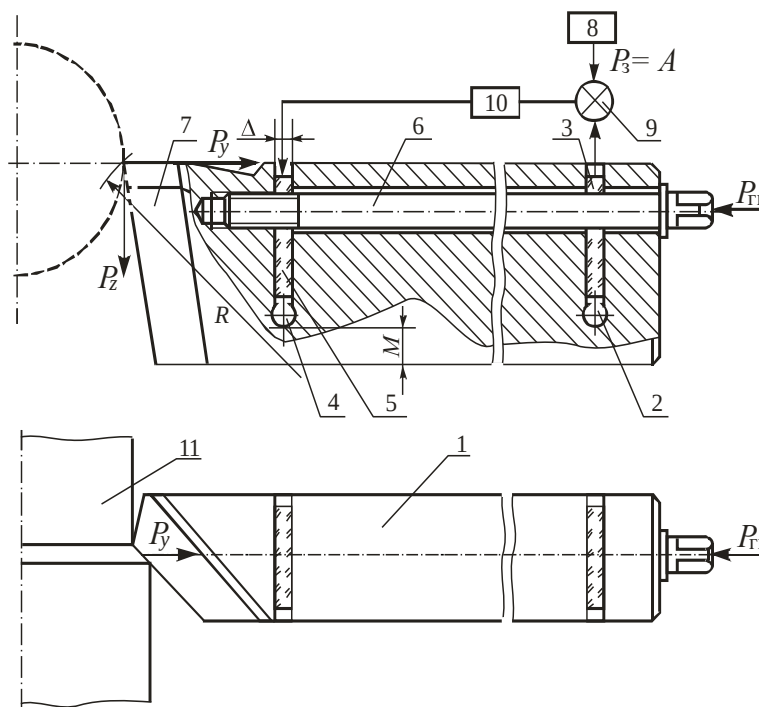


Рис. 1.15. Схема конструкції різця з принциповою схемою замкнутої системи

Перед початком обробки відбувається попереднє балансування порівняльного пристрою 9 у поєднанні з датчиком 3 і задавальним блоком 8. На п'єзоелемент 5 при цьому подається вихідний сигнал від перетворювача 10. На даному етапі складові сили різання $P_Z = P_Y = 0$, тому вони не чинять впливу на показання датчика 3. Попереднє зусилля $P_{ГВ}$, яке реєструється датчиком 3, налаштовується за допомогою регулювального гвинта 6. Порівняльний пристрій отримує два вхідних сигнали: від сили навантаження корпусу 1 різця ($P_{ВИХ} = P_{ГВ}$) та від задавального пристрою у вигляді постійного сигналу ($P_3 = A$).

У процесі обробки деталі 11 починають діяти сили різання, зокрема компонента P_Y , яка спрямована на датчик 3 і викликає відправку сигналу в порівняльний пристрій 9. Виникаючі сили, включаючи P_Y , спричиняють деформацію технологічної системи. Водночас у порівняльний пристрій надходить стабільний сигнал від задавального пристрою 8 ($P_3 = A$).

У випадку, коли сила P_Y разом із деформацією перевищує задану межу, яка визначається пристроєм 8, сумарне зусилля на датчику зменшується ($P_{\Sigma} \neq P_{ВИХ}$; $P_{\Sigma} = P_B - P_Y$). У відповідь датчик через порівняльний блок 9 формує сигнал, який подається на перетворювач 10. Останній, у свою чергу, активує механізм точного

позиціонування п'єзоелемента 5. Зміною розміру Δ , п'єзоелемент здійснює обертання головки інструмента 7 навколо пружного елемента М по радіусу R (див. рис. 1.15), що компенсує виниклі деформації в технологічній системі та забезпечує стабілізацію розміру оброблюваної поверхні.

Наведені вище приклади конструкцій інструментів для токарної обробки мають внаслідок конструктивних особливостей здатність для покращення якості різання через компенсування деформації технологічної системи, що виникає внаслідок дії технологічного навантаження, їх застосування не вимагає модернізації чи переоснащення існуючого верстатного обладнання.

Тим не менше, побудова конструкції інструменту за подібною розглянутим схемою буде перспективним. Оскільки реалізовані за цими схемами конструкції інструментів, одночасно виступають компенсатором коливань та дозволяють частково або повністю компенсувати пружну деформацію технологічної системи, підвищуючи таким чином точність обробки.

Висновки, формування мети та задач дослідження

Ретельний аналіз науково-технічної літератури, практичний досвід у сфері виробництва та результати попередніх досліджень однозначно підтверджують, що проблема покращення якості обробки поверхонь залишається надзвичайно актуальною. Особливо це стосується токарної обробки внутрішніх поверхонь, де досягнення необхідного рівня шорсткості є одним із ключових технічних викликів, що безпосередньо впливає на функціональність і довговічність деталей.

Шорсткість поверхні є однією з ключових характеристик, що наряду з точністю визначає якість обробки, і часто виступає головною технічною вимогою до готової деталі. Її значення зумовлене впливом на зносостійкість, контактні властивості, точність спряження та загальну експлуатаційну надійність виробу. Тому пошук ефективних методів зниження шорсткості при точінні є актуальним напрямом як наукових досліджень, так і виробничих удосконалень.

Беручи до уваги тему роботи, було розглянуто різні фактори, які впливають на якість обробки: вібрації, величина припуску, дефектний шар, фізико-

механічних властивостей матеріалу, похибка базування, теплові деформації, спрацювання інструменту, жорсткість системи тос

Отже, **метою роботи** є забезпечення необхідної якості обробки покращенням динамічних властивостей технологічної системи в процесі розточування, шляхом внесення компенсуючого елемента в конструкцію розточувального інструменту.

Щоб досягти сформульованої мети, необхідно вирішити такі **задачі**:

1. Проаналізувати параметри якості обробки та фактори, які на них впливають;
2. Виконати моделювання пружної технологічної системи в процесі розточування;
3. Розробити конструкцію розточувального інструмента, з компенсуючим елементом;
4. Дослідити процес розточування, з урахуванням особливостей розробленої конструкції розточувального інструменту;
5. Перевірити ефективність застосування розробленого розточувального інструменту в реальному технологічному процесі;
6. Розрахувати економічну ефективність результатів проведених досліджень.

Об'єкт дослідження – процес розточування.

Предмет дослідження – зміна динамічних властивостей технологічної системи в процесі розточування.

2. НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1. Аналіз процесу розточування

Дослідження будь-якого процесу, в тому числі і процесу розточування внутрішніх отворів, як наскрізних так і глухих, на верстатах токарної групи, та управління цим процесом найбільш варто виконувати шляхом використання математичного моделювання. Моделювання дозволяє встановити з високим ступенем точності взаємозв'язок між вхідними величинами (управляємими факторами), збуреннями та вихідними величинами (метою управління).

Математична модель даної фізичної системи повинна давати математичний опис певних об'єктів та співвідношень між ними, що представлені у простому та зручному вигляді, проте відбивають найбільш суттєву інформацію про властивості реальної фізичної системи.

Про моделюванні необхідно чітко означити для даного процесу вхідні величини, збурення та вихідні величини. Крім того, проаналізувати схему динамічних навантажень інструмента в процесі роботи.

Аналіз, проведений у першому розділі, свідчить про те, що для досягнення високої якості обробки при розточуванні необхідно забезпечити стабільну взаємодію між інструментом і заготовкою. При різанні в технологічній системі виникають вібрації, які суттєво знижують ефективність обробки: зменшується продуктивність, погіршується зносостійкість інструмента та різко погіршується якість поверхні – точність зменшується, а шорсткість зростає.

Найбільшою загрозою стабільності процесу є автоколивання – незатухаючі механічні коливання, що виникають у результаті специфічного перерозподілу енергії різання в межах самої технологічної системи. Виникнення автоколивань зумовлено факторами: змінами сил тертя, нестабільним демпфіруванням, утворенням та зривом наростів на ріжучій кромці, появою стружки надлому тощо. Принципово, що такі коливання не потребують зовнішнього збурення, а підтримуються за рахунок енергії, яку продукує та розподіляє сама технологічна система в процесі обробки.

Досягнення ключових кількісних характеристик геометричних і фізико-механічних параметрів отвору забезпечується протягом усього процесу обробки, що реалізується в рамках функціонування технологічної системи, яка охоплює усі елементи – обробний центр, затискне пристосування, різальний інструмент та деталь. Між зазначеними компонентами відбувається постійна динамічна та кінематична взаємодія, яка формує умови різання та безпосередньо впливає на якість кінцевого результату обробки [18, 19, 25].

У якості вхідних параметрів технологічної системи, що визначають її функціональні можливості та здатність забезпечувати необхідну якість обробки, належать:

- характеристики верстатного обладнання: тип і модель обладнання, потужність приводу, діапазони частот обертання і подач, клас точності, показники жорсткості конструкції та вібростійкості;

- параметри технологічного оснащення: характеристики пристосувань, механізованих і автоматизованих пристроїв, а також промислових роботів, які беруть участь у технологічному процесі;

- властивості заготовки: тип і марка матеріалу, його хімічний склад і механічні характеристики; вихідні похибки форми, розмірів, взаємного розташування поверхонь; стан поверхневого шару;

- експлуатаційні параметри різального інструмента: міцність, зносостійкість, стійкість до високих температур, характер і ступінь зношування, а також точність інструменту;

- значення режимів різання: швидкість, подача, глибина різання та інші технологічні параметри;

- початкові налаштування: встановлений розмір налагодження, який задається перед початком процесу обробки;

Разом з тим, у процесі функціонування на технологічну систему діє ряд збурюючих чинників, що призводять до відхилень від початково заданих умов і які впливають на якість-точність:

- пружні деформації елементів системи, що виникають під дією навантажень;

- знос ріжучого інструмента, який змінює геометрію різальної кромки;
- теплові деформації конструктивних елементів технологічної системи, що виникають у результаті роботи;
- похибки при встановленні заготовки у затискному пристосуванні;
- похибки корекції налагоджувального розміру, які виникають на етапі підготовки операцій обробки;
- похибки вимірювання, пов'язані з неточністю контрольного обладнання;
- геометричні відхилення профільного або мірного інструменту;
- похибки, спричинені перерозподілом внутрішніх залишкових напружень у заготовці.

– коливання окремих елементів системи, зокрема при резонансних режимах.

Врахування всіх зазначених входних і збурюючих факторів є необхідною умовою для побудови адекватної моделі процесу та ефективного керування якістю обробки.

Елементарні складові, що формують відхилення геометричних параметрів і визначають якість поверхні отвору під час механічної обробки, можуть включати будь-яку комбінацію наведених нижче характеристик:

$$\Delta_{\Sigma} = f(K, \varepsilon, \Delta_Y, \Delta_H, \Delta_I, \Delta_M, \Delta_{ГТ}, \Delta_T, \Delta_S, \Delta_{ГН}, \Delta_{ЗН}, \Delta_K, \sum \Delta_{\Phi}, \Delta_{КОЛ}, \Delta_{РІЗ},), \quad (2.1)$$

де K – позначення кінематики робочих рухів при різанні;

ε – відхилення, що виникає при відхиленні встановлення заготовки;

Δ_Y – похибки внаслідок деформації технологічної системи;

Δ_H – відхилення, через неідеальне налагодження на обробку;

Δ_I – похибки через знос обробного інструменту;

Δ_M – похибки через неточності властивостей обробного матеріалу;

$\Delta_{ГМ.ІН.}$ – похибки, через геометричні відхилення обробного інструмента;

Δ_T – похибки, внаслідок температурних деформацій технологічної системи;

Δ_S – похибки через неправильні режими обробки;

$\Delta_{ГН}$ – похибки, внаслідок геометричних відхилень обладнання;

Δ_{3H} – похибки, внаслідок внутрішніх напружень, які залишилися;

Δ_K – відхилення в наслідок неточностей контролів;

$\sum \Delta_\phi$ – похибка, що є сумою відхилень форми заготовки;

$\Delta_{КОЛ}$ – відхилення, викликані коливаннями технологічної системи;

$\Delta_{PIЗ}$ – похибка, яка з'явилась в процесі обробки різанням.

Наведенні останніми два параметри впливають на виникаючу похибку та визначають саму можливість стабільного здійснення процесу різання відповідно до заданих технологічних параметрів. Їх критичний вплив може обмежувати або унеможливлувати досягнення запроектованої якості (точності) обробки.

Особливості кінематичної схеми процесу розточування глухих та наскрізних отворів [76] у деталях реалізується двома основними методами: в першому при обробці головний рух різання, в даному випадку обертовий, здійснюється заготовкою, а в другому – інструментом. Як правило, головний рух обертання заготовки притаманний при обробці на горизонтальних обробних центрах або верстатах токарної групи. Інструмент для точіння внутрішніх поверхонь забезпечує виключно повздовжній рух подачі. Схема силових та кінематичних параметрів при розточуванні отворів приведені на рис. 2.1.

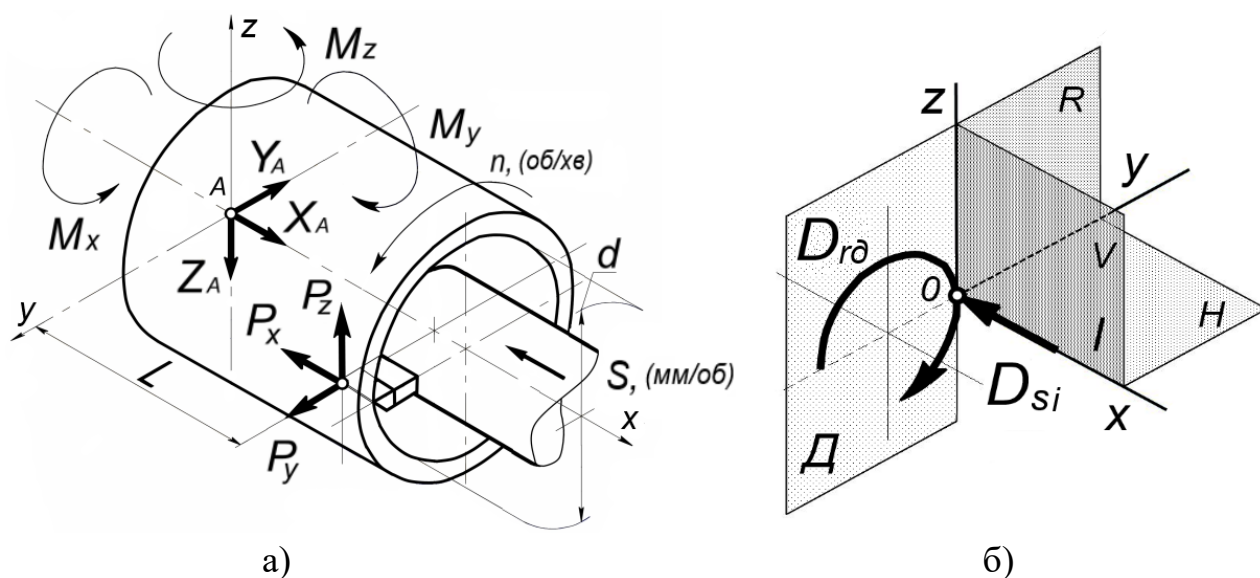


Рис. 2.1. Обробка внутрішніх поверхонь різанням:

а – позначення дії технологічного навантаження;

б – позначення кінематики робочих рухів.

З метою забезпечення необхідної якості розточування, необхідно щоб в процесі обробки різанням траєкторія руху різця не відхилявся від прямолінійного (рис. 2.1, а), а його відносне положення не відхилялось в напрямку утворення розміру обробки за технологічною координатою Y . Щоб забезпечити виконання цієї умови, повинна виконуватись рівновага за всіма шести координатами – трьома лінійними X, Y, Z та трьома кутовими навколо осей X, Y, Z .

Система рівнянь рівноваги сил та моментів при розточуванні буде:

$$\left. \begin{aligned} \sum P_x &= 0; \\ \sum P_y &= 0; \\ \sum P_z &= 0; \\ \sum M_x &= 0; \\ \sum M_y &= 0; \\ \sum M_z &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

За умови, якщо

$$M_x = M_{BP} \quad (2.3)$$

де M_x – опорний крутний момент, що виникає в процесі різання;

M_{BP} – обертальний момент, що виникає при обробці.

На базі поєднань залежностей (2.2) та (2.3) отримаємо

$$\left. \begin{aligned} X_A &= P_x; \\ Y_A &= P_y; \\ Z_A &= P_z; \\ M_x &= M_{BP} = P_z \cdot d / 2; \\ M_y &= P_z \cdot L; \\ M_z &= P_y \cdot L + P_x \cdot d / 2. \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Аналіз системи рівнянь (2.4) дозволяє дійти наступних висновків. Для виконання умови (2.4) необхідно зменшити або усунути дію технологічних сил, що виникають в процесі обробки на механізми верстата. Оскільки порушення

умови призведе до виникнення похибок при обробці. Це можливо шляхом збільшення жорсткості конструкції, що призводить до збільшення загальних масо-габаритних показників верстата.

Таким чином, постає очевидним, що оброблена внутрішня поверхня у разі порушення умови виконання системи рівнянь (2.2) може виявитися з відхиленнями форми отвору, наприклад, овальністю або конусністю.

В результаті, пропонується ввести у конструкцію розточувального інструмента компенсуючого елемента, для забезпечення постійності положення різальної частини інструменту для запобігання відхилень у геометричній формі оброблюваного отвору.

Запропоновано підхід, що передбачає корекцію характеристик усієї технологічної системи шляхом введення спеціального елемента до ланцюга передавання збурень у межах замкненої пружної системи. Цей додатковий елемент виконує функцію своєрідного фільтра, який одночасно реалізує два типи корекції: по-перше, динамічну, що спрямована на пригнічення вібрацій у процесі різання; по-друге, геометричну, яка забезпечує компенсацію похибок формоутворення, спричинених пружними деформаціями елементів технологічної системи. Передбачається використання позитивного ефекту від інтеграції динамічного компенсатора коливань із функціоналом точнісного управління формою поперечного перерізу деталі під час обробки. Такий підхід може бути реалізований у вигляді спеціалізованої конструкції різального інструмента. Приклад такої конструкції наведено на рисунку 2.2.

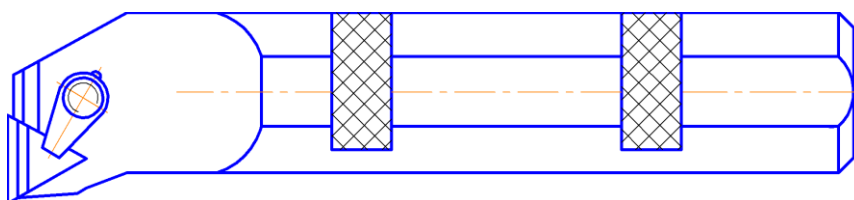


Рис. 2.2. Схема розточувального токарного різця

Розроблена конструкція розточувального токарного різця включає твердосплавну різальну пластину одноразового використання та державку з

поперечним пазом, заповненим спеціальним демпфувальним матеріалом. Конструкція передбачає поділ різця на дві частини з можливістю регулювання жорсткості їх з'єднання. Крім того, геометрія інструмента спроектована таким чином, що центр обертання вершини різця розташований нижче осьової лінії верстата.

Завдяки конструктивним особливостям різець здатний ефективно поглинати вібрації, що виникають у процесі обробки, а також компенсувати похибки, зумовлені пружними деформаціями елементів технологічної системи. Це сприяє підвищенню точності формоутворення та покращенню якості обробленої поверхні.

2.2. Математичне моделювання процесу розточування з врахуванням особливостей розробленого розточувального різця

Найкращим представленням процесу різання, що завжди відбувається у пружній технологічній системі є структурно-параметрична модель, яка побудована з використанням системного підходу. Дійсно, у зв'язку з наявністю пружних деформацій ТОС і їх постійним впливом на параметри обробки (зокрема, на глибину різання), суттєвим виявляється замкненість технологічної системи, яка відображається зворотними зв'язками на структурній схемі. Урахування цього явища дозволяє адекватно відбити відому з практики розбіжність між заданими, встановленими на верстаті, та фактичними параметрами процесу різання.

Головний об'єкт, що управляється, а саме, процес різання повинен представлятися з урахуванням його динамічних властивостей, які перш за все відбиваються постійною часу стружкоутворення, а також постійними часу переднього і заднього кутів різання. Крім того, ураховуючи достатню малість пружних деформацій у порівнянні з глибиною різання, залежність сили різання від глибини, при необхідності, може бути лінеаризована у точці сталого руху.

При вивченні динамічних явищ будь-якої механічної системи, математична модель повинна відображати ці явища, а значить базуватись на основі динамічної системи за допомогою диференціальних рівнянь, що адекватно описують

поведінку системи у часі. Порядок рівнянь залежить від кількості мас, що прийняті у динамічній моделі, та від кількості координат, за якими розглядається рух системи. Первинна динамічна модель приймається одномасовою, динамічна модель для визначення ефектів динамічного гасіння коливань – двомасовою.

На рис. 2.3 наведено узагальнену схему процесу обробки. На схемі за входні величини прийняті елементи режиму різання: швидкість головного руху (різання) V_z , глибину різання на сторону H_z та значення подачі S_z . Входні величини впливають на технологічне навантаження, що виникає в процесі різання, тому технологічні складові якого і є вихідними величинами: тангенціальна складова P_z , радіальна складова P_y та осьова складова P_x .

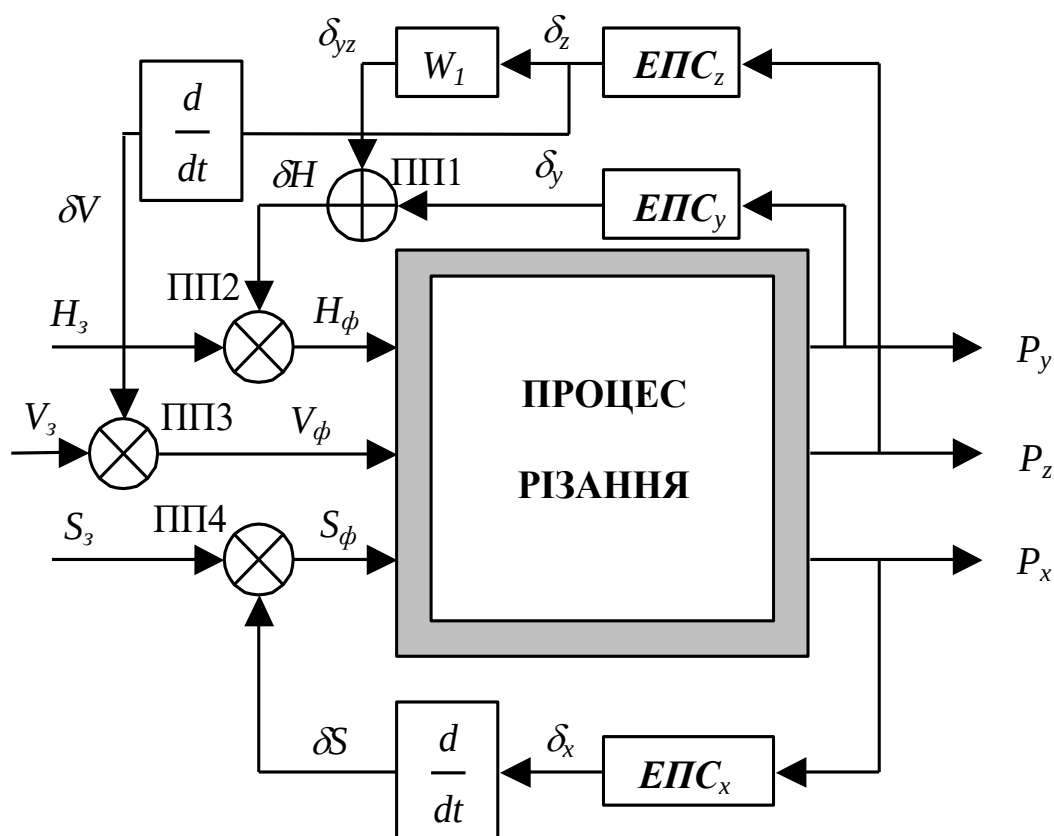


Рис. 2.3. Узагальнену схема процесу різання при розточуванні

Моделювання еквівалентної пружної системи (ЕПС) відбувається у вигляді набору функціональних блоків, кожен з яких характеризує реакцію системи на окремі технологічні складові сили вздовж координатних осей. Відповідно, її відгук у вигляді пружних деформацій представлений по осях координат як

компоненти δ_x , δ_y та δ_z . Кожна з яких по різному впливає на вхідні параметри техпроцесу залежно від напрямку свого виникнення. Зокрема, деформація за координатою Y безпосередньо змінює фактичну глибину різання, тоді як деформація по осі Z впливає на неї опосередковано – через геометричні взаємозв'язки у формоутворювальній схемі. На функціональній схемі ці взаємозалежності реалізовані за допомогою порівняльних пристроїв ПП1 і ПП3, а також передаточної функції W_1 , яка описує перетворення деформації δ_z у компоненту δ_{yz} , яка вже безпосередньо впливає на глибину різання.

Крім того, швидкість зміни деформації δ_z впливає на фактичну швидкість різання, оскільки напрямок цієї деформації збігається з вектором швидкості різального руху. Цей вплив моделюється через порівняльний пристрій ПП3.

Аналогічно, зміна швидкості деформації δ_x позначається на реальній величині повздовжньої подачі. Для відображення цього впливу на функціональній схемі використовується порівняльний пристрій ПП4.

Уся система моделювання таким чином дозволяє врахувати як статичні, так і динамічні взаємозв'язки у пружній поведінці ТОС, що критично важливо для підвищення точності обробки.

Реальне значення подачі в повздовжньому напрямку розраховують через вплив зміни деформації ЕПС_x, а саме δ_x :

$$S_{\phi} = S_z - \frac{d\delta_x}{dt}. \quad (2.5)$$

Так само зміна деформації ЕПС_z в тангенціальному напрямку через δ_z відбивається на реальним значенням швидкості різання:

$$V_{\phi} = V_{\zeta} - \frac{d\delta_z}{dt}. \quad (2.6)$$

Реальне значення глибини різання в радіальному напрямку розраховують через вплив зміни деформації ЕПС_y, а саме δ_y , разом з впливом деформації ЕПС_z розраховують зі схеми (рис. 2.2):

$$\delta_{yz} = \sqrt{R^2 + \delta_z^2} - R. \quad (2.7)$$

де $R = D/3$ – розмір радіус внутрішнього отвору оброблюваної заготовки.

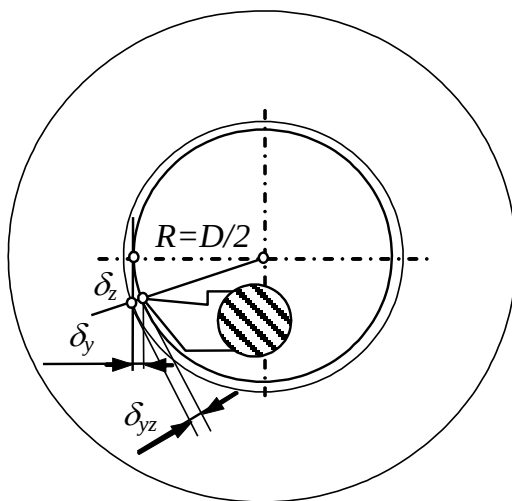


Рис. 2.4. Як складова деформації δ_z відбивається на глибині різання H_ϕ

Як сумарна деформація всіх трьох складових ЕПС впливає на реальне значення глибини різання визначається рівнянням:

$$H_\phi = H_z - (\delta_y + \sqrt{R^2 + \delta_z^2} - R). \quad (2.8)$$

Процес обробки можна подати за допомогою емпіричних залежностей, що визначають значення технологічних складових сили, зокрема:

$$P_z = C_{Pz} H_\phi^{x_{pz}} S^{y_{pz}} V^n k_{Pz}, \quad (2.9)$$

де C_{Pz} , k – емпіричні значення відповідно загального та поправочного коефіцієнтів, x_{pz} , y_{pz} , n – емпіричні показники, що показують ступінь впливу відповідного режиму різання на технологічну складову силу різання.

Якщо ж додати до залежності (2.9) вплив динаміки різання, які представлені постійною часу стружкоутворення, отримаємо диференціальне рівняння:

$$T_p \frac{dP_z}{dt} + P_z = k_p H_{\delta}, \quad (2.10)$$

де T_p – значення постійної часу стружкоутворення;

k_p – коефіцієнт, що враховує процес лінеаризації кривої сили від глибини різання.

Коефіцієнт лінеаризації розраховуємо за методикою використання приватних похідних:

$$k_p = \left(\frac{\partial P_z}{\partial H_{\phi}} \right)_0 = C_{P_z} x_{P_z} (H_{\phi 0})^{x_{P_z}-1} (S_{\phi 0})^{y_{P_z}} (V_{\phi 0})^n k_{P_z}, \quad (2.11)$$

де $H_{\phi 0}$, $S_{\phi 0}$, $V_{\phi 0}$ – величини режиму різання у заданій точці лінеаризації залежності.

З відомої залежності $P_{xy} = 0.6 P_z$ та визначеним розташуванням технологічних складових сили, виводимо рівняння для розрахунку технологічних складових сили P_y та P_x :

$$P_y = \sqrt{\frac{P_{xy}^2}{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi + \eta)}}; \quad (2.12)$$

$$P_x = P_y \cdot \operatorname{tg}(\varphi + \eta), \quad (2.13)$$

де φ – значення головного куту в основній площині;

η – кут, що визначає напрям збігу стружки при різанні.

У першому наближенні еквівалентна пружна система (ЕПС) може бути змодельована як одномасова система з трьома ступенями свободи, що відповідають просторовим координатам X , Y , Z (див. рис. 2.5). У кожному напрямку координат маса m з'єднана з основою через елемент жорсткості c та демпфувальний елемент з коефіцієнтом в'язкого тертя λ . Така модель відповідає класичному випадку лінійного в'язкого тертя, коли сила опору прямо пропорційна швидкості відносного руху. Рух системи в кожному з координатних напрямків описується диференціальним рівнянням другого порядку:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \delta_x}{dt^2} m + \lambda_x \frac{d\delta_x}{dt} + c_x \delta_x &= P_x; \\ \frac{d^2 \delta_y}{dt^2} m + \lambda_y \frac{d\delta_y}{dt} + c_y \delta_y &= P_y; \\ \frac{d^2 \delta_z}{dt^2} m + \lambda_z \frac{d\delta_z}{dt} + c_z \delta_z &= P_z. \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

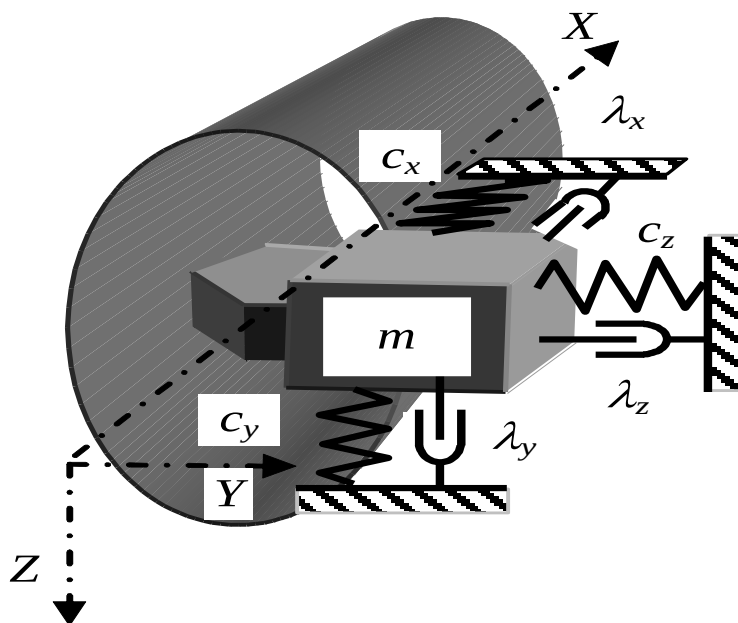


Рис. 2.5. Модель технологічної системи у динаміці

Отримані рівняння (2.5-2.14) є підставою для моделювання процесу обробки в технологічній системі, яка є замкнутою, та згідно схеми на рис. 2.5.

З огляду на те, що отримана математична модель еквівалентної пружної системи (ЕПС) є нелінійною та має шостий порядок, її аналітичне розв'язання є неможливим. Тому для дослідження поведінки такої системи необхідно застосовувати чисельні методи моделювання, які реалізуються на комп'ютері. Для чого доцільно використати чисельні схеми, зокрема, метод Рунге-Кутта, який обмежений четвертим порядком. Для коректного застосування цього методу необхідно перетворити систему рівнянь (2.14) у канонічну форму, придатну до інтегрування – у вигляді системи рівнянь за змінними стану.

Застосуємо змінні стану динамічної моделі: $x_1 = \delta_x$, $x_2 = s\delta_x$, $x_3 = \delta_y$, $x_4 = s\delta_y$, $x_5 = \delta_z$, $x_6 = s\delta_z$, де $s = d/dt$. В такому випадку залежність (2.14) можна подати у формі матриці:

$$\begin{vmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_x/m & -\lambda_x/m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_y/m & -\lambda_y/m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_z/m & -\lambda_z/m \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1/m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/m \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{vmatrix}$$

Наведена вище математична модель дозволяє здійснювати всебічний аналіз і оцінювати вплив будь-яких параметрів системи, заданих у вихідних умовах, на її динамічні характеристики та показники ефективності.

На основі аналізу, проведеного в першому розділі, можна зробити висновок, що найбільш перспективним напрямом удосконалення динамічних властивостей технологічної системи є побудова багатокомпонентної структури, в якій досягається певний баланс між кількома (щонайменше двома) одномасовими динамічними підсистемами. Така взаємодія дозволяє створити умови для ефективного самопогашення коливань у зоні різання.

Разом із тим, незважаючи на потенційно високу ефективність цього підходу, він виявляється надзвичайно чутливим до навіть незначних відхилень параметрів системи від оптимальних значень. Ці значення можуть бути точно встановлені лише шляхом чисельного моделювання на комп'ютері, з урахуванням усіх динамічних та конструктивних особливостей.

На відміну від попередніх підходів, розглянутих у першому розділі, виникає необхідність у побудові нових математичних моделей динамічних систем, які одночасно враховують: реальний процес різання в умовах замкненої технологічної системи, багатомасову природу еквівалентної пружної системи.

Застосування таких моделей дозволяє не тільки визначати оптимальні співвідношення динамічних параметрів для наявного обладнання, але й грамотно проєктувати спеціалізовані пристрої, які виконуватимуть функцію динамічних компенсаторів коливань.

Огляд, здійснений у першому розділі, показує, що для динамічного гасіння коливань використовують структурну схему, зображену на рис. 2.6, а. Розрахунок

квазіоптимальних параметрів такого гасника – зокрема маси m_3 , жорсткості c_3 та коефіцієнта в'язкого тертя λ_3 – виконується шляхом знаходження екстремуму функції динамічної якості, за методом наведеним у цій роботі.

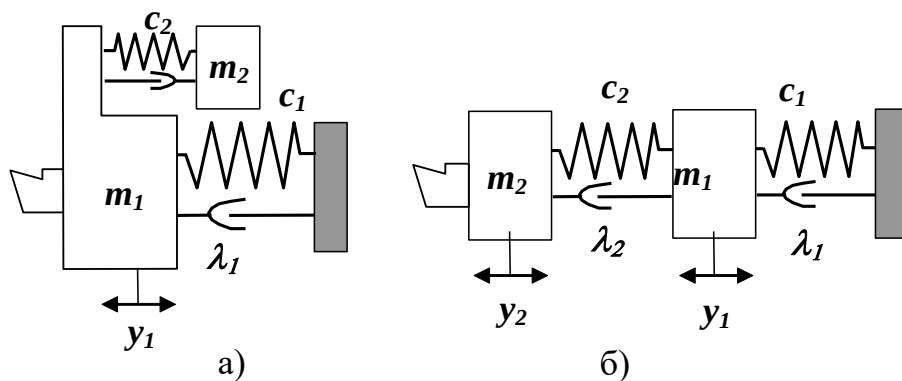


Рис. 2.6. Моделі гасників коливань з врахуванням динаміки процесів

Разом із тим, аналіз свідчить, що подібні динамічні властивості притаманні також і динамічній моделі, реалізованій за схемою, поданою на рис. 2.6, б. Більше того, ця схема може ефективно описувати пружні структури самого верстата, що відкриває додаткові можливості для досягнення оптимальних динамічних характеристик системи шляхом коректного підбору параметрів.

Перші спроби практичного застосування подібних підходів, зокрема в розрахунках високошвидкісних копіювальних механізмів, продемонстрували перспективність і реальність отримання позитивних результатів. Проте для забезпечення адекватного відображення реальних умов обробки, така динамічна модель потребує обов'язкового доповнення компонентом, що описує процес різання в умовах замкнутої технологічної системи.

Цей процес має бути представлений відповідною математичною моделлю з урахуванням власних динамічних характеристик різального процесу, як це було описано вище. Лише інтеграція моделі пружної багатомасової системи з моделлю процесу різання дозволяє точно відтворити реальні умови обробки та здійснити коректну оптимізацію динамічних властивостей системи.

Щоб визначити раціональні параметри моделі отриманої технологічної системи в динаміці, необхідно в неї включити процес обробки, обов'язково

врахувати всі технологічні складові сили за трьома координатами X , Y , Z . Модель системи з двома масами з врахування динаміки обробки за координатою Y приведена на рис. 2.7. Оскільки технологічна система замкнута, то $H_\phi = H_z - \delta_y$ (H_ϕ – фактичне значення реальної глибини різання, H_z – теоретично задане значення глибини різання, δ_y – значення пружної деформація за Y).

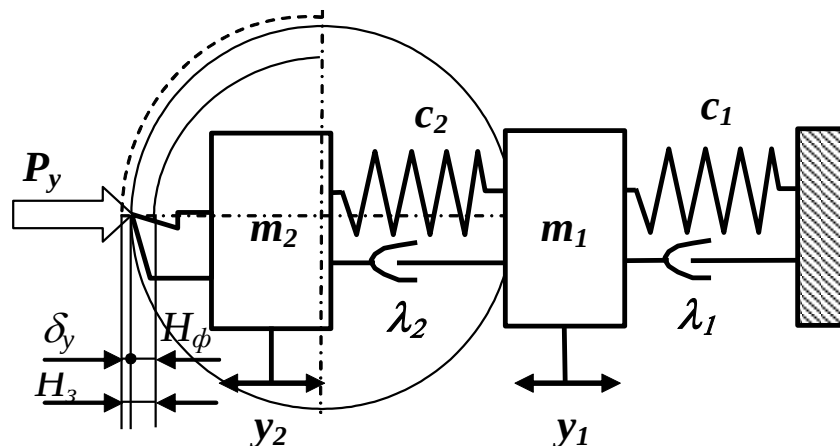


Рис. 2.7. Модель системи з двома масами з врахування динаміки обробки

З моделі, наведеної на схемі рис. 2.7, отримаємо математичну модель, що описує поперечний рух технологічної системи за радіальною координатою Y :

$$\left. \begin{aligned} H_\phi &= H_z - y_2; \\ T_p \frac{dP_y}{dt} + P_y &= k_p H_\phi; \\ m_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} + \lambda_2 \left(\frac{dy_2}{dt} - \frac{dy_1}{dt} \right) + c_2 (y_2 - y_1) &= P_y; \\ m_1 \frac{d^2 y_1}{dt^2} + \lambda_1 \frac{dy_1}{dt} + c y_1 &= \lambda_2 \left(\frac{dy_2}{dt} - \frac{dy_1}{dt} \right) + c_2 (y_2 - y_1). \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

У отриману модель потрібно внести особливості конструкції розточувального різця (рис. 2.2). Для забезпечення можливості розрахунку заміняють пружну систему розточувального різця важільною системою (рис. 2.8). Важіль має довжину ℓ_1 та вісь повороту O_p . Положення технологічної системи визначається радіусом обробки R_ϕ та відстанню $EO_p = h_p$, яка визначається між O_ϕ та O_p за віссю Z .

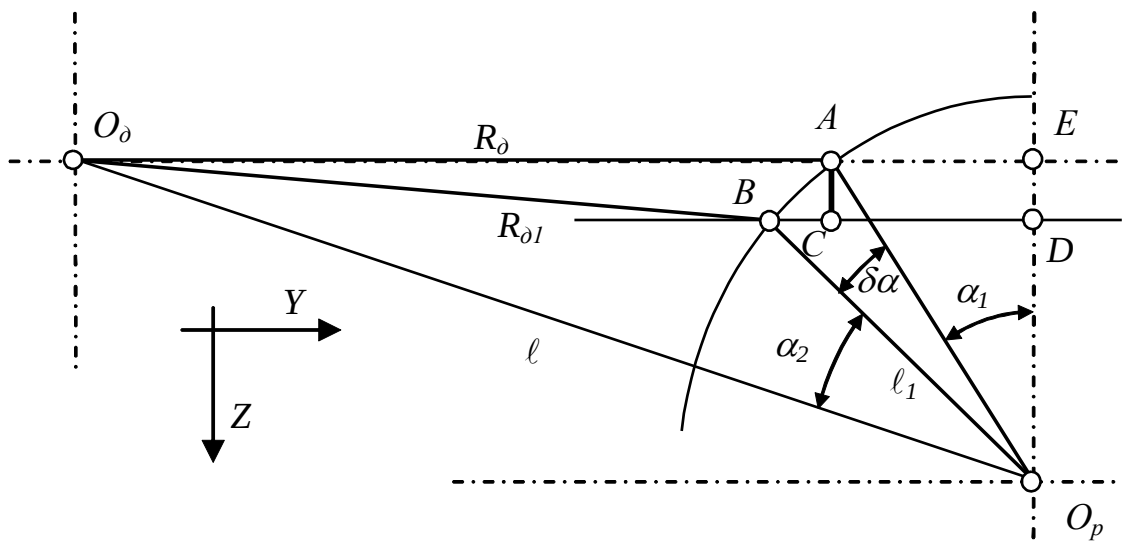


Рис. 2.8. Схема для визначення компенсації величини похибки

Радіус обробної заготовки змінюється з R_δ до $R_{\delta l}$. З геометричних співвідношень (рис. 2.8) знаходимо міжцентрову відстань:

$$\ell = \sqrt{(R_\delta + AE)^2 + h_p^2}, \quad (2.16)$$

де $AE = \sqrt{\ell_1^2 - h_p^2}$ – катет $\triangle AEO_p$.

Вихідне значення кут для повороту важеля:

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{h_p}{\ell_1}\right). \quad (2.17)$$

Для значення деформації $\delta z = AC$ по вісі Z вершина інструменту пересувається по дузі кола радіусом ℓ_1 навкруги O_p , із прямокутника $\triangle BDO_p$ отримаємо:

$$\delta\alpha = \arccos\left(\frac{h_p - \delta z}{\ell_1}\right) - \alpha_1. \quad (2.18)$$

Тоді можна визначити розмір кута α_3 , який характеризує деформований кінематичний стан:

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{AE + d/2}{\ell}\right) - \alpha_1 - \delta\alpha. \quad (2.19)$$

За положенням теореми косинусів з трикутника $\triangle O_\delta BO_p$ розраховують нове значення, скорегованого радіусу заготовки:

$$R_{o1} = \sqrt{\ell^2 + \ell_1^2 - 2\ell\ell_1 \cos(\alpha_2)}. \quad (2.20)$$

Модель системи необхідно спорядити диференціальними рівняннями, які визначають рух системи з двома масами (рис. 2.7).

$$\left. \begin{aligned} H_{\delta} &= H_{\zeta} - y_2 - \delta z + \delta zy; \\ sy_1 &= a_5 P_y - a_6(y_1 - y_3) - a_7(y_2 - y_4); \\ sy_2 &= y_1; \\ sy_3 &= a_5(y_1 - y_3) + a_9(y_2 - y_4) - a_1 y_3 - a_2 y_4; \\ sy_4 &= y_3; \\ sy_5 &= a_8 P_x - a_6(y_5 - y_7) - a_{10}(y_6 - y_8); \\ sy_6 &= y_5; \\ sy_7 &= a_8(y_5 - y_7) + a_{11}(y_6 - y_8) - a_1 y_7 - a_3 y_8; \\ sy_8 &= y_7; \\ S_{\delta} &= S_{\zeta} - 18,85 y_5 d / V_{\delta}; \\ sy_9 &= a_5 P_z - a_6(y_9 - y_{11}) - a_{12}(y_{10} - y_{12}); \\ sy_{10} &= y_{11}; \\ sy_{11} &= a_8(y_9 - y_{11}) + a_{13}(y_{10} - y_{12}) - a_1 y_{11} - a_4 y_{12}; \\ sy_{12} &= y_{11}; \\ V_{\delta} &= V_{\zeta} - 60 y_9; \\ \delta z &= \sqrt{(d/2)^2 + y_{10}^2} - d/2; \\ \delta \alpha &= \arccos[(h_P - y_{10})/\ell_1] - \alpha_1; \\ \alpha_2 &= \arcsin[(d/2 + AE)/\ell] - \alpha_1 - \delta \alpha; \\ \delta zy &= d/2 - \sqrt{\ell^2 + \ell_1^2 - 2\ell\ell_1 \cos \alpha_2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

де коефіцієнти для моделі визначені за залежностями: $a_1 = \lambda_1/m_1$; $a_3 = c_{y1}/m_1$; $a_3 = c_{x1}/m_1$; $a_4 = c_{z1}/m_1$; $a_5 = 1/m_3$; $a_6 = \lambda_3/m_3$; $a_7 = c_{y3}/m_3$; $a_8 = \lambda_3/m_1$; $a_9 = c_{y3}/m_1$;

$a_{10} = c_{x3}/m_3$; $a_{11} = c_{x3}/m_1$; $a_{13} = c_{z3}/m_3$; $a_{13} = c_{z3}/m_1$. Причому наведені індекси та позначення взяті зі схеми (рис. 2.7).

Побудована в описаний вище спосіб модель динамічної системи дає змогу проводити імітаційні дослідження з метою визначення оптимальних конструктивних і динамічних параметрів розроблених розточувальних різців. Така модель слугує ефективним інструментом на етапі їх проєктування, а також при оцінці очікуваної ефективності у складі технологічної системи.

Зазначені дослідження доцільно проводити щонайменше у двох основних напрямках: визначення раціональних співвідношень динамічних параметрів, які забезпечують найвищу ефективність гасіння коливань у процесі різання. Це дозволяє підвищити стабільність формоутворення та знизити ризик виникнення автоколивань; визначення геометричних розмірів, які забезпечують компенсацію похибок, що виникають внаслідок пружних деформацій технологічної системи. Така компенсація сприяє підвищенню точності обробки та покращенню якості поверхні деталі.

Комплексне дослідження цих аспектів у рамках побудованої моделі дозволяє обґрунтовано обирати конструктивні рішення й забезпечувати високий рівень динамічної надійності системи.

2.3. Дослідження процесу розточування

Дослідження можна виконати на за допомогою математичної моделі об'єкту або процесу для оцінки впливу їх найважливіших параметрів на вихідні характеристики.

Як показано в попередніх підпунктах поведінку ТОС у процесі розточування можливо описати математичними моделями, що мають вигляд систем нелінійних диференціальних рівнянь. Для розв'язання таких математичних моделей, які мають високий порядок, немає альтернативи використанню комп'ютера зі стандартними процедурами чисельного інтегрування.

Головною метою моделювання є визначення параметрів розточувальних інструментальних пристроїв, розробка прикладних програм за допомогою яких

можна виконувати попередні дослідження і обирати найважливіші динамічні і конструктивні параметри цих пристроїв і елементів ТОС.

Моделюванні здійснювалось за допомогою прикладної програми, в яку закладені математичні моделі ТОС з врахуванням конструктивних особливостей розточувального інструментального пристрою.

Під час проведення комп'ютерних експериментів за допомогою наявної програми, що моделює базову систему було виявлено, що максимальні екстремальні коливання системи були виявлені у напрямку системної координати Z , в той же час мінімальні екстремальні коливання спостерігались у напрямку системної координати X . Що можна пояснити тим, що швидкість переміщення вершини різця внаслідок коливання у напрямку осі Z , впливає на швидкість різання, що в свою чергу впливає на силу різання і величину амплітуди коливань. Так, рух вершини різця у позитивному напрямі осі Z приводить до миттєвого зменшення швидкості різання, що (при негативному показнику ступеня в залежності сили різання від швидкості) приводить до збільшення сили різання і збільшення деформації технологічної системи, що дестабілізує систему.

Навпроти, швидкість коливань за координатою X впливають на фактичну величину повздовжньої подачі таким чином, що в системі організується негативний зворотній зв'язок, що демпфірує коливання. Наприклад, при збільшенні сили різання (складової P_x) швидкість деформації ТОС в напрямку осі X викликає миттєве зменшення фактичної подачі, що, в свою чергу, приводить до зменшення сили різання і амплітуди коливань відповідно.

Зміну динамічної якості з часом можна визначити за допомогою інтегрованого показника якості A , який визначається як величину максимального відхилення системи помножену на тривалість усталення процесу різання. В напрямку системної координати Z вихідної технологічної системи отримуємо за допомогою програми:

$$A = t_n \left(1 + \frac{\delta z_{\max} - \delta z_{уст}}{\delta z_{уст}} \right) = 0,253 \left(1 + \frac{0,020 - 0,019}{0,019} \right) = 0,2663, \quad (2.21)$$

де t_n – тривалість усталення процесу різання,

$\delta z_{\max}$, $\delta z_{уст}$ – деформація системи найбільша екстремальна та усталена за системною координатою Z .

За аналогією, інтегровані показники динамічної якості технологічної системи можуть бути визначені й для інших координатних напрямів. Очевидно, що чим менше значення такого показника, тим кращими є динамічні характеристики системи (в ідеальному випадку значення дорівнює нулю, $A = 0$).

Розроблена програма може бути ефективно використана на етапі проектування процесів розточування з метою підвищення їх динамічної стабільності. Вона дозволяє здійснювати підбір оптимальних параметрів технологічної системи та параметрів динамічних компенсаторів коливань. Зазначена система моделювання виконує базову функцію при дослідженні можливостей покращення динамічної поведінки пружної системи шляхом введення активних пристроїв, здатних автоматично компенсувати похибки обробки, що виникають через пружні деформації.

У рамках комп'ютерного моделювання були розв'язані дві ключові задачі:

- визначення раціональних динамічних характеристик розточувального інструментального вузла;
- підбір таких конструктивних параметрів інструмента й пристрою, які забезпечують ефективну компенсацію похибок обробки, викликаних пружними деформаціями, у режимі усталеного різання.

Перша задача вирішувалась за методикою, що передбачає пошук оптимальних значень жорсткості і маси за критерієм мінімізації інтегрального показника динамічної якості.

Пошук проводився методом покоординатного спуску, при цьому на параметри, що варіюються накладались певні обмеження за діапазоном зміни.

Так, маса відокремленої частини різця не повинна перевищувати 0,2 кг, а жорсткість за всіма координатними осями не повинна перевищувати 10000 Н/мм виходячи з конструктивних міркувань, демпфіруючі властивості гумового наповнювача залишаються незмінними.

У результаті були знайдені параметри, які рекомендуються для конструкції розточувального інструментального пристрою. Що стосується двох конструктивних параметрів l_1 і h_p , то під час моделювання була помічена висока чутливість пристрою щодо компенсації пружної деформації під час розточування.

Моделювання визначення тривалості усталення процесу різання в технологічній системі із різцем для розточування за оптимально підібраними динамічними параметрами показало, що, незважаючи на загальне зростання рівня статичних пружних деформацій у всіх координатних напрямках, динамічна якість системи суттєво покращується. Це свідчить про ефективність оптимізації динамічних характеристик для стабілізації роботи системи та зниження коливальних збурень під час обробки.

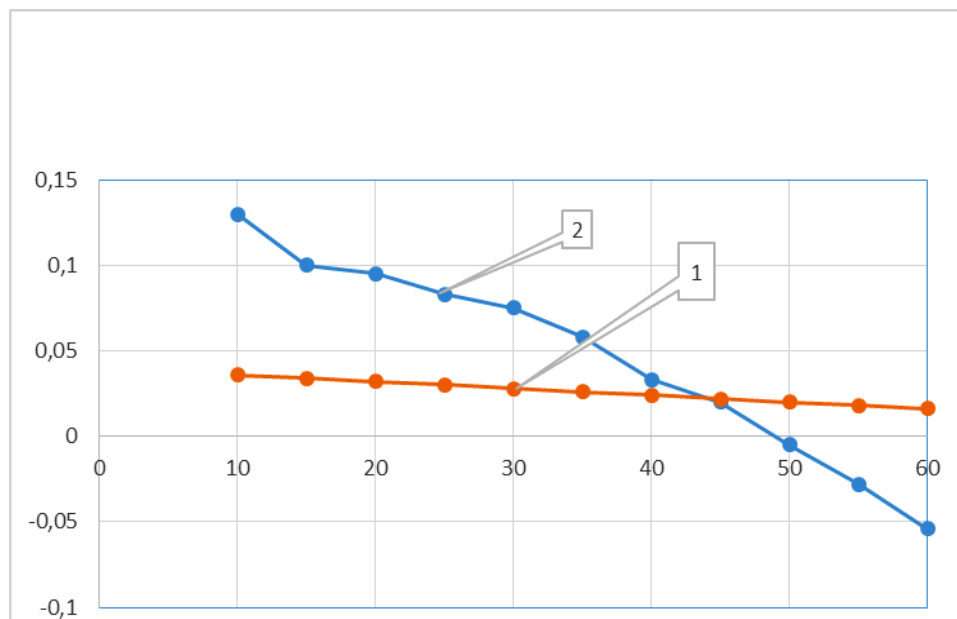
У результаті моделювання було зафіксовано суттєву зміну розподілу пружних деформацій за системними координатними осями, що свідчить про ефективне цілеспрямоване керування динамічними характеристиками технологічної системи під час різання. Зокрема, за координатою Z інтегрований показник, розрахований за тими ж самими критеріями, що й для початкової системи, зменшився з 0,2663 до 0,2177, що є свідченням покращення динаміки процесу різання.

Крім того, аналіз траєкторії переміщення вершини різця у площині, перпендикулярній до осі обертання деталі, демонструє значно більш згладжену, стабільну криву у порівнянні з вихідною системою, де спостерігалися петлеподібні траєкторії. Саме такі петлі є характерними ознаками втрати сталості різального процесу.

Варто зазначити, що принцип компенсації похибок, викликаних пружними деформаціями, ґрунтується на перерозподілі складових сили різання. Цей

розподіл залежить від головного кута у плані різця, тому можна очікувати істотний вплив цього параметра на остаточну точність обробки.

Проведені за допомогою створеної програми машинні експерименти дозволили визначити такі залежності (рис. 2.9). Як і слід було очікувати, на похибку різання суттєвіше впливає значення головного кута в основній площині для розробленої конструкції розточувального різця (крива 2, рис. 2.9) чим для звичайного розточувального інструменту (крива 1, рис. 2.9).



1 – стандартний розточувальний різець;

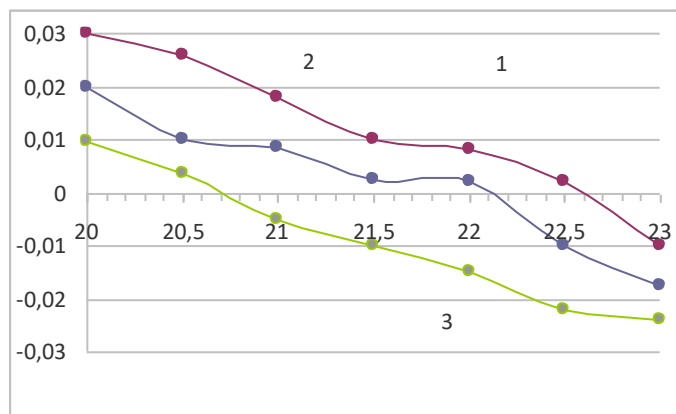
2 – розроблений розточувальний різець

Рис. 2.9. Вплив головного кута в основній площині на похибку

З проведених експериментів випливає, що для прийнятих параметрів розробленого розточувального різця, якщо значення головного кута в основній площині знаходиться в діапазоні від 46° до 52° , дозволяє майже повністю невілювати похибку розточування від деформації технологічної системи.

Геометричні параметри розробленого розточувального різця, що визначаються значеннями ℓ_1 та h_p у кінематичній схемі, яка моделює пружну поведінку технологічної системи, мають істотний вплив на ефективність компенсації похибок обробки, спричинених пружними деформаціями під час точіння. Аналіз цього впливу можливий за допомогою розробленого спеціалізованого програмного забезпечення, приклад роботи якого показано на рисунку 2.10.

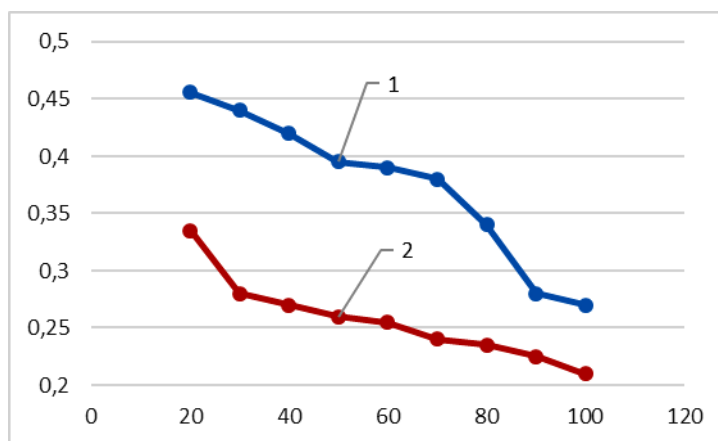
У ході машинного експерименту були побудовані залежності похибки наскрізного обточування отвору в деталі діаметром 70 мм (головний кут в основній площині 45° від параметра h_p для трьох різних значень ℓ_1 : крива 1 – 44 мм; крива 2 – 42 мм; крива 3 – 40 мм. Результати дослідження продемонстрували, що зазначені конструктивні параметри істотно впливають саме на величину компенсації похибки обробки, однак не мають суттєвого впливу на динамічні процеси під час розточування.



Характеристики розробленого розточувального різця: головний кут в основній площині 45° ; значення ℓ_1 крива 1 – 44 мм, крива 2 – 42 мм, крива 3 – 40 мм

Рис. 2.10. Вплив параметрів розробленого розточувального різця на похибку

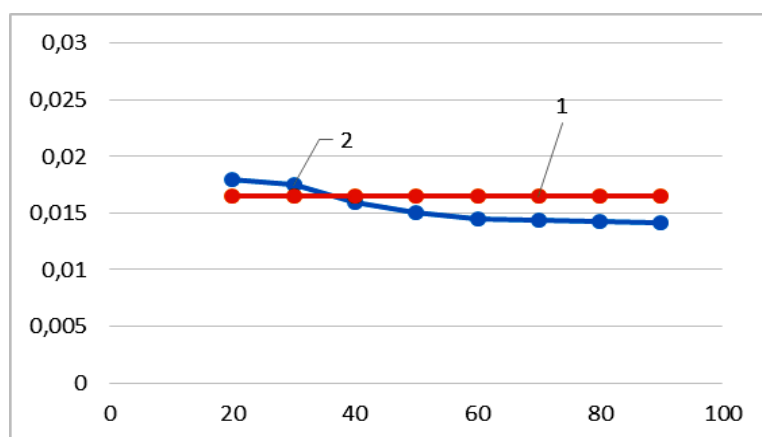
Отримані результати щодо оцінки динамічної якості базової технологічної системи (зі звичайним розточувальним різцем) та системи, вдосконаленої за рахунок застосування розробленого розточувального різця, подані в графічній формі на рисунку 2.11. Як критерій оцінки динамічної якості використовувався інтегрований показник A , обчислений відповідно до формули (2.21). Дослідження відбувались для різних діаметрів оброблюваної деталі. Вихідними умовами були: значення головного кута в основній площині – 48° , параметри розробленого розточувального різця $\ell_1 = 42$ мм, $h_p = 21,5$ мм.



1 – вплив діаметру обробки на динамічну якість системи для стандартного розточувального різця; 2 – вплив діаметру обробки на динамічну якість системи для розробленого розточувального різця

Рис. 2.11. Вплив діаметру обробки на динамічну якість системи

Динамічна якість системи і для 1-ої і для 2-ої кривих залежить від діаметру обробки. Для системи з стандартним розточувальним різцем за інтегрованим показником A вона змінюється в діапазоні від 0,487 до 0,263 (крива 1, рис. 2.11). Для системи з розробленим розточувальним інструментом спостерігається суттєве зростання динамічної якості: за інтегрованим критерієм A змінюється в діапазоні від 0,337 до 0,215 (крива 2, рис. 2.11), за умови однакових величин діаметрів обробки.



1 – вплив діаметру обробки на похибку для стандартного розточувального різця
2 – вплив діаметру обробки на похибку для розробленого розточувального різця

Рис. 2.12. Вплив діаметру обробки на похибку

З характеру графіків на рис. 2.12 виходить, що на похибку обробки в технологічній системі з стандартним розточувальним різцем діаметр точіння майже не впливає, та знаходиться у діапазоні до 0,0166 мм (крива 1, рис. 2.12). В той же час як використання в технологічній системі розробленого розточувального різця при зміні діаметру обробки в широких межах дозволяє суттєво зменшити похибки (крива 2, рис. 2.12).

2.4. Базова технологія обробки деталі корпус

Об'єктом виробництва є деталь корпус вилита в кокіль зі сталі 40Х ГОСТ 4543-71 масою 1,51, габаритні розміри 109х65. В деталь запресовується в отвір 2 твердий сплав. Використовується для висадочного інструменту який використовується для холодної висадки осей, для монтажу ланок ланцюгів сільськогосподарських машин.

Техпроцес обробки деталі «Корпус» має загалом 8 технологічних операцій. Виконуються операції розточування на токарному верстаті 16К20. Базовий технологічний процес складається з чорнового та чистового розточування. В якості інструментів на даній операції використовували токарний розточний різець з мехкріпленням 3-х гранної пластини твердого сплаву Т15К6

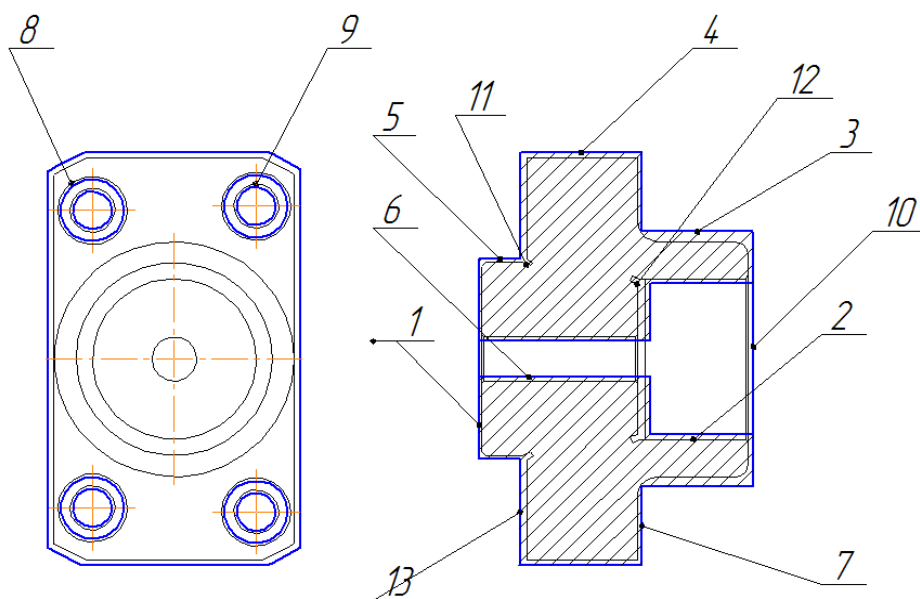


Рис. 2.13. Ескіз деталі «Корпус»

Таблиця 2.1

Технологічний маршрут обробки корпусу

№	Найменування	Верстат	Пристрій
005	Токарна 1.точити зовнішню поверхню 1,5,13,4 2.точ.кан.11 3.точ. фаски 1х45 2фаски 4.свердлити пов. 6 на глибину 38мм	Токарний напівавтомат 16K20	3-х кулачковий пнемо патрон
010	Токарна 1.точити торець 7, 10 і пов.3 2.розточ.отвір 2 з припуском під шліфування 3.нарізати канавку 12 4.наріз фаску 0.5х45 1 фаску 5.зробить R3, R5	Токарний напівавтомат 16K20	3-х кулачковий пнемо патрон
015	Свердлильна сверд.отвір 9 наскрізь 4 отв.	Свердлильний верстат 2Н125	Кондуктор скальчатий
020	Сверд. отвір 8 на глибину 11 мм 4 отв.	Свердлильний верстат 2Н125	Кондуктор скальчатий
025	Шліфувальна Шліфувати пов. 2	Внутри- шліфувальний верстат 3K227B	3-х кулачковий патрон з пневмозажимом
030	Шліфувальна Шліфувати торець 13 і пов. 5 витримуючи параметри шорсткості	Кругло- шліфувальний верстат 3M150	Оправка
035	Шліфувальна Шліфувати пов. 10	Плоско- шліфувальний верстат 3Г71	Магнітна плита
040	Контрольна	Стіл БТК	

2.5. Проектування та розрахунок розточувального різця

Коротка характеристика розточувального різця.

У якості розточувального різця на токарній операції 010 для розточування отв. $\varnothing 40^{+0.016}$ використаний різець токарний розточувальний з мехкріпленням 3-х гранної пластини твердого сплаву T15K6. Припайка твердосплавних пластин до державки часто викликає тріщина пластини з-за різного коефіцієнту лінійного розширення сталі і твердого сплаву [34].

Крім того, напаяним пластинам важко робити стружкозавивання і стружколомання. Великим є і розхід сталі, яка йде на виготовлення одноразових державок напаяних різців. Все це змусило конструкторів шукати інші форми кріплення пластин до державок.

Даний різець має наступну конструкцію. Ріжуча пластина встановлюється у гніздо корпусу на опорну твердосплавну пластину, яка захищає корпус різця від пошкодження при аварійних ситуаціях. Опорна пластина закріплюється у корпусі 1 пружиною втулкою, яка легко може бути випресована, а опорна пластина повернута непошкодженою вершиною.

Ріжуча пластина закріплюється у корпусі різця гвинтом. Таке кріплення забезпечує однозначне базування ріжучої пластини у гнізді корпусу, не має будь-яких виступаючих над пластиною елементів, заважаючи вільному сходу стружки, дозволяє швидко та зручно повертати або замінити ріжучу пластину. Ріжуча пластина надійно утримується в гнізді корпусу, що дозволяє робити з різними напрямленнями подачі.

Для оснащення різців використовують змінні твердосплавні багатогранні пластини з центральним отвором й складною формою передньої поверхні для завивання та подрібнення стружки при різанні в'язких матеріалів, зокрема й сталі. Після затуплення (по черзі) усіх ріжучих кромek пластину повертають на переробку, а в державку вставляють нову пластину [22, 23, 34].

Форма багатогранної пластини характеризується числом граней n :

$$n = \frac{360}{\varphi + \varphi_1} \quad (2.22)$$

де: $\varphi = 93^\circ$ – значення головного кута основної площини;

$\varphi_1 = 20^\circ$ – допоміжний кут в основній площині.

$$n = \frac{360}{93 + 20} = 3,2 \approx 3$$

Вибираємо для нашого випадку 3-х гранну пластину твердого сплаву Т15К6.

$\varphi = 90^\circ, \varphi_1 = 10^\circ$:

передній кут: $\gamma = 12^\circ$

задній кут(основний): $\alpha = 7,5^\circ$

задній кут(допоміжний): $\alpha_1 = 7,5^\circ$.

Корпус різця вибираємо звичайний для розточних різців круглого перерізу $\varnothing 50$ мм з зрізаними верхом і низом під державку у розмір 25 мм. Довжину різця L вибираємо з урахуванням довжини розточуваного отвору: $L = 170$ мм.

Перевіримо вибрану державку на міцність. Мінімально допустимий діаметр державки різця круглого перерізу дорівнює:

$$D = \sqrt[3]{\frac{P_z \cdot l \cdot 32}{\pi \cdot \sigma_u}} \quad (2.23)$$

де: $P_z = 58,87$ кг – сила різання;

$l = 40$ мм – приблизний виліт різця з державки;

$\sigma_u = 5,5$ кгс/мм – допустима напружка на вигін

$$D = \sqrt[3]{\frac{58,87 \cdot 50 \cdot 32}{3,14 \cdot 5,5}}$$

В нас же державка має $d = 50$ мм $> 19,7$ мм. Міцність достатня.

Перевіримо державку на жорсткість. Максимальне навантаження, яке допускає жорсткість державки різця:

$$P_{zж} = \frac{3f \cdot E \cdot j}{l^3}, \quad (2.24)$$

де: $f = 0,1$ – допустима стріла прогину при напівчистовому розтачуванні;

$E = 20000$ кгс/мм – модуль пружності матеріалу державки (сталі 45);

$J = 0,05 \cdot d^4 = 0,05 \cdot 30^4 = 40500$ – момент інерції державки різця круглого перерізу

$$P_{zж} = \frac{3 \cdot 0,1 \cdot 20000 \cdot 40500}{70^3} = 708,5 \text{ кгс}$$

В нас $P_{zж} = 58,87$ кгс $< 708,5$ кгс. Жорсткість достатня.

Перевірочний розрахунок інструментальної системи на міцність

В процесі роботи інструментальний пристрій буде знаходитись під навантаженням технологічних складових сили різання P_z , P_y , P_x , для яких характерна зміна значень в залежності від умов обробки (наприклад перемінний припуск на обробку, неоднакова твердість оброблюваного матеріалу та ін.).

Аналізуючи особливості конструкції розробленого інструменту системи з'ясовуємо, що небезпечними елементами є: різьбове з'єднання гвинта з корпусом та перемичка, яка виконана у вигляді отвору в головці та корпусі. Тому виконаємо перевірочні розрахунки на міцність цих елементів.

Матеріал: державки – сталь 45, по додатку межа міцності – $\sigma_b = 610$ МПа ; гвинта – сталь 35, межа міцності $\sigma_b = 540$ МПа , межа текучості $\sigma_m = 320$ МПа .

Розраховуємо значення складових сил різання на операції 010:

$$P_z = 10C_{P_z} \cdot t^{x_{P_z}} \cdot s^{y_{P_z}} \cdot v^{n_{P_z}} \cdot K_{P_z} = 10 \cdot 300 \cdot 2,4^{1,0} \cdot 0,4^{0,75} \cdot 200,1^{-0,15} \cdot 0,727 = 1241 \text{ Н} \quad (2.25)$$

$$P_y = 10C_{P_y} \cdot t^{x_{P_y}} \cdot s^{y_{P_y}} \cdot v^{n_{P_y}} \cdot K_{P_y} = 10 \cdot 250 \cdot 2,4^{0,9} \cdot 0,4^{0,6} \cdot 200,1^{-0,3} \cdot 0,82 = 537 \text{ Н}$$

Таким чином, для перевірочного розрахунку в небезпечних перерізах та елементах конструкції інструментальної системи приймаємо наступні значення технологічного навантаження $P_z = 1241$ Н, $P_y = 537$ Н.

Розрахунок на втомлювану міцність при роботі перемички на згин.

Складаємо розрахункову схему для визначення запасу втомлюваної міцності перемички корпусу різця. Виходячи з досить значної різниці площі

поперечних перетинів, приймаємо, що корпус різця можна вважати за жорстку заціпку. У такому випадку схема зводиться до розрахунку балки в жорсткій заціпці, на яку діють складові сили P_z , P_y , що змінюються у процесі обробки. Так як інструментальний пристрій не призначений для роботи в напрямку дії сили P_x , то її в розрахункову схему не включаємо. Таким чином визначимо запас опору втомлюваності та порівняємо його з допустимим.

Оскільки в нашому випадку складно встановити дійсний цикл навантаження інструментального пристрою у процесі обробки, то розрахунок виконаємо по номінальному навантаженню, а цикли напружень приймемо симетричні для напружень згину. При дії напруг згину запас опору втомлюваності визначається за формулою:

$$S = S_{\sigma} \geq [S] \approx 1,5, \quad (2.26)$$

де S_{σ} – запас опору втомлюваності по згину,

$$S_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a K_{\sigma} / (K_d \cdot K_F) + \psi_{\sigma} \sigma_m} = \frac{305}{(189,4 \cdot 1,0) / (1,0 \cdot 0,95)} = 1,53 \quad (2.27)$$

де σ_{-1} – межа витривалості, по визначаємо:

$$\sigma_{-1} \approx (0,4 \dots 0,5) \sigma_b = 0,5 \cdot 610 = 305 \text{ МПа} \quad (2.28)$$

ψ_{σ} – коефіцієнт, який враховує вплив періодичного циклу навантажень (напружень) на опір втомлюваності, залежить від механічних характеристик матеріалу, по для середньовуглецевих сталей приймаємо $\psi_{\sigma} = 0,1$;

K_{σ} – коефіцієнт, що враховує ефект від концентрації напружень при згині, приймаємо $K_{\sigma} = 1,0$;

K_d, K_F – відповідно масштабний фактор та фактор шорсткості поверхні, по приймаємо $K_d = 1,0, K_F = 0,95$;

σ_a, σ_m – відповідно амплітуда змінної складових циклів напружень та постійна складова, згідно умові прийнятій вище про симетричні цикли напружень

$$\sigma_m = 0; \sigma_a = \frac{M}{W}, \quad (2.29)$$

де M – момент згину у небезпечному перетині, зі схеми на

$$M = -P_y \cdot t + P_z \cdot a = -537 \cdot 0,025 + 1241 \cdot 0,030 = 22,73 \text{ Нм} \quad (2.30)$$

W – момент опору для небезпечного перетину

$$W = \frac{B \cdot H^2}{6} = \frac{25 \cdot 10^{-3} \cdot (6 \cdot 10^{-3})^2}{6} = 120 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 = 120 \text{ мм}^3 \quad (2.31)$$

По формулі 2.11 визначаємо σ_a :

$$\sigma_a = \frac{M}{W} = \frac{22,73}{120 \cdot 10^{-9}} = 4,259 \cdot 10^8 \text{ Па} = 189,4 \text{ МПа} \quad \dots (2.32)$$

Визначаємо по залежності запас опору втомлюваності по згину:

$$S_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a K_\sigma / (K_d \cdot K_F) + \psi_\sigma \sigma_m} = \frac{305}{(189,4 \cdot 1,0) / (1,0 \cdot 0,95)} = 1,53$$

Таким чином, умова опору небезпечного перерізу втомлюваності при згині по формулі виконується:

$$S = S_\sigma = 1,53 > [S] \approx 1,5.$$

Виконуємо перевірку статичної міцності з метою попередження пластичних деформацій та руйнувань з врахуванням короточасних перевантажень (наприклад при врізанні інструменту і т.д.). При цьому повинна виконуватись умова:

$$\sigma_{ек} = \sigma_i \leq [\sigma], \quad (2.33)$$

де $\sigma_i = \sigma_a = 189,4 \text{ МПа}$

Граничне допустиме напруження $[\sigma]$ приймають близьким до межі текучості $\sigma_m = 360 \text{ МПа}$ для сталі 45.

$$[\sigma] \approx 0,8 \sigma_m = 0,8 \cdot 360 = 288 \text{ МПа} \quad (2.34)$$

Таким чином по умова статичної міцності виконується:

$$\sigma_{ек} = \sigma_i = 189,4 \text{ МПа} < [\sigma] = 288 \text{ МПа}$$

Розрахунок різьбового з'єднання гвинта на зминання

Перевіряємо виконання умови по допущеним напруженням на зминання у різьбовому з'єднанні .

По [табл. 1.2, 9] для розтягуючого зовнішнього навантаження:

$$\sigma = \sigma_{cm} \leq [\sigma_{cm}] \quad (2.35)$$

де $[\sigma_{cm}]$ – межа напружень на зминання у різьбовому з'єднанні, по табл. 1.2. [9] , для матеріалу гвинта Сталь 35:

$$[\sigma_{cm}] = 0,8 \cdot \sigma_m = 0,8 \cdot 320 = 256 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{cm} = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot \ell_c}, \quad (2.36)$$

де F – сила, що діє у різьбовому з'єднанні, знаючи момент діючий відносно нижньої точки у небезпечному перерізі знаходимо значення сили:

$$F = \frac{M}{t_c} = \frac{22,73}{15 \cdot 10^{-3}} = 1515 \text{ Н} \quad (2.37)$$

d – діаметр гвинта, $d = 8 \text{ мм}$

ℓ_c – довжина різьбового з'єднання, $\ell_c = 4 \text{ мм}$

За формулою 2.16 визначаємо напруження в різьбовому з'єднанні

$$\sigma_{cm} = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot \ell_c} = \frac{1515}{3,14 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{-3}} = 15,1 \text{ МПа} \quad (2.38)$$

Таким чином умова міцності різьбового з'єднання на зминання виконується

$$\sigma_{cm} = 15,1 \text{ МПа} < [\sigma_{cm}] = 256 \text{ МПа}$$

Виконані розрахунки на міцність в небезпечних перерізах та небезпечних конструктивних елементах інструментальної системи, довели її працездатність

Розробка і опис конструкції вимірювального інструменту

Стисла характеристика контрольно-вимірювального інструменту

У якості контрольно-вимірювального інструменту я спроектував і використав калібр-пробку $40^{+0,016}$). Калібр-пробка складається з прохідного калібру ПР і непрохідного калібру НЕ. Вони розташовуються з двох сторін однієї

ручки. За допомогою цього калібру визначають не числові значення параметрів, які контролюються, а гідність деталі. Застосування цього інструменту дозволяє скоротити час на вимірювання деталі і підвищити якість вимірювання.

Розрахунок і конструювання контрольно-вимірального інструменту.

Визначаємо розмір отвору згідно ГОСТ 25347-82.

Найбільший розмір отвору: $D_{\max}=40,016\text{мм}$;

Найменший розмір отвору: $D_{\min}=40,000\text{мм}$;

З таблиці 2 (ГОСТ 24853-81) для 6 квалітету і інтервалу розмірів 30-50мм обираємо параметри для розрахунку калібрів: $H=2,5\text{мкм}$; $Z=2,5\text{мкм}$; $Y=2\text{мкм}$. По цим даним будемо схему розташування полів допусків калібру-пробки.

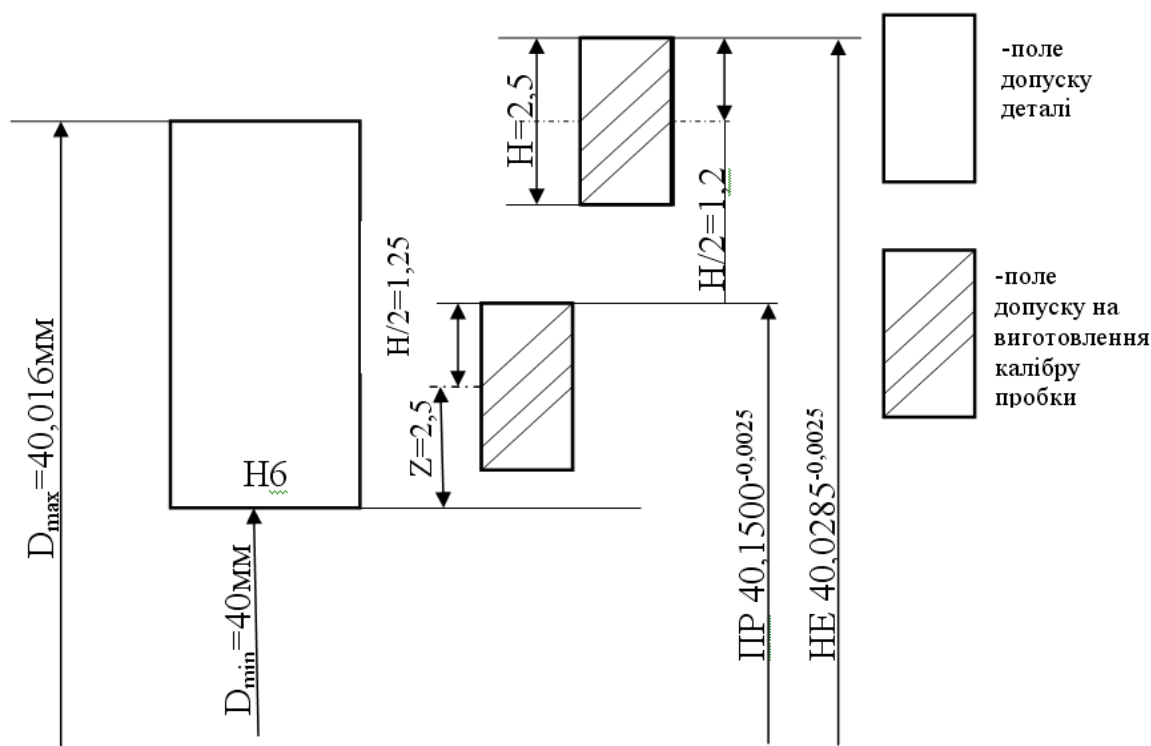


Рис. 2.14. Схема розташування полів допусків

Максимальний розмір розрахованої калібр-пробки:

$$\text{ПР}_{\max} = D_{\min} + Z + H/2 = 40 + 0,025 + 0,125/2 = 40,150\text{мм}. \quad (2.39)$$

ПР тоді розрахований розмір, що наноситься на конструкторське креслення з вказаним допуском $H=2,5\text{мкм}$, тоді : $40,150^{-0,0025}$.

Мінімальне значення розмір спрацьованої калібр-пробки:

$$\text{ПР}_{\text{знош}} = D_{\min} - Y = 40 - 0,002 = 39,998\text{мм}; \quad (2.40)$$

Максимальний розмір розрахованої непрохідної калібр-пробки:

$$H_{E_{\max}} = D_{\max} + H/2 = 40,016 + 0,025/2 = 40,0285 \text{ мм.} \quad (2.41)$$

Розмір калібру HE, який наноситься на робочому кресленні:

$$40,0285^{-0,0025} \text{ мм.}$$

Розраховані розміри для виконання :

Максимальний – 40,0285 мм;

Мінімальний – 40,0260 мм.

Після виготовлення калібр-пробку маркують: розмір деталі, яку контролюють розрахованим калібром, буква поля допуску. Значення граничних відхилень у мм., тип калібру (ПР, HE) і торговельний знак заводу-виготовлювача.

Конструювання і розрахунок пристосування до операції

Для токарних операцій 005 і 010, а також шліфувальній я спроектував спеціальний пристрій – 3-х кулачковий самоцентруючий патрон з пневмозатиском. Патрон призначений для базування заготовки 3-ма площинами та закріплення її силою Р. В пристрої заготовка впирається на торцеву поверхню шестерні. Зверху і з боків заготовка затискається за допомогою кулачків. Принцип дії пристрою наступний: зусилля від пневмоциліндру 7 передаються за допомогою штоку 27 на важіль 12. Переміщення штоку 27 ліворуч викликає рух кулачків 18 до центру патрону й заготовка затискається. Після руху штоку 27 праворуч відбувається розтискання заготовки.

Розрахунок погрішності базування у пристрої.

У даному пристрої заготовка базується у кулачках. Між заготовкою і кулачками може виникати зазор, котрий може дати погрішність базування. Проте, як було сказано вище, при обробці у 3-х кулачковому самоцентруючому патроні погрішність базування приймається $\varepsilon_6 = 0$.

Розрахунок зусиль закріплення деталі у пристрої.

Для розрахунку сили затиску деталі в пристрої необхідно розрахувати силу затиску на одному кулачку. Сила затиску на одному кулачку визначається за формулою:

$$W = \frac{D \cdot \delta \cdot P_z}{D \cdot n \cdot f}, \text{ кгс} \quad (2.42)$$

де: D_d – діаметр оброблюємої поверхні;

D – діаметр поверхні по який затискається заготовка;

n – кількість кулачків;

P_z – сила різання;

$f = 0,1$ – коефіцієнт тертя на робочих поверхнях кулачків

$$W = \frac{40 \cdot 864}{48 \cdot 3 \cdot 0,1} = 2400 \text{ Н} = 240 \text{ кгс}$$

Склавши силу затиску на кожному кулачку можна отримати загальну силу затиску деталі в пристрої:

$$\Sigma W = W_1 + W_2 + W_3 = 240 + 240 + 240 = 720 \text{ кгс} \quad (2.43)$$

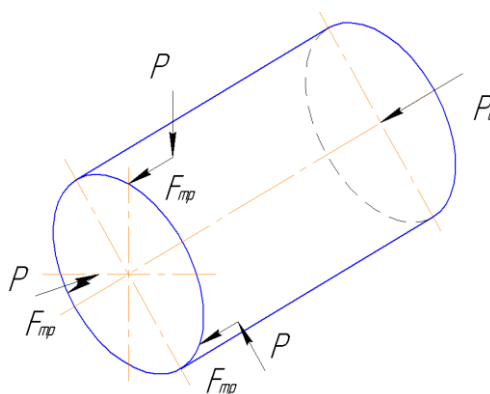


Рис. 2.15. Схема навантаження сил на заготовку

Силу, яку передає привод 3-х кулачковому патрону $\varnothing 250$ мм складає 720 кгс. Враховуючи співвідношення пліч у важелі 15 з урахуванням півтора кратного запасу міцності нам необхідно:

$$Q = \Sigma W \cdot \frac{l_1}{l_2} = 720 \cdot \frac{1}{2} \cdot 2 = 720 \text{ кгс} \quad (2.44)$$

Розрахуємо діаметр пневмоциліндру, який необхідно даному патрону.

Сила, яка розвивається на штоку пневмоциліндру дорівнює:

$$Q = F_{\text{пор}} \cdot p \cdot \eta, \quad (2.45)$$

де: $p = 4 \text{ кгс/см}^2$ – тиск скрапленого повітря в пневмосистемі;

$$F_{\text{пор}} = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} - \text{площа поршня}; \quad (2.46)$$

$\eta = 0,87$ – ККД пневмоциліндру.

Визначення розмірів затискного елемента пристрою.

Зневажаючи величиною діаметру штоку d (малою у порівнянні з діаметром поршню D) знаходимо діаметр поршню пневмоциліндру за формулою:

$$D = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{4 \cdot \pi \cdot \eta}} = \sqrt{\frac{720 \cdot 4}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,87}} = 16,2 \text{ см} = 162 \text{ мм} \quad (2.47)$$

За ГОСТ 1654-71 «механізовані приводи для самоцентруючих токарних патронів» табл.VI.П с. 377 [59] приймаємо найближчий більший діаметр пневмоциліндру: $D = 160 \text{ мм}$.

Згідно тієї ж таблиці максимальна сила, що передається приводом Ø160 мм складає $Q = 2000 \text{ кгс}$. При цьому сумарна сила затиску кулачків досягає від 5000 до 7000 кгс.

Розрахунок найбільш навантажених деталей на міцність.

Розрахуємо на міцність вісь 13 Ø12 мм виготовлену з сталі 45. Проводимо розрахунок на зріз. Для сталі 45: $[\tau_{зр}] = 60 \text{ кгс/мм}^2$. Щоб вісь не зрізало необхідно виконати умову: $[\tau_{зр}] \geq \tau_{зр}$. Розраховуємо:

$$\tau_{зр} = \frac{\frac{Q}{\pi \cdot D^2}}{4}, \quad (2.48)$$

де: $Q = 720 \text{ кгс}$ – зусилля на важелі;

$d = 12 \text{ мм}$ – діаметр осі

$$\tau_{зр} = \frac{\frac{720}{3,14 \cdot 12^2}}{4} = 6,5 \text{ кгс/мм}^2$$

$6,5 < 60 \quad \tau_{зр} < [\tau_{зр}]$ – умова виконана.

2.6. Модернізована технологія обробки деталі корпус

За рахунок використання спеціального інструментального пристрою виникає можливість досягти необхідних показників по якості обробки поверхонь на токарній операції (геометричності точності та шорсткості), що досягаються

на чистовій операції – досягти на напівчистовій, але з певними обмеженнями. У нашому випадку коли заготовка виготовлена, заготівка –виливка в кокіль, клас точності 4.

В 010 операції $\varnothing 40^{+0,016}$ для обробки якого в базовому технологічному процесі технологічний маршрут складається з 2х проходів

- Розточування чорнове
- Розточування чистове

Використання інструментального пристрою, призначеного для операцій точіння, дозволяє досягти необхідних показників по якості вже на першій операції токарної обробки поверхні деталі корпус. Це дає можливість відмовитись від другого проходу, та досягти необхідних показників обробки поверхонь по точності та шорсткості.

Таким чином, модернізуємо існуючий технологічний процес відмовившись від технологічного проходу.

У зв'язку зі зміною умов обробки на операції 010, необхідно заново розрахувати, оптимізувати та призначити режими різання на вказаній операції, з урахуванням конструктивних особливостей, застосовуваного в них у якості обробляючого інструмента – інструментального пристрою. Таким чином, модернізований технологічний процес, у порівнянні з існуючим, що дозволяє скороти час на виробництво

Розрахунок режимів різання

Операція 010

2 перехід: розточування

Розточити $\varnothing 37,6$ до $\varnothing 40^{+0,016}$ на довжину $\ell = 25$ мм, забезпечив шорсткість обробленої поверхні $Ra = 1,6$ заготівка вилита в кокіль зі сталі 40Х

ГОСТ 4543-71

Обираємо характеристику різального інструменту. Назначаємо розточний різець, оснащений змінною 3-ти гранною твердосплавною пластиною Т15К6 Розмір державки різця $B \times H = 25 \times 25$ мм² [57].

Виліт державки різця L_p

$$L_p \approx (1,0 \dots 1,5) \cdot H = 1,5 \cdot 25 = 37,5 \text{ мм} \quad (2.49)$$

Приймаємо $L_p = 35 \text{ мм}$.

Таблиця 2.2.

Геометричні параметри різальної частини різця з пластиною

Кут	γ	α	φ	φ_1	λ	r
Величина, град	12	12	93	10	-4	1

де: $\varphi = 90^\circ$ – головний кут в плані розточувальних різців;

$\varphi_1 = 10^\circ$ – допоміжний кут в плані

головний передній кут в головній січній площині: $\gamma = 12^\circ$

головний задній кут (в головній січній площині): $\alpha = 12^\circ$

Призначаємо період стійкості інструменту $T = 60 \text{ хв}$. [58] та критерій затуплення – спрацювання по головній задній поверхні $h_s = 1,00 \text{ мм}$ [32].

Визначаємо глибину різання як при напівчистовій обробці (до $Ra = 1,6$ включно), за один прохід.

глибина розточування: $t = 2,4 \text{ мм}$ (рівна припуску на обробку на цьому переході)

Визначаємо максимально допустиму подачу з врахуванням факторів, що обмежують її величину.

Подача, обмежена жорсткістю деталі, що прогинається під дією сили

$$R_{zy} = \sqrt{P_z^2 + P_y^2} \approx 1,1 P_z, \text{ мм/об.}:$$

$$S_{\text{д.ж.}} \leq y_{Pz} \sqrt{\frac{K \cdot E \cdot I \cdot f_{\text{д}}}{1,1 \ell_{\text{д}}^3 \cdot C_{Pz} \cdot t^{x_{Pz}} \cdot V^{n_{Pz}} \cdot K_{Pz}}} \quad (2.50)$$

де K – коефіцієнт, що залежить від засобу закріплення деталі на верстаті,
 $K = 48$ при обробці у патроні

E – модуль пружності обробного матеріалу, для легованої сталі
 $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа;

I – в поперечному перетині деталі момент інерції:

$$I \approx 0,05 d_{\text{чорн}}^4 = 0,05 (d_{\text{чорн}} - 2t_1)^4$$

Оскільки заготовка має 2 діаметри (цапфи та вінця) використаємо в розрахунку менший з них (цапфи), $d = 58$ мм.

f_d – прогин деталі, що допускається: при чорновому точінні $f_d = 0,2 \dots 0,4$, при чистовому $f_d = 0,2 \cdot \Delta$, оскільки точність, що необхідно досягти характерна напівчистовій обробці, приймаємо $f_d = 0,2 \cdot \Delta = 0,2 \cdot 0,46 = 0,092 \approx 0,1$ мм, де Δ – допуск на розмір деталі ($\Delta = 0,46$ мм).

Значення коефіцієнтів та показників ступеню в емпіричній формулі для тангенціальної технологічної сили за віссю Z

$$P_z = C_{Pz} \cdot t^{x_{Pz}} \cdot S^{y_{Pz}} \cdot V^{n_{Pz}} \cdot K_{Pz} \quad C_{Pz} = 300, x_{Pz} = 1,0, y_{Pz} = 0,75, n_{Pz} = -0,15$$

Поправочний коефіцієнт K_{Pz} :

$$K_{Pz} = K_{mp_z} \cdot K_{\varphi p_z} \cdot K_{\gamma p_z} \cdot K_{\lambda p_z} \cdot K_{rp_z},$$

де K_{mp_z} – поправочний коефіцієнт для сталі, який враховує якість обробного матеріалу та її вплив на силові залежності, по табл. 9 [59], для обробних легованих сталей $\sigma_s = 540$ МПа < 600 МПа, твердим сплавом

$$K_{mp_z} = \left(\frac{\sigma_s}{750} \right)^n = \left(\frac{540}{750} \right)^{0,75} = 0,782$$

$K_{\varphi p_z}, K_{\gamma p_z}, K_{\lambda p_z}, K_{rp_z}$ – поправочні коефіцієнти, які залежать від геометрії різальної частини різця [табл. 23, 59] відповідно: головного кута в плані φ – для $\varphi = 90^\circ$ $K_{\varphi p_z} = 1,0$; переднього кута γ – для $\gamma = 12^\circ$ $K_{\gamma p_z} = 1,0$; кута нахилу головного леза λ – для $\lambda = -4^\circ$ $K_{\lambda p_z} = 1,0$; радіуса при вершині r – $r = 1$ мм $K_{rp_z} = 0,93$.

$$K_{Pz} = K_{mpz} \cdot K_{\varphi pz} \cdot K_{\gamma pz} \cdot K_{\lambda pz} \cdot K_{rpz} = 0,782 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,93 = 0,727$$

$$S_{\partial.ж.} \leq 0,75 \sqrt{\frac{48 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 0,05 \cdot 58^4 \cdot 0,1 \cdot 50^{0,15}}{1,1 \cdot 223^3 \cdot 300 \cdot 2,25^{1,0} \cdot 0,727}} \leq 44,17 \text{ мм/об}$$

$$S_{\partial.ж.} \leq 44,17 \text{ мм/об}$$

Подача, обмежена жорсткістю державки різця, що вигинається під дією тангенціальної технологічної сили P_z , мм/об

$$S_{p.ж.} \leq y_{Pz} \sqrt{\frac{3E \cdot I \cdot f_p}{L_p^3 \cdot C_{Pz} \cdot t^{x_{Pz}} \cdot V^{n_{Pz}} \cdot K_{Pz}}}, (2.51)$$

де I – момент інерції поперечного перетину державки різця, для прямокутного перетину

$$I = \frac{B \cdot H^3}{12} = \frac{25 \cdot 25^3}{12} = 2,6 \cdot 10^4 \text{ мм}^4;$$

E – модуль пружності заготовки, для вуглецевої сталі $E = 2,1 \cdot 10^4$ кг/мм⁴, або в системі СІ – $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа

L_p – виліт різця, $L_p = 35$ мм;

f_p – прогин різця, що допускається, при чорновій $f_p \leq 0,1$ мм, при чистовій $f_p \leq 0,05$ мм, приймаємо як для чистової обробки $f_p = 0,05$ мм.

$$S_{p.ж.} \leq 0,75 \sqrt{\frac{3 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 2,6 \cdot 10^4 \cdot 0,05 \cdot 50^{0,15}}{35^3 \cdot 300 \cdot 2,25^{1,0} \cdot 0,727}} \leq 13,39 \text{ мм/об}$$

$$S_{p.ж.} \leq 13,39 \text{ мм/об}$$

Подача, обмежена міцністю різця, при дії технологічного навантаження сили P_z на вигин, мм/об

$$S_{p.нр.} \leq y_{Pz} \sqrt{\frac{W \cdot [\sigma_u]}{L_p \cdot C_{Pz} \cdot t^{x_{Pz}} \cdot V^{n_{Pz}} \cdot K_{Pz}}}, (2.52)$$

де W – момент опору перетину державки різця

$$W = \frac{B \cdot H^2}{6} = \frac{25 \cdot 25^2}{6} = 2080 \text{ мм}^3;$$

$[\sigma_u]$ – допустиме напруження на вигин матеріалу державки, для державки з незагартованої конструкційної сталі $[\sigma_u] = 20 \text{ кг/мм}^2$, або в системі СІ $[\sigma_u] = 200 \text{ МПа}$

$$S_{p.np.} \leq 0.75 \sqrt{\frac{2080 \cdot 20 \cdot 50^{0.15}}{35 \cdot 300 \cdot 2.25^{1.0} \cdot 0.727}} \leq 7.11 \text{ мм/об}$$

$$S_{p.np.} \leq 7.11 \text{ мм/об}$$

Подача, що обмежена потужністю, яку може розвинути механізм подачі (максимально допустима сила подачі), мм/об

$$S_{Px} \leq y_{Px} \sqrt{\frac{P_{xвр}}{C_{Px} \cdot t^{x_{Px}} \cdot V^{n_{Px}} \cdot K_{Px}}} \quad (2.53)$$

де $P_{xвр}$ – найбільше зусилля, що допускається механізмом подачі верстата, для верста 16K20 $P_{xвр} = 6000 \text{ Н}$ додаток 1 [31].

$C_{Px}, x_{Px}, n_{Px}, K_{Px}$ – значення коефіцієнтів та показників ступенів в емпіричній формулі для осьової сили $P_x = C_{Px} \cdot t^{x_{Px}} \cdot S^{y_{Px}} \cdot V^{n_{Px}} \cdot K_{Px}$ обираємо по [табл. 22, 59], для матеріалу обробного конструкційна сталь, що оброблюється твердим сплавом, при зовнішньому повздовжньому точінні: $C_{Px} = 300, x_{Px} = 1.0, y_{Px} = 0.5, n_{Px} = -0.4$.

Поправочний коефіцієнт K_{Px} :

$$K_{Px} = K_{mp_x} \cdot K_{\phi p_x} \cdot K_{\gamma p_x} \cdot K_{\lambda p_x} \cdot K_{rp_x},$$

де K_{mp_x} – поправочний коефіцієнт для сталі, який враховує як якість обробного матеріалу впливає на силові залежності, по [табл. 9, 59], для обробних легованих сталей $\sigma_s = 540 \text{ МПа} < 600 \text{ МПа}$, твердим сплавом

$$K_{mp_x} = \left(\frac{\sigma_{\sigma}}{750} \right)^n = \left(\frac{540}{750} \right)^1 = 0,72,$$

$K_{\varphi p_x}, K_{\gamma p_x}, K_{\lambda p_x}, K_{rp_x}$ – поправочні коефіцієнти, які враховують геометрію різальної частини різця [табл. 23, 59] відповідно: головного кута в плані φ – для $\varphi = 90^\circ$ $K_{\varphi p_x} = 1,0$; переднього кута γ – для $\gamma = 12^\circ$ $K_{\gamma p_x} = 1,0$; кута під яким розташоване головне різальне лезо λ – для $\lambda = -4^\circ$ $K_{\lambda p_x} = 1,0$; радіуса заокруглення вершини різця r – $r = 1$ мм $K_{rp_x} = 1,0$.

$$K_{Px} = K_{mp_x} \cdot K_{\varphi p_x} \cdot K_{\gamma p_x} \cdot K_{\lambda p_x} \cdot K_{rp_x} = 0,72 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,72.$$

$$S_{Px} \leq 0,5 \sqrt{\frac{600 \cdot 50^{0,4}}{339 \cdot 2,25^{1,0} \cdot 0,72}} \leq 27,29 \text{ мм/об},$$

$$S_{Px} \leq 27,29 \text{ мм/об}$$

Подача, що допускається міцністю пластинки твердого сплаву, визначаємо по [табл. 13, 59]. Подача, яку дозволяє міцність змінної твердосплавної пластинки, в процесі обробки сталі інструментом з головним кутом в основній площині $\varphi = 90^\circ$ при товщині пластини 4,75 мм та глибині різання $t = 2,4$ мм, при цьому обране значення величини подачі перемножене на поправочний коефіцієнт 1,2, прийнятий для сталі 40Х з $\sigma_{\sigma} = 540$ МПа

$$S_{пл.пр.} = 1,3 \cdot 1,2 = 1,56 \text{ мм/об}$$

Оскільки на даній операції, необхідну отримати шорсткість, обробленої поверхні, значення якої характерно для напівчистої обробки, а саме ($Ra = 1,6$), то проведемо розрахунок величини подачі, що забезпечує отримання заданої шорсткості обробленої поверхні, яка визначається за формулою, мм/об:

$$S_{шорст} \leq K_{S_z} \cdot K_{S_m} \cdot K_{S_{\varphi 1}} \cdot r^{0,33}, \quad (2.54)$$

де K_{S_z} – коефіцієнт, що залежить від необхідної шорсткості обробленої поверхні, за [32] для $Rz = 10$ – $K_{S_z} = 0,62$;

K_{S_m} – коефіцієнт, що залежить від властивостей обробного матеріалу, за [32] для $\sigma_s = 540$ МПа – $K_{S_m} = 0,75$;

$K_{S_{\phi 1}}$ – коефіцієнт, що залежить від величини допоміжного кута в плані, за [32] $K_{S_{\phi 1}} = 0,84$.

$$S_{шорт} \leq 0,62 \cdot 0,75 \cdot 0,84 \cdot 1^{0,33} \leq 0,415 \text{ мм/об}.$$

З усіх значень допустимих подач по різним обмеженням для подальшого розрахунку приймаємо мінімальну. Такою є $S_{шорт} \leq 0,415$ мм/об.

Корегуємо цю подачу по паспорту верстата 16K20 [додаток 1, 31], та приймаємо найближчу меншу:

$$S = 0,4 \text{ мм/об}.$$

Розраховуємо швидкість різання, що допускається різальними властивостями різця та корисною потужністю верстата.

Швидкість різання, що допускається різальними властивостями матеріалу різальної частини різця, м/хв

$$v_u = \frac{C_v}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S^{y_v}} \cdot K_v, \quad (2.55)$$

де C_v , x_v , y_v , m – значення коефіцієнтів та показників ступенів в емпіричній формулі для визначення швидкості різання при обробці, обираємо по [табл. 17, 59], для матеріалу обробного сталь з $\sigma_s = 540$ МПа, що оброблюється твердим сплавом, при зовнішньому повздовжньому точінні різцем з матеріалом різальної частини T15K6 і подачею $S = 0,4$ мм/об; $C_v = 350$, $x_v = 0.15$, $y_v = 0.35$, $m = 0.2$

K_v – поправочний коефіцієнт, що враховує конкретні умови обробки,

$$K_v = K_{M_V} \cdot K_{n_V} \cdot K_{u_V},$$

де K_{M_V} – коефіцієнт, що враховує якість обробного матеріалу

$$K_{Mv} = K_z \left(\frac{750}{\sigma_\theta} \right)^{n_v},$$

де K_z – коефіцієнт, що характеризує групу оброблюваності, по [табл. 2, 59] приймаємо $K_z = 1.0$, $n_v = 1.0$.

$$K_{Mv} = 1.0 \left(\frac{750}{700} \right)^{1.0} = 1.1.$$

K_{nv} – коефіцієнт, що відображає якість поверхні обробки, для поковки по [табл. 5, 59] – $K_{nv} = 0.8$;

K_{uv} – коефіцієнт, що враховує якість матеріалу інструмента, для обробки сталі конструкційної різцем з різальною частиною Т15К6 [по табл. 6, 59] приймаємо $K_{uv} = 1.0$;

$$K_v = K_{Mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{uv} = 1.1 \cdot 1.0 \cdot 0.8 = 0.9.$$

$$v_u = \frac{350}{60^{0.2} \cdot 2.4^{0.15} \cdot 0.4^{0.35}} \cdot 0.9 = 197 \text{ м/хв}$$

Швидкість різання, що допускається корисною потужністю верстату, м/хв

$$v_{верс} = 1 + n_{Pz} \sqrt{\frac{N_\partial \cdot \eta_{верс} \cdot 60 \cdot 102}{C_{Pz} \cdot t^{x_{Pz}} \cdot S^{y_{Pz}} \cdot K_{Pz}}}, \quad (2.56)$$

де N_∂ – потужність максимальна номінальна, яку має електродвигун, встановлений у приводі головного руху, кВт, по [31] для 16К20 – $N_\partial = 10$ кВт;

$\eta_{верс}$ – К.К.Д. приводу верстату, величина змінна, яка залежить від числа обертів шпинделю верстата, в середньому можливо прийняти $\eta_{верс} = 0.75$.

$$v_{верс} = 1 - 0.15 \sqrt{\frac{10 \cdot 0.75 \cdot 60 \cdot 102}{300 \cdot 2.4^{1.0} \cdot 0.4^{0.75} \cdot 0.727}} = 470 \text{ м/хв}$$

Коефіцієнти та показники ступеню для розрахунку тангенціальної складової сили різання P_z прийняті

За розрахункову швидкість різання приймаємо найменшу з найдених т. б.

$$v = v_u = 197 \text{ м/хв}$$

По прийнятій швидкості різання розраховуємо необхідну кількість обертів шпинделю верстата:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d_{\text{заг}}} = \frac{1000 \cdot 197}{3.14 \cdot 40} = 1568 \text{ об/хв}$$

Знайдена кількість обертів шпинделю корегується по верстату (беремо найближче менше або найбільше, якщо воно не перевищує 5 %), т. б.значається дійсна кількість обертів шпинделю з яким буде відбуватися обробка.

По паспорту верстату 16K20 [додаток 1, 31] найближча більша частота 1600 об/хв,

$$n_{\partial} = 1600 \text{ об/хв}$$

Визначаємо дійсну швидкість різання, м/хв

$$V_{\partial} = \frac{\pi \cdot d_{\text{заг}} \cdot n_{\partial}}{1000} = \frac{3.14 \cdot 40 \cdot 1600}{1000} = 200,1 \text{ м/хв}$$

Визначаємо коефіцієнт використання інструменту по швидкості різання

$$K_V = \frac{V_{\partial}}{V_{\text{розр}}} \cdot 100\% = \frac{200,1}{197} \cdot 100 = 101\% \quad (2.57)$$

та коефіцієнт використання верстату по потужності:

$$K_N = \frac{N_{e.\text{піз}}}{N_{e.\text{вер}}} \cdot 100\% \quad (2.58)$$

$$K_N = \frac{P_z \cdot v_{\partial}}{60 \cdot 102 \cdot N_{\partial} \cdot \eta_{\text{верс}}} \cdot 100\% = \frac{C_{P_z} \cdot t^{x_{P_z}} \cdot s^{y_{P_z}} \cdot v_{\partial}^{1+n_{P_z}} \cdot K_{P_z}}{60 \cdot 102 \cdot N_{\partial} \cdot \eta_{\text{верс}}} \cdot 100\%$$

$$K_N = \frac{300 \cdot 2,4^{1,0} \cdot 0,4^{0,75} \cdot 200,1^{1-0,15} \cdot 0,727}{60 \cdot 102 \cdot 10 \cdot 0,75} \cdot 100\% = 51,31\%$$

Визначимо основний часу на даній операції, основний час t_o на операції точіння визначається:

$$t_o = \frac{L \cdot i}{n_{\partial} \cdot s} \quad (2.59)$$

де i – кількість проходів, для даної операції $i = 1$;

L – довжина проходу різця,

$$L = \ell_{вр} + \ell_{об} + \ell_{пр},$$

де $\ell_{вр}$ – врізання різця, $\ell_{вр} = t \cdot \operatorname{ctg} \varphi = 2,4 \cdot \operatorname{ctg} 45^\circ = 2,4 \cdot 1 = 2,4$ мм

ℓ_{∂} – довжина обробки заготовки, $\ell_{\partial} = 25$ мм;

$\ell_{пр}$ – довжина перебігу різця, $\ell_{пр} = 1 \dots 3$ мм, приймаємо $\ell_{пр} = 3$ мм

$$L = 2,4 + 25 + 3 = 30,4 \text{ мм}$$

$$t_o = \frac{L \cdot i}{n_{\partial} \cdot s} = \frac{30,4 \cdot 1}{1600 \cdot 0,4} = 0,04 \text{ хв}$$

3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ

3.1. Загальні вихідні дані

В результаті аналізу ряду технологічних процесів по виготовленню деталі «корпус» було встановлено, що багато техпроцесів містять велику кількість операцій, переважна частина яких припадає на операцію точіння.

Модернізація технологічного процесу за допомогою використання розробленої конструкції розробленого розточувального різця дозволить уникнути операцій проміжної, напівчистої токарної обробки, підвищити якість обробки (точність форми).

Розрахунок показників економічної ефективності виконаємо для деталі «корпус» на токарно-гвинторізному верстаті 16К20. В якості інструменту на даних операціях використовується токарний розточувальний різець, із матеріалом різальної частини – твердий сплав марки Т15К6.

В проектному варіанті передбачається вести обробку вказаних поверхонь деталі на токарно-гвинторізному верстаті 16К20 із застосуванням спроектованого інструментального пристрою.

Розрахуємо річну потребу в інструменті за формулою:

$$k_i = \frac{N_o \cdot T_{нор} \cdot \gamma \cdot \kappa_{вт}}{t_e (1 + p)}, \quad (3.1)$$

N_o – річна програма виробництва деталей, шт/рік;

$T_{нор}$ – штучний час обробки однієї деталі, хв.;

γ – питоме значення машинного часу в загальному його варіанті;

$\kappa_{вт}$ – коефіцієнт випадкової втрати інструменту;

t_e – економічна стійкість інструменту, хв.;

p – кількість переточок інструменту до повного зносу.

Потреба у прохідних різцях (базовий варіант):

$$\kappa_{\sigma} = \frac{5000 \cdot 3,04 \cdot 0,6 \cdot 1,1}{60 \cdot (7 + 1)} = 21 \text{ шт.}$$

Потреба в інструментальному пристрої (проектний варіант):

$$\kappa_{\sigma} = \frac{5000 \cdot 1,5 \cdot 0,45 \cdot 1,01}{300} = 12 \text{ шт.}$$

Потребу в обладнанні визначаємо за формулою:

$$Q_p = \frac{N_{\sigma} \cdot T_{\text{нор}}}{F_{\text{дрм}} \cdot 60 \cdot \kappa_{\sigma}}, \quad (3.2)$$

де $F_{\text{дрм}}$ – дійсний річний фонд часу роботи обладнання, год.;

κ_{σ} – коефіцієнт виконання норм (за даними підприємства).

Потреба у верстатах:

- у базовому варіанті:

$$Q_p = \frac{5000 \cdot 3,04}{4015 \cdot 60 \cdot 1,1} = 0,06 \text{ (1 верстат з коефіцієнтом завантаження } \eta = 0,06)$$

- в проектному варіанті:

$$Q_{np} = \frac{5000 \cdot 1,5}{4015 \cdot 60 \cdot 1,1} = 0,03 \text{ (} Q_{np} = 1, \eta = 0,03)$$

Техніко-економічні показники базового та проектного варіантів зведено до табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Загальні вихідні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ п/п	Показник	Одиниця	Варіанти	
			базовий	проект
1.	Програма випуску деталей	шт/рік	5000	5000
2.	Потреба у верстатах	шт/рік	1	1
3.	Штучний час обробки	хв.	3,04	1,5
4.	Площа, яку займає верстат	м ²	3,26	2,56
5.	Потужність електродвигунів	кВт	10,0	10,0
6.	Категорія ремонтної складності механічної/електричної частин	УРО	11/8,5	11/12
7.	Розряд роботи верстатника	розряд	3	3
8.	Оптова ціна верстата	грн..	202800	232700

3.2. Визначення витрат на підготовку виробництва

3.2.1. Витрати на проектування інструментального пристрою визначаємо за формулою:

$$B_{пк} = H_{op} \cdot T_{кон} \cdot Z_{сз}^к \cdot \left(1 + \frac{\kappa_{\partial}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_{\epsilon}, \quad (3.3)$$

де H_{op} – кількість найменувань оригінальних деталей, які входять до конструкції інструменту, шт.;

$T_{кон}$ – сумарна кількість годин на розробку усіх видів конструкторської документації, яка в середньому припадає на одне найменування оригінальних деталей, нормо-год.;

$Z_{сз}^к$ – середньогодинна заробітна плата конструктора, грн./год.;

κ_{∂} – додаткова заробітна плата конструктора, %;

B_c – відрахування у соціальні фонди від заробітної плати конструкторів, %;

H_{ϵ} – накладні витрати, грн. (визначаються в процентах від основної заробітної плати конструктора).

$$B_{пк} = 5 \cdot 19 \cdot 102,272 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 5 \cdot 19 \cdot 102,272 \cdot \frac{45}{100} = 17410,86 \text{ грн.}$$

3.2.2. Витрати на технологічну підготовку виробництва інструменту:

$$B_m = H_{op} \cdot T_{тех} \cdot Z_{сз}^м \cdot \left(1 + \frac{\kappa_{\partial}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_{\epsilon}, \quad (3.4)$$

де $T_{тех}$ – сумарна трудомісткість технологічних робіт, які припадають на одне найменування оригінальних деталей, нормо-год.;

$Z_{сз}^м$ – середньогодинна заробітна плата технолога, грн./год.

$$B_m = 5 \cdot 21 \cdot 100,228 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 5 \cdot 21 \cdot 100,228 \cdot \frac{55}{100} = 19911,24 \text{ грн.}$$

3.3. Визначення повної собівартості проектного інструменту

Після визначення трудомісткості виготовлення проектного інструментального пристрою розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

$$З_{ор} = \sum_{i=1}^n C_{ri} \cdot T_i, \quad (3.5)$$

де n – кількість i -тих видів робіт;

C_{ri} – середньогодинна тарифна ставка робітників, які виконують i -й вид робіт з урахуванням умов праці, грн.

Так, основна заробітна плата виробничих робітників на механічних роботах:

$$З_{ор} = 82,586 \cdot 2,1 = 173,43 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_o = \sum_{i=1}^n З_{ор_i} \cdot \frac{П_{рр_i}}{100}, \quad (3.6)$$

де $П_{рр_i}$ – процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання по кожному i -му виду робіт за заводською калькуляцією.

в) цехові витрати:

$$K_{цех} = \sum_{i=1}^n З_{ор_i} \cdot \frac{П_{цр_i}}{100}, \quad (3.7)$$

де $П_{цр}$ – процент цехових витрат по кожному i -му виду робіт за заводською калькуляцією.

Так, для механічних робіт:

$$B_o = 173,43 \cdot \frac{322}{100} = 558,45 \text{ грн.}$$

$$K_{цех} = 173,43 \cdot \frac{232}{100} = 402,36 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей на інших роботах, результати заносимо до табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Трудомісткість виготовлення та окремі види витрат, які включені до собівартості інструментального пристрою

Види робіт	Трудомісткість робіт н-год	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітників, грн./год	Основна заробітна плата робітників $З_{ор}$, грн	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, B_o , грн.		Загальноце- хові витрати $K_{цех}$, грн.	
					%	грн.	%	грн.
Заготівельні	0,66	3	83,248	54,94	245	134,61	132	72,53
Механічні	2,10	4	82,586	173,43	322	558,45	232	402,36
Термічні	0,50	3	92,191	46,10	285	131,37	250	115,24
Складальні	0,30	4	82,586	24,78	210	52,03	142	35,18
Всього	3,56	—	—	299,25	—	876,46	—	625,31

Собівартість виготовлення інструментального пристрою розраховуємо за статтями витрат за допомогою отриманих на підприємстві кошторисних та звітних калькуляцій базових конструкцій. Розрахунок виконуємо за формулою:

$$C_{вир} = M_o + M_d + \Pi_n + B_n + T_v - B_{зв} + E_{тех} + \Pi_{тех} + \\ + Z_{ор} + Z_{др} + B_{сс} + B_o + K_{цех} + K_{зав} + B_{ін}, \quad (3.8)$$

де M_o , M_d – відповідно витрати на основні та допоміжні матеріали, грн.;

Π_n – покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств, грн.;

Розрахунок витрат на основні матеріали та покупні напівфабрикати зведено до табл. 3.3.

T_v – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

B_n – напівфабрикати власного виробництва, грн.;

$B_{зв}$ – зворотні відходи, які реалізуються (віднімаються), грн.;

$E_{тех}$, $\Pi_{тех}$ – енергія та паливо на технологічні цілі, грн.;

$Z_{др}$ – допоміжна заробітна плата виробничих робітників, грн.;

$B_{сс}$ – відрахування у соціальні фонди, грн.;

$K_{\text{зав}}$ – загальнозаводські витрати, грн.;

$B_{\text{ін}}$ – інші виробничі витрати, грн.

Таблиця 3.3

Склад матеріальних витрат на інструментальний пристрій

№ п/п	Матеріали, покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби	Одиниця	Витрати (шт, кг)	Ціна, грн	Витрати на виріб, грн.
Основні матеріали					
1	Сталь 40Х	кг	3,0	43,70	131,10
2	Твердий сплав Т15К6	кг	0,9	480,00	432,00
3	Еластичний полімер	кг	0,2	149,50	29,90
Всього					593,00
Покупні напівфабрикати					
1	Тензодатчики	шт.	2	74,00	148,00
2	Управляючий мікроелемент	шт.	1	56,80	56,80
Всього		–	–	–	204,80

Розрахунок собівартості зводимо до табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Повна собівартість виготовлення інструменту

№ п.п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн.
1	2	3	4	5
1.	Матеріали основні	M_o	табл. 3.3	593,00
2.	Матеріали допоміжні	M_d	4% від M_o	23,72
3.	Покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств	P_n	табл. 3.3	204,80
4.	Зворотні відходи	$-B_{\text{зв}}$	8% від M_o	35,58
5.	Транспортно-заготівельні витрати	T_v	5% від $(M_o + M_d + P_n)$	32,86
6.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$P_{\text{тех}}, E_{\text{тех}}$	58% від $З_{\text{ор}}$	173,56
7.	Всього матеріальні витрати			992,36

Продовження табл. 3.4

1	2	3	4	5
8.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{ор}$	табл. 3.2	299,25
9.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{др}$	10% від $З_{ор}$	29,92
10.	Відрахування у соціальні фонди	B_{cc}	22,0% від $(З_{ор} + З_{др})$	72,42
11.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення	$З_{уп}$	12,2% від $З_{ор}$	36,51
12.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	B_o	табл. 3.2	876,46
13.	Цехові витрати	$K_{цех}$	табл. 3.2	625,31
14.	Загальнозаводські витрати	$K_{зав}$	220% від $З_{ор}$	658,34
15.	Інші виробничі витрати	$B_{ін}$	3,1% від $З_{ор}$	9,28
16.	Виробнича собівартість	$C_{вир}$	$\Sigma(7 \div 15)$	3600,0

3.4. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки), на одиницю продукції в базовому та проектному варіантах

Розрахунок виконуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^m B_i, \quad (3.9)$$

де B_z – витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування на соціальне страхування основних робітників, грн.;

B_e – витрати на силову електроенергію, грн.;

B_{ip} – витрати на експлуатацію ріжучого інструменту, грн.;

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

B_p – витрати на ремонт обладнання, грн.;

B_n – витрати на утримання приміщення, грн.;

B_n – витрати на наладку, грн.;

B_a – витрати на амортизацію обладнання, грн.

Витрати на заробітну плату основну, додаткову з відрахуваннями на соціальні потреби:

$$B_3 = C_r \frac{T_{\text{нор}}}{60} \cdot (1 + K_d) \cdot (1 + K_c), \quad (3.10)$$

де $T_{\text{нор}}$ – час обробки деталі, хв.;

K_d, K_c – коефіцієнти відповідно додаткової зарплати та відрахувань на соціальні потреби (єдиний соціальний внесок).

В базовому варіанті:

$$B_{3б} = 84,217 \cdot \frac{3,04}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 6,4303 \text{ грн.}$$

В проектному варіанті:

$$B_{3п} = 84,217 \cdot \frac{1,5}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 2,5384 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

$$B_e = \frac{N_b \cdot K_o \cdot K_N \cdot K_d}{\eta_m \cdot \eta_c} \cdot \frac{T_{\text{шт}}}{60} \cdot C_{\text{ел}} \quad (3.11)$$

де N_b – встановлена потужність електродвигунів верстата, кВт;

K_o – коефіцієнт одночасної роботи моторів (згідно [8] $K_o = 0,65 \dots 0,8$);

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (згідно [8], для токарних верстатів $K_N = 0,5 \dots 0,6$);

K_d – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів верстата за часом (згідно [8] $K_d = 0,3 \dots 0,5$);

η_c – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів – 0,86;

η_m – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства;

$C_{\text{ел}}$ – ціна 1 кВт-год силовій електроенергії, грн.

$$B_{\text{ел}}^{\text{баз}} = \frac{10 \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 3,04}{0,88 \cdot 0,95 \cdot 60} \cdot 8,235 = 1,0482 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{ел}}^{\text{пр}} = \frac{10 \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 1,5}{0,88 \cdot 0,95 \cdot 60} \cdot 8,235 = 0,3860 \text{ грн.}.$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{\text{мв}} = \frac{M_{\text{гв}} \cdot R_{\text{м}} \cdot T_{\text{шт}}}{60 \cdot 100} \cdot K_{\text{п}} \quad (3.12)$$

де $M_{\text{гв}}$ – годинні витрати на допоміжні матеріали на 1 УРО механічної частини всіх типів верстатів, коп.;

$R_{\text{м}}$ – категорія складності ремонту механічної частини верстата, УРО;

$K_{\text{п}}$ – коефіцієнт, який враховує тип (для серійного $K_{\text{п}} = 1,0$).

$$B_{\text{дм}}^{\text{баз}} = \frac{74,5 \cdot 11 \cdot 3,04}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,4151 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{дм}}^{\text{нр}} = \frac{74,5 \cdot 11 \cdot 1,5}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,1639 \text{ грн.}$$

Витрати на експлуатацію універсального ріжучого інструменту:

$$B_{\text{іп}} = \frac{(S_{\text{у}} + p \cdot S_{\text{пер}}) \cdot \gamma \cdot T_{\text{нор}}}{t_{\text{е}} (p + 1)} K_{\text{вт}}, \quad (3.13)$$

де $S_{\text{у}}$ – первісна вартість універсального ріжучого інструменту, грн.;

p – кількість переточувань ріжучого інструменту до повного зносу по лімітуючому розміру ріжучої грані;

$S_{\text{пер}}$ – вартість одного переточування, грн.;

γ – питома значення машинного часу роботи обладнання в загальному варіанті його роботи;

$t_{\text{е}}$ – економічна стійкість інструменту, хв.;

$K_{\text{вт}}$ – коефіцієнт обліку втрат інструменту.

$$B_{\text{іп}}^{\text{баз}} = \frac{(1146,5 + 7 \cdot 134,0) \cdot 0,6 \cdot 3,04}{60 \cdot (1 + 7)} \cdot 1,1 = 8,7140 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{іп}}^{\text{нр}} = \frac{3600 \cdot 0,45 \cdot 1,5}{300} \cdot 1,01 = 8,1810 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_{\text{р}} = \frac{R_{\text{м}} \cdot \Gamma_{\text{вм}} + R_{\text{с}} \cdot \Gamma_{\text{вс}}}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (3.14)$$

де $\Gamma_{\text{вм}}, \Gamma_{\text{вс}}$ – відповідні річні витрати на всі види ремонту на 1 УРО механічної та електричної частин верстата, грн./рік;

$F_{\text{дрм}}$ – дійсний річний фонд часу роботи верстата (при двозмінному режимі роботи для серійного виробництва – 4015 год).

$$B_{\text{р}}^{\text{баз}} = \frac{11 \cdot 980 + 8,5 \cdot 645}{4015} \cdot \frac{3,04}{60} = 0,2240 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{р}}^{\text{нр}} = \frac{11 \cdot 990 + 12 \cdot 645}{4015} \cdot \frac{1,5}{60} = 0,0282 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{\text{уп}} = \frac{F_{\text{о}} \cdot K_{\text{д}} \cdot C}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (3.15)$$

де $F_{\text{о}}$ – виробнича площа, яку займає одиниця обладнання, м²;

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт, який враховує додаткову площу: на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення [1, табл. 7]:

C – річні витрати, пов'язані з використанням 1 м² виробничого приміщення, грн/м².

$$B_{\text{уп}}^{\text{баз}} = \frac{3,26 \cdot 3,5 \cdot 3,26}{4015 \cdot 60} \cdot 780 = 0,1226 \text{ грн.};$$

$$B_{\text{уп}}^{\text{нр}} = \frac{2,56 \cdot 3,5 \cdot 1,5}{4015 \cdot 60} \cdot 780 = 0,0336 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію верстата:

$$B_{\text{а}} = \frac{\Phi_{\text{бал}} \cdot H_{\text{а}}}{F_{\text{дрм}} \cdot 100} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (3.16)$$

де $H_{\text{а}}$ – норма амортизації, %;

$\Phi_{\text{бал}}$ – балансова вартість верстата, грн.

Балансову вартість верстатів знайдемо за формулою:

$$\Phi_{\text{бал}} = \Pi_{\text{опт}} \cdot (1 + K_{\text{тр}} + K_{\text{м}} + K_{\text{ф}}), \quad (3.17)$$

де $\Pi_{\text{опт}}$ – оптова ціна верстата, грн.;

$K_{тр}$, K_m , K_{Φ} – відповідно коефіцієнти, які враховують транспортування (0,05...0,1), монтаж (0,04...0,06) та влаштування фундаменту (0,02...0,08).

Таким чином, балансова вартість верстатів:

– в базовому варіанті:

$$\Phi_{\text{бал}}^{\text{баз}} = 202800 \cdot (1 + 0,08 + 0,07 + 0,04) = 241332 \text{ грн.}$$

– в проектному варіанті:

$$\Phi_{\text{бал}}^{\text{пр}} = 232700 \cdot (1 + 0,08 + 0,07 + 0,04) = 276913 \text{ грн.}$$

$$B_a^{\text{баз}} = \frac{241332 \cdot 20 \cdot 3,04}{4015 \cdot 60 \cdot 100} = 0,6091 \text{ грн.},$$

$$B_a^{\text{пр}} = \frac{276913 \cdot 20 \cdot 1,5}{4015 \cdot 60 \cdot 100} = 0,3448 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Експлуатаційні витрати (собівартість обробки)

№ п/п	Експлуатаційні витрати	Умовне позначення	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1.	Заробітна плата основна, додаткова з відрахуваннями на соціальні потреби	B_z	6,4303	2,5384
2.	Силовa електроенергія	$B_{ел}$	1,0482	0,3860
3.	Допоміжні матеріали	$B_{\text{дм}}$	0,4151	0,1639
4.	Універсальний ріжучий інструмент	B_{ip}	8,7140	8,1810
5.	Ремонт обладнання	B_p	0,2240	0,0282
6.	Утримання приміщення	B_{yn}	0,1226	0,0336
7.	Амортизація обладнання	B_a	0,6091	0,3448
Загальна сума		B_e	17,5633	11,6759

3.5. Розрахунок показників економічної ефективності

Річний економічний ефект, який отримає підприємство від розробки, виготовлення та експлуатації інструментального пристрою, розрахуємо за формулою:

$$E_p = (B_e^{\text{баз}} - B_e^{\text{пр}}) \cdot N_d - E_n \cdot K_d, \quad (3.20)$$

де $B_e^{\text{баз}}$, $B_e^{\text{пр}}$ – експлуатаційні витрати відповідно в базовому та проектному варіантах, грн.;

N_d – річна програма обробки деталі на верстаті;

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень ($E_n = 0,16$);

K_d – додаткові капітальні витрати підприємства, грн.

$$K_d = B_{\text{нк}} + B_{\text{т}} + \Phi_{\text{бал}}^{\text{пр}} \cdot \eta_{\text{пр}} - \Phi_{\text{бал}}^{\text{баз}} \cdot \eta_{\text{баз}} + \Pi_i^{\text{пр}} \cdot K_i^{\text{пр}} - \Pi_i^{\text{баз}} \cdot K_i^{\text{баз}}, \quad (3.21)$$

$B_{\text{пк}}$, $B_{\text{т}}$ – витрати на конструкторську та технологічну підготовку виробництва інструментального пристрою, грн.;

$\Phi_{\text{бал}}^{\text{пр}}$, $\Phi_{\text{бал}}^{\text{баз}}$ – відповідно балансова вартість верстатів у проектному та базовому варіантах, грн.;

$\eta_{\text{пр}}$, $\eta_{\text{баз}}$ – коефіцієнт завантаження верстатів на операції обробки деталі «корпус» відповідно в проектному і базовому варіантах;

$\Pi_i^{\text{пр}}$, $\Pi_i^{\text{баз}}$ – вартість інструменту відповідно в проектному і базовому варіантах, грн.;

$K_i^{\text{пр}}$, $K_i^{\text{баз}}$ – потреба в інструменті відповідно в проектному і базовому варіантах.

$$K_d = 17411 + 19911 + 232700 \cdot 0,03 - 202800 \cdot 0,06 + 3600 \cdot 12 - 1146,5 \cdot 21 = 51259 \text{ грн.}$$

$$E_p = (17,5633 - 11,6759) \cdot 5000 - 0,16 \cdot 27353 = 21240 \text{ грн.}$$

Строк окупності додаткових капітальних вкладень:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_d}{(B_e^{\text{баз}} - B_e^{\text{пр}}) \cdot N_d} \quad (3.22)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{51259}{(17,5633 - 11,6759) \cdot 5000} = 1,7 \text{ роки}$$

У підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічних показників проекту (табл. 3.6).

Таблиця 3.6

Підсумкові техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ п/п	Показники	Оди- ниця	Базовий варіант	Проект	Зміна, % (+,-)
1.	Потреба в інструменті	шт/рік	21	12	-42,9
2.	Річний випуск деталі «корпус»	шт/рік	5000	5000	—
3.	Штучний час обробки деталі	хв.	3,04	1,50	-50,7
4.	Потреба у верстатах	шт.	1	1	—
5.	Коефіцієнт завантаження верстата	η	0,06	0,03	-50,0
6.	Балансова вартість верстата	грн.	202800	232700	+14,7
7.	Собівартість виготовлення інструментального пристрою	грн.	—	3600,0	—
8.	Оптова ціна інструменту	грн.	1146,5	—	—
9.	Собівартість обробки однієї деталі	грн.	17,5633	11,6759	-33,5
10.	Додаткові капітальні витрати, у тому числі на конструкторську та технологічну підготовку виробництва	грн.	—	51259	—
11.	Строк окупності додаткових капітальних витрат	років	—	1,7	—
12.	Річний економічний ефект	грн.	—	21240	—

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз існуючих методів підвищення точності дозволив встановити, що найкращу перспективу застосування мають інструментальні пристрої, конструкція яких дозволяє компенсувати пружну деформацію і таким чином покращити якість обробки при розточуванні.

Здійснивши аналіз ряду схем інструментальних пристроїв, які реалізують вказані можливості, була обрана схема на основі якої розроблена конструкція розточувального інструментального пристрою.

Розроблений розточувальний різець дає змогу підвищити якість обробки завдяки тому, що має у своїй конструкції спеціальний елемент, який дозволяє частково, або повністю компенсувати похибку обробки, та частково невілювати вібрації в технологічній системі і поліпшити якісний параметр шорсткість.

Описані у роботі схеми інструментів, в тому числі й для розточування внутрішніх поверхонь, не охоплюють всю гаму існуючих та спроектованих інструментів, що в своїй будові мають системи пристосування до конкретних умов обробки.

Використання розробленого розточувального різця дозволило на операції розточування техпроцесу обробки деталі «Корпус» досягти необхідної якості обробки за один прохід, замість двох, та зменшити технологічний час, необхідний для виготовлення деталі.

Виконані техніко-економічні розрахунки довели ефективність застосування розробленого розточувального різця, зменшивши час на обробку з 3,04 хв. до 1,5 хв. і досягти річного прибутку в сумі 21240 грн. на партію з 5000 деталей.

ЛІТЕРАТУРА

1. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: у 3-х част. Частина III. Агрегатно-модульне технологічне обладнання нового покоління, його оснащення та інструментальне забезпечення. /Під заг. ред. Ю.М. Кузнецова. Навч. посібник для ВНЗ. – Кіровоград, 2003. – 507 с.
2. Адаптивное управление станками / Базров Б.М., Балакшин Б.С., Баранчуков И.М., Вороненко В.П., Евсеев Б.А. и др.; Под ред. Б.С. Балакшина – М.: Машиностроение, 1973, – 688 с.
3. Адаптивное управление точностью обработки: Обзор / А.С. Колтышев, Г.А. Кухарев, Я.С. Лившиц, М.С. Невельсон, Г.А. Овчинников и др.; Под ред. М.С. Невельсона.– М.: НииМаш, 1975.– 136 с.
4. Базров Б. М. Технологические основы проектирования самоподнастраивающихся станков.– М.: Машиностроение, 1978 – 216 с.
5. Батраков С.В., Тихомиров Б.К. Сборные токарные резцы с вибродемпфирующей державкой // Станки и инструмент.– 1990.– № 12.– С. 28-30.
6. Гейлер З.Ш. Самонастраивающиеся системы активного контроля размеров.– М.: Машиностроение, 1972.– 176 с.
7. Голоскоков Е.Г., Филиппов А.П. Нестационарные колебания деформируемых систем.– К.: Наукова думка, 1977.– 340 с.
8. Економічні та організаційно-планові розрахунки при розробці нових виробів. Навчальне видання / Укладачі: Скляренко І.В., Лебедєва Л.В., Романюк Л.М.– Кіровоград: КДТУ, 2001.– 36 с.
9. Иванов М.Н. Детали машин: Учеб. для студ. высш. техн. учебн. заведений.– 5-е изд., перераб.– М.: Высш. шк., 1991.– 383 с.
10. Ігнат'єв, Е. С. Основні тенденції розвитку сучасного ріжучого інструменту / Е. С. Ігнат'єв, О. В. Лисенко // Наукові записки : зб. наук. пр. - Кіровоград : КНТУ, 2011. - Вип. 11, ч. 1. - С. 221-225.
11. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1978. – 200 с.
12. Ковришкін М. О., Лисенко О. В. Теорія технічних систем : конспект лекцій з елемент. кредитно-трансфертної системи орг. навч. процесу для студ. напрямів підготовки 6.050502 «Інженерна механіка» та 6.050503 «Машинобудування», спец. 131 "Прикладна механіка" та 133 "Галузеве

машинобудування" / [уклад. М. О. Ковришкін, О. В. Лисенко] ; М-во освіти і науки України, Кіровоград. нац. техн. ун-т, каф. металорізальних верстатів та систем. – Кропивницький : КНТУ, 2016. – 80 с.

13. Колев К.С., Горчаков Л.М. Точность обработки и режимы резания.— Изд. 2-е.— М.: Машиностроение, 1976.— 144 с.

14. Коллер Я. Д. Математический анализ точности механической обработки деталей, – К.: Техника, 1976.— 200 с.

15. Косилова А. Г. Точность обработки деталей на автоматических линиях.— М.: Машиностроение, 1976.— 254 с.

16. Кудинов. В.А. Динамика станков.— М: Машиностроение, 1967.— 360 с.

17. Купчевич Є. Підвищення стійкості різального клину розточувального інструменту при обробці переривчастих отворів /, О. Скібінський, А. Апаракін, О. Лисенко // Збірник праць молодих науковців ЦНТУ. – Вип. 14. – Кропивницький: ЦНТУ, 2024. – С. 44-49.

18. Лисенко О. В. Автоматичне управління процесами обробки : метод. реком. до викон. практ. робіт для студ. освітнього рівня «Магістр» спеціальності 131 "Прикладна механіка" / [уклад. О. В. Лисенко] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. металорізальних верстатів та систем. - Кропивницький : ЦНТУ, 2020. - 64 с.

19. Лисенко О. В. Динамічна модель технологічної оброблювальної системи точіння з урахуванням компенсуючого пристрою / О. В. Лисенко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград: КНТУ, 2011. - Вип. 24, ч. 2. - С. 131-136.

20. Лисенко О. В. Модульні системи адаптації / О. В. Лисенко // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. КІСМ. - Кіровоград : КІСМ, 1998. - Вип. 4. - С. 181-185.

21. Лисенко О. В. Підвищення точності обробки за допомогою модульних систем адаптації / О. В. Лисенко // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. КДТУ. - Кіровоград: КДТУ, 2000. - Вип. 6. - С. - 38-40.

22. Лисенко О. В., Єрьомін П. М. Проектування та виробництво різального інструмента : метод. рекомендації до виконання практ. роб. для студ.

спец. 131 - Прикладна механіка та 133 - Галузеве машинобудування / [уклад. : О. В. Лисенко, П. М. Єрьомін] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. металорізальних верстатів та систем. - Кропивницький : ЦНТУ , 2020. – 48 с.

23. Лисенко О. В., Лисенко В. М. Різальний інструмент : метод. вказівки до викон. курсового проекту для студ. напряму підготовки 6.050502 "Інженерна механіка", спец. 131 "Прикладна механіка" та 133 "Галузеве машинобудування" / [уклад. О. В. Лисенко, В. М. Лисенко] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. металорізальних верстатів та систем. – Кропивницький : ЦНТУ, 2018. – 96 с.

24. Лисенко, О. В. Прогнозування технологічної спадковості при токарній обробці / О. В. Лисенко, Ю. В. Петраков // Вісник Сумського державного університету. Серія : Технічні науки (Машинобудування). Суми : СумДУ, 2003. - № 2(48). - С. 91-95.

25. Лисенко, О. В. Розробка динамічної моделі технологічної оброблювальної системи точіння з урахуванням багатомасовості / О. В. Лисенко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. - Кременчук : КДПУ, 2008. - Вип. 6. Ч. 1. - С. 74-76.

26. Лисенко, О. В. Розробка інструментальних систем з адаптивним управлінням процесом обробки методом морфологічного аналізу / О. В. Лисенко, Є. С. Ігнат'єв // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. - Кіровоград: КНТУ, 2012. - Вип. 25, ч. 1. - С. 252-257.

27. Мажара В.А. Система автоматизованого проектування технологічного оснащення / В.А. Мажара, К.К. Щербина, А.М. Артюхов, С.А. Тененика, І.С. Шестаков // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – Вип. 54. – С. 12-23.

28. Медведев Д.Д. Автоматизированное управление процессом обработки резанием.— М.: Машиностроение, 1980.— 143 с.

29. Медведев Д.Д. Точность обработки в мелкосерийном производстве.— М.: Машиностроение, 1973.— 120 с.

30. Невельсон М.С. Автоматическое управление точностью обработки на металлорежущих станках.– Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1982.– 184 с.
31. Нефедов Н.А., Осипов К.А. Сборник задач и примеров по резанию металлов и режущему инструменту: Учебн. пособие для техн.– М.: Машиностроение, 1984.– 400 с.
32. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. / Часть. 1. М.: Машиностроение, 1974.– 406 с.
33. Орликов М. Л. Динамика станков. – К.: Вища школа, 1980. – 256 с.
34. Паливода Ю. Є. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки : навчально-методичний посібник / Ю.Є. Паливода, А.Є. Дячун, Р.Я. Лещук. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. – 240 с.
35. Пестунов В. М. Повышение точности обработки на станках.– Машиностроитель.– 1999.– № 2-3.– С. 24-28.
36. Пестунов В. М. Розробка та дослідження модульних систем адаптації / В. М. Пестунов, О. В. Лисенко // Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Серия : Машиностроение. - К. : НТУУ "КПИ", 2000. - № 39. - С. 196-199.
37. Пестунов В. М., Лисенко О. В. Адаптивний та переналагоджуваний інструмент / В. М. Пестунов, А. В. Лысенко // Техника машиностроения. - Москва, 2000. - № 1. - С. 13-24.
38. Пестунов В. М., Лисенко О. В. Переналагоджувальні системи верстатного обладнання / В. М. Пестунов, А. В. Лысенко // Техника машиностроения. - Москва, 2000. - № 4. - С. 14-24.
39. Пестунов В. М., Кариков Е. А. Повышение точности и производительности металлорежущих станков.– К.: Техніка, 1979.– 96 с.
40. Пестунов В. М., Лисенко О. В. Локалізовані адаптивні механізми технологічної верстатної системи / В. М. Пестунов, А. В. Лысенко // Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение. - К. : НТУУ "КПИ", 2006. - № 49. - С. 138-144.
41. Пестунов В. М., Лисенко О.В. Прогресивні технології машинобудування / В. М. Пестунов, А. В. Лысенко // Вестник Национального

технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Серия : Машиностроение. – К. : НТУУ "КПИ", 2004. – № 45. – С. 65-69.

42. Пестунов В. М., Лисенко О.В. Способи підвищення вихідних характеристик металообробного обладнання / В. М. Пестунов, А. В. Лисенко // Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение. - К. : НТУУ "КПИ", 2003. - № 44. - С. 196-199.

43. Пестунов, В. М. Нові технології та металообробний інструмент / В. М. Пестунов, О. В. Лисенко, В. М. Лисенко // Машинобудування та металообробка – 2003 : тези доповідей Першої Міжнар. наук.-техн. конф., м. Кіровоград, 17-19 квіт. 2003р. – Кіровоград : КДТУ, 2003.– С. 177-179.

44. Петраков Ю. В. Моделювання динамічних характеристик процесу токарного точіння / Ю. В. Петраков, О. В. Лисенко // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. КДТУ. - Кіровоград: КДТУ, 2002. - Вип. 11. - С. 257-263.

45. Петраков Ю. В. Моделювання частотних характеристик технологічної оброблювальної системи токарного верстата / Ю. В. Петраков, О. В. Лисенко // Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение. - К. : НТУУ "КПИ", 2002. - № 43. - С. 79-83.

46. Петраков Ю. В. Управління динамічними характеристиками технологічної оброблювальної системи при точінні (тези доповіді) / Ю. В. Петраков, О. В. Лисенко // Машинобудування та металообробка – 2003 : тези доповідей Першої Міжнар. наук.-техн. конф., м. Кіровоград, 17-19 квіт. 2003р. – Кіровоград : КДТУ, 2003.– С. 179-181.

47. Петраков Ю.В. Теорія автоматичного управління в металообробці: Навч. посібник.– К.: ІЗМН, 1999.– 212 с.

48. Петраков Ю.В. Управління динамічними характеристиками технологічної оброблювальної системи при точінні / Ю. В. Петраков, О.В. Лисенко // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. КДТУ.- Кіровоград: КДТУ, 2003. - Вип. 12. - С. 41-48.

49. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями.– М.: Машиностроение, 1970.– 350 с.

50. Подураев В.Н. Резание трудно-обрабатываемых материалов.— М.: Высшая школа, 1974.— 587 с.
51. Попов В.И., Локтев В.И. Динамика станков.— К.: Техніка, 1975.— 136 с.
52. Прилуцкий В.А. Технологические методы снижения волнистости поверхностей. — М.: Машиностроение, 1978. — 136 с.
53. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник-учебник. В 3-х т. Т.1. Проектирование станков: Под. общ. ред. А.С. Проникова.— М.: Машиностроение, 1994.— 444 с.
54. Равська Н. С. Металорізальні інструменти: підручник / Н. С. Равська — Житомир: ЖДТУ, 2016. — 612 с.
55. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков.— М.: Машиностроение, 1986.— 336 с.
56. Соломенцев Ю.М. Митрофанов В.Г., Протопопов С.П. и др. Адаптивное управление технологическими процессами. — М.: Машиностроение. — 1980.— 536 с.
57. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др.; Под общ. ред. И.А. Ординарцева.— Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987.— 846 с.
58. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова.— 4-е изд., перераб. и доп.— М.: Машиностроение, 1985.— 656 с.
59. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова.— 4-е изд., перераб. и доп.— М.: Машиностроение, 1985.— 496 с.
60. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки: Підручник. — Житомир: ЖІТІ, 2001. — 612 с.
61. Струтинський В.Б., Мельничук П.П. Математичне моделювання металорізальних верстатів: монографія.— Житомир: ЖІТІ, 2002.— 570 с.
62. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках. — М.: Машиностроение, 1982. — 208 с.
63. Технологическая надежность станков: Под ред. д-ра техн. наук проф. А.С. Проникова — М.: Машиностроение, 1971.— 342 с.
64. Тимошенко С.П. Прочность и колебания элементов конструкций.— Гл. ред. Физ.-мат. литературы из-ва "Наука", 1975.— 704 с.

65. Ткачук О. В. Підвищення продуктивності обробки за допомогою модульних інструментальних систем / О. В. Ткачук, О. В. Лисенко // Збірник праць молодих науковців КНТУ.- Кіровоград: КНТУ, 2012. - Вип. I - С. 274-279.
66. Федоров В.Л., Кошеленко А.С., Копылов В.В., Жедь О.В. Модульный перетачиваемый токарный резец // СТИН.– 2000.– № 1.– С.17-19.
67. Хомяков В.С. Досько С.И. Об учете демпфирования при динамических расчетах станков// Станки и инструмент.– 1990.– № 11.– С. 4-7.
68. Эльясберг М. Е. Автоколебания металлорежущих станков : Теория и практика / М.Е. Эльясберг. - СПб : ОКБС, 1993. - 180 с.
69. Юркевич В.В. Прогнозирование точности изготовления деталей // Техника машиностроения.– 2000, № 4.– С. 46-52.
70. Юркевич В.В. Точность детали в продольном направлении // Вестник машиностроения.– 2001.– № 2.– С. 34-37.
71. Юркевич В.В., Чигинов Д.А., Искра Д.Е., Козлов С.А., Емельянов П.Н. Прогнозирование точности детали в процессе ее изготовления // Машиностроитель.– 2001, № 3.– С. 34-40.
72. Валявський, І. А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою : навч. посіб. / І. А. Валявський, О. В. Лисенко, І. А. Лисенко ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 281 с.
73. Павленко І.І. Захватні пристрої роботів / І.І. Павленко, М.О. Годунко // Захватні пристрої роботів: монографія. – Кропивницький: «КОД», 2020. – 386 с.
74. Павленко І.І. Роботизовані технологічні комплекси / Павленко І.І., Мажара В.А. // Роботизовані технологічні комплекси: монографія. – Кропивницький: «КОД», 2019. – 382 с.
75. Підгаєцький М.М., Скібінський О.І. Технологія випробувань та сертифікація продукції: навч. посіб. – Кіровоград: КНТУ, 2014. – 144 с.
76. Shcherbyna K. Kinematics of cutting process while honing holes with a hone with variable geometry of sticks / K. Shcherbyna, A. Hrechka, V. Mazhara, T. Diachenko // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ, 2020. – Вип. 50. – С.159-164.