

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:

**Розробка технології обробки стакана підшипника п'яти
з дослідженням впливу режимів різання на шорсткість
оброблюваної поверхні**

**Development of a technology for machining heel bearing
cups with research into the effect of cutting modes on the
roughness of the machined surface**

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури групи ПМ-24М-3
ОПП «Прикладна механіка»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»
_____ Олександр ЄРМАКОВ

Керівник роботи:
канд. техн. наук, доцент
_____ Віталій МАЖАРА

Рецензент:
канд. техн. наук, доцент
_____ Любов ОЛІЙНИЧЕНКО

Завідувач кафедри ММР
канд. техн. наук, доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки

Другий (магістерський) рівень вищої освіти

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

Освітньо-професійна програма: Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

машинобудування,

мехатроніки і робототехніки

канд. техн. наук, доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА

Завдання на кваліфікаційну роботу за другим (магістерським) рівнем вищої освіти Єрмакову Олександрю Костянтиновичу

Тема роботи:

Розробка технології обробки стакана підшипника п'яти з дослідженням впливу режимів різання на шорсткість оброблюваної поверхні

Керівник роботи:

канд. техн. наук, доцент Віталій МАЖАРА

Затверджено наказом ЦНТУ від 22 серпня 2025 року № 48-13.

Строк подання роботи до захисту:

20 грудня 2025 р.

Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Виявити основні технологічні фактори, що впливають на мікрогеометрію обробленої поверхні, та обґрунтувати вибір параметрів, що будуть досліджуватись.

Розробити методику досліджень впливу швидкості різання, подачі та глибини різання на параметри шорсткості R_a та R_z .

Виконати статистичну обробку даних та встановити емпіричні залежності (побудувати математичну модель), що адекватно описують зв'язок між режимами різання та параметрами шорсткості.

Розробити практичні рекомендації щодо вибору раціональних режимів різання, які забезпечують досягнення заданої шорсткості поверхні з максимальною продуктивністю.

Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічна частина	канд. екон. наук, доцент Ірина ЖУРИЛО		

Календарний план

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання роботи	Примітка
1	Опрацювання літератури по тематиці роботи	10.10.2025 р.	
2	Виконання технологічної частини	24.10.2025 р.	
3	Виконання конструкторської частини	30.10.2025 р.	
3	Виконання дослідної частини	19.11.2025 р.	
4	Виконання економічної частини	01.12.2025 р.	
5	Виконання графічної частини роботи	10.12.2025 р.	
6	Перевірка роботи на академічний плагіат	12.12.2025 р.	
7	Рецензування роботи	15.12.2025 р.	

Дата видачі завдання
01 вересня 2025 р.

Здобувач вищої освіти

Олександр ЄРМАКОВ

Керівник роботи

Віталій МАЖАРА

АНОТАЦІЯ

Єрмаков О. К. Розробка технології обробки стакана підшипника п'яти з дослідженням впливу режимів різання на шорсткість оброблюваної поверхні : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 131 «Прикладна механіка» ОПП «Прикладна механіка» / наук. кер. В. А. Мажара. Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. Кропивницький : ЦНТУ, 2025. - 72 с.

Графічна частина – 8 аркушів формату А1.

Актуальність роботи. Якість поверхонь деталей машин є одним із найважливіших експлуатаційних показників, що безпосередньо визначає їх довговічність, зносостійкість, корозійну стійкість, втомну міцність та контактну жорсткість. У сучасному машинобудуванні, де вимоги до надійності та ресурсу вузлів і механізмів постійно зростають, забезпечення заданих параметрів шорсткості обробленої поверхні набуває першочергового значення.

Мета роботи. Метою даної кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності процесу механічної обробки та якості оброблюваних поверхонь шляхом встановлення закономірностей впливу режимів різання на параметри шорсткості.

Наукова новизна. Виявлено керовані фактори процесу різання під час точіння. Показано, що крім загальноприйнятих параметрів, таких як: подача вздовж осі заготовки, радіус вершини і головний і допоміжний кути в плані істотний вплив має напрямок сумарного вектора подачі.

При точенні поверхні з радіусною утворюючою маємо змінне значення частоти обертання шпинделя кожної точки профілю в залежності від його діаметра. Це може бути додатковим резервом підвищення продуктивності у разі використання верстатів з ЧПУ, що дозволяють змінювати частоту обертання шпинделя при зміні поздовжньої координати.

Встановлено, що при обробці фасонних поверхонь подачу слід розглядати як векторну суму поздовжньої і поперечної подачі, що особливо актуально при точенні на верстатах з ЧПУ.

Показано, що головний і допоміжний кути в плані для забезпечення нормального протікання процесу різання повинні бути на $5...7^\circ$ більше кута наклепу оброблюваної поверхні.

шорсткість, технологія обробки, різець токарний, кут в плані, процес різання

ANNOTATION

Yermakov O. K. Development of a technology for machining heel bearing cups with research into the effect of cutting modes on the roughness of the machined surface : qualification work for the educational level "Master's" : specialty 131 "Applied Mechanics" EPP "Applied Mechanics" / scientific director V. A. Mazhara. Central Ukrainian National Technical University. Kropyvnytskyi: CUNTU, 2025. - 72 p.

Graphic part - 8 sheets of A1 format.

Relevance of the work. The quality of machine part surfaces is one of the most important operational indicators, directly determining their durability, wear resistance, corrosion resistance, fatigue strength, and contact stiffness. In modern mechanical engineering, where the requirements for the reliability and service life of components and mechanisms are constantly increasing, ensuring the specified roughness parameters of the machined surface is of paramount importance.

Purpose of the work. The purpose of this qualification work is to improve the efficiency of the machining process and the quality of machined surfaces by establishing the patterns of influence of cutting modes on roughness parameters.

Scientific novelty. Controllable factors of the cutting process during turning have been identified. It has been shown that, in addition to generally accepted parameters such as feed along the workpiece axis, tip radius, and main and auxiliary angles in the plane, the direction of the total feed vector has a significant effect.

When turning a surface with a radial generatrix, the spindle rotation speed at each point of the profile varies depending on its diameter. This can be an additional reserve for increasing productivity when using CNC machines that allow changing the spindle rotation speed when changing the longitudinal coordinate.

It has been established that when machining shaped surfaces, the feed should be considered as the vector sum of the longitudinal and transverse feeds, which is especially relevant when turning on CNC machines.

It has been shown that the main and auxiliary angles in the plan to ensure the normal course of the cutting process should be $5...7^\circ$ greater than the angle of the workpiece surface.

roughness, machining technology, turning tool, angle in the plane, cutting process

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	
1.1 Аналіз точності та технологічності деталі	10
1.2 Аналіз базового технологічного процесу	12
1.3 Вибір методів обробки поверхонь деталі	14
1.4 Розробка маршруту виготовлення деталі	17
2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	
2.1 Контрольно-вимірювальні пристрої у сучасному виробництві	21
2.2 Розробка конструкції контрольного пристрою	24
3 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА	
3.1 Вступ	26
3.2 Елементи різання і розміри шару, що зрізається при поздовжньому точенні	28
3.3 Вплив якості обробки поверхонь, на експлуатаційні властивості деталей машин	38
3.4 Вплив режимів різання на показники, що характеризують шорсткість обробленої поверхні	40
3.5 Висновки по розділу	55
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	
4.1 Розрахунок планової цехової собівартості	56
4.2 Аналіз варіантів технологічних процесів	58
ВИСНОВКИ	68
ЛІТЕРАТУРА	69

ВСТУП

В сучасному світі, де глобальна економіка все більше нагадує складний механізм, здатність країни не просто бути гвинтиком, але й проектувати, створювати та обслуговувати цілі вузли, визначає її стратегічне майбутнє. Машинобудування, в його широкому розумінні, є не просто галуззю промисловості; це фундамент, на якому тримається технологічний суверенітет, економічна стійкість та обороноздатність будь-якої держави. Проте сам по собі цей фундамент потребує постійної модернізації. Його ефективність сьогодні визначається трьома нерозривно пов'язаними компонентами: стратегічною важливістю самої галузі, рівнем обладнання та інструментів, що використовуються, та гнучкістю й інноваційністю технологічних процесів.

На відміну від сировинних секторів, машинобудування створює продукцію з високою доданою вартістю. Кожна гривня, інвестована в машинобудівний комплекс, генерує значно більший ефект в суміжних галузях – металургії, хімічній промисловості, електроніці, логістиці та сфері послуг. Ця галузь є одним з найбільших роботодавців, створюючи попит на висококваліфікованих інженерів, технологів, операторів верстатів та науковців. Це не просто робочі місця, а кар'єрні шляхи, що формують міцний середній клас.

Машинобудування є головним споживачем та водночас генератором науково-технічного прогресу. Саме тут нові матеріали, сплави, композити знаходять своє перше застосування. Потреби галузі стимулюють розвиток фундаментальної та прикладної науки, створюючи попит на R&D (дослідження та розробки). Наявність власних потужних інженерних шкіл та виробничих баз дозволяє країні не просто копіювати чужі технології, але й створювати власні, конкуруючи на глобальних ринках.

Сучасні обробні центри з числовим програмним керуванням (ЧПК), роботизовані комплекси, лазерні та гідроабразивні різальні машини забезпечують рівні точності (до мікрон) та якості поверхні, які є фізично недосяжними при ручній

праці чи на старому обладнанні. Це безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту – від надійності авіаційного двигуна до ефективності медичного імплантату. Багатоверстатне обслуговування, автоматична зміна інструменту та палет, інтеграція з промисловими роботами (наприклад, для завантаження/розвантаження верстатів) дозволяють досягти феноменальної продуктивності та можливості цілодобової роботи з мінімальним втручанням людини.

Сучасні інструменти – це складні інженерні вироби з твердих сплавів, кераміки, з багат шаровими наноструктурованими покриттями (PVD, CVD). Вони дозволяють реалізовувати прогресивні методи обробки, такі як високошвидкісне різання (HSM), обробку загартованих сталей "на суху" (без змащувально-охолоджувальних рідин), та ефективно обробляти екзотичні матеріали (титан, інконель, композити). Економія на інструменті неминуче призводить до втрати продуктивності всього дорогого комплексу обладнання.

Третій, і, можливо, найважливіший компонент – це "інтелект" виробництва. Технологічний процес – це "рецепт", за яким виготовляється деталь. Можна мати найкращу в світі кухню (обладнання) та інгредієнти (інструмент), але без правильного рецепту та шеф-кухаря (технолога) результат буде провальним.

Від "Як?" до "Навіщо?". Традиційна інженерія була зосереджена на питанні "Як виготовити цю деталь?". Сучасна інженерія, озброєна новими технологічними процесами, ставить питання "Навіщо ця деталь потрібна і якою вона має бути для ідеального виконання своєї функції?". Це призводить до революційних змін у проектуванні.

Найяскравіший приклад – промисловий 3D-друк. Він дозволяє створювати деталі з внутрішніми каналами охолодження, біонічними (сітчастими) структурами, які є водночас легшими та міцнішими за ті, що виготовлені литтям чи фрезеруванням. Гібридні процеси, що поєднують адитивне вирощування та подальшу 5-осьову фрезерну обробку в одному верстаті, відкривають шлях до ремонту унікальних дорогих компонентів (наприклад, лопаток турбін).

Цифровізація виробництва (Industry 4.0). Новий технологічний процес – це не лише про фізику різання, але й про інформаційні потоки. Наскрізнi цифрові ланцюги CAD (проектування) -> CAM (генерація траєкторій) -> CAE (інженерний аналіз) -> PLM (управління життєвим циклом) є стандартом. "Цифрові двійники" (digital twins) – віртуальні копії реальних верстатів чи цілих цехів – дозволяють моделювати та оптимізувати процеси ще до запуску першої деталі, уникаючи дорогих помилок та простоїв.

Сучасний ринок вимагає не масового виробництва мільйонів однакових виробів, а гнучкої адаптації до малих партій та індивідуальних замовлень (те, що є викликом для дрібносерійного типу виробництва). Новітні технологічні процеси, що базуються на швидкому програмному переналагодженні ЧПК та роботизованих систем, дозволяють зробити таку гнучкість економічно вигідною.

Розвиток машинобудування, інвестиції в сучасне обладнання та безперервний пошук нових технологічних процесів – це три стовпи, на яких тримається конкурентоспроможність нації. Вони не можуть існувати окремо. Застарілі процеси знецінюють нове обладнання. Відсутність сучасного інструменту робить неможливим впровадження нових процесів. А без потужної бази машинобудування як пріоритету державної політики, країна ризикує назавжди залишитись на периферії глобального технологічного розвитку. Інвестиції в цю тріаду – це не просто витрати; це стратегічна інвестиція в майбутнє, в якому країна виступає не споживачем, а творцем.

Кваліфікаційну роботу будемо виконувати у відповідності до методичних рекомендацій, що розроблені кафедрою ММР [1] та [2].

1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз точності та технологічності деталі

Деталь стакан підшипника п'яти 0603.72.001 виготовляється з сірого чавуна СЧ20 за ГОСТ 1412-79.

Підвищені вимоги, що до точності і шорсткості в даній деталі пред'являються до зовнішньої циліндричної поверхні $\varnothing 110F8(^{+0.09}_{+0.036})$ та внутрішньої циліндричної поверхні $\varnothing 80Js7(\pm 0,015)$. Ці поверхні є посадочними і по ним деталь базується у вузлі.

До зовнішньої поверхні $\varnothing 110F8$ висунуто вимогу щодо радіального биття відносно внутрішньої циліндричної поверхні $\varnothing 80Js7$ $\left[\begin{array}{c|c|c} \nearrow & 0,04 & A \end{array} \right]$.

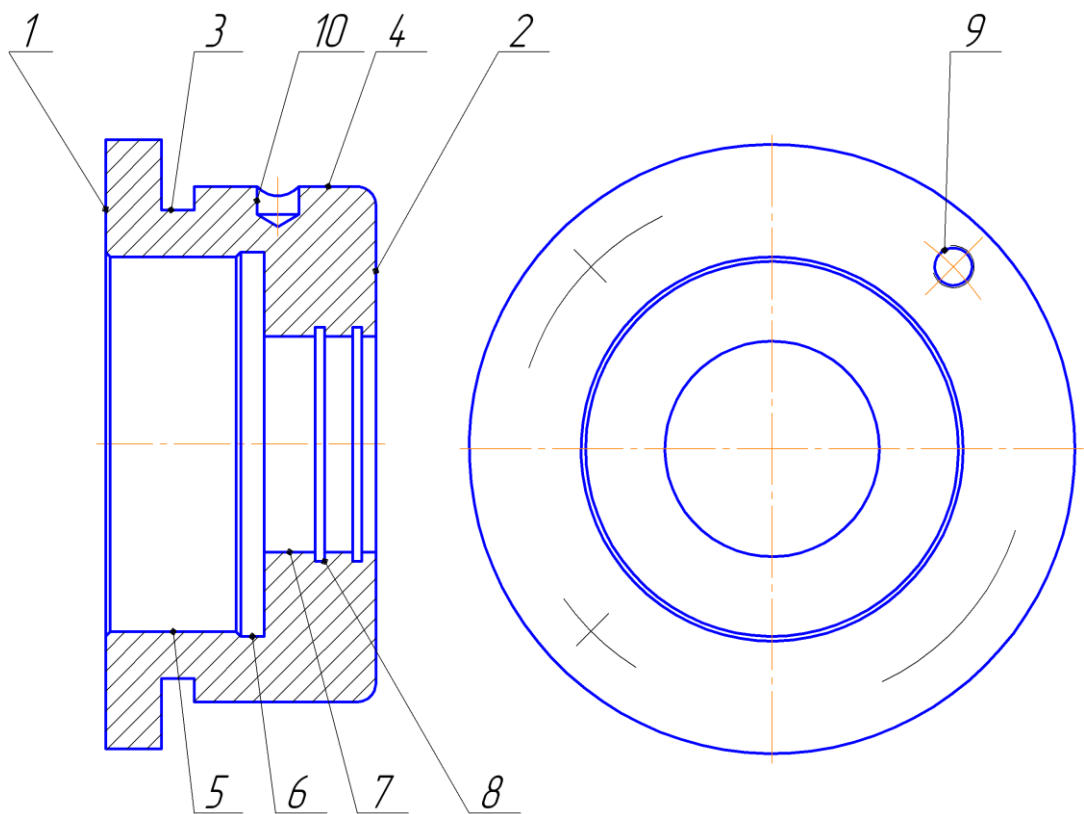
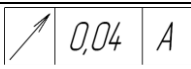


Рисунок 1.1 – Оброблявані поверхні в деталі стакан підшипника п'яти

З метою систематизації параметрів точності оброблюваних поверхонь, зводимо їх до таблиці 1.1. Нумерація поверхонь наведена на рисунку 1.1.

Таблиця 1.1 – Параметри точності стакану підшипника п'яти

№	Найменування поверхні	Розміри з відхиленням	Квалітет	Точність відносних поворотів	Точність форми	R _a
1	2	3	4	5	6	7
1, 2	Торці	58 _{-0,3}	h12	-	-	6,3
3	Канавка	Ø100 _{-0,35}	h12	-	-	6,3
4	Зовнішня циліндрична	Ø110 ^{+0,09} _{+0,036}	F8		-	3,2
5	Внутрішня циліндрична	Ø80±0,015	Js7	-	-	2,5
6	Канавка	Ø81 ^{+0,35}	H12	-	-	6,3
7	Внутрішня циліндрична	Ø46 ^{+0,11}	H11	-	-	6,3
8	Канавка	2±0,1	Js10	-	-	6,3
9	Отвори з різзю	M8	7H	-	-	3,2
10	Отвір	Ø9 ^{+0,09}	H11	-	-	6,3

Аналіз конструкції деталі стакан підшипника дозволяє зробити висновок про її технологічність при механічній обробці. Це зумовлено двома ключовими факторами:

1. Доступність поверхонь: геометрія деталі не містить важкодоступних зон, глибоких вузьких порожнин чи прихованих ділянок. Усі функціональні поверхні є відкритими, що дозволяє легко підвести ріжучий інструмент та забезпечити ефективну обробку з мінімальною кількістю перевстановок.

2. Висока жорсткість: деталь має масивну та жорстку конструкцію. Ця властивість є критично важливою, оскільки вона ефективно демпфує вібрації, що виникають у процесі різання. Як наслідок, стає можливим безперешкодне

застосування високопродуктивних методів обробки, включаючи великі глибини різання та високі подачі, без шкоди для точності розмірів та якості обробленої поверхні.

Таким чином, поєднання легкої доступності та жорсткості дозволяє розробити раціональний, економічно ефективний технологічний процес із мінімальним машинним часом.

1.2 Аналіз базового технологічного процесу

Технологічний процес механічної обробки виготовлення стакану підшипника п'яти складається з семи основних операцій.

Позитивною ознакою даного технологічного процесу є те, що порядок розміщення операцій та обладнання дозволяє отримати відповідну точність та якість поверхонь [10].

Базовий технологічний процес обробки деталі наведено в таблиці 1.2.

У технологічному процесі використовується універсальне обладнання. Це призводить до того, що технологічний процес має низьку продуктивність і не відповідає умовам серійного типу виробництва [10].

В якості заготовки для деталі стакан підшипника п'яти технологічно і економічно обґрунтовано прийнято відливку. Це рішення продиктоване конструктивними особливостями деталі та відповідає умовам даного типу виробництва.

Лиття дозволяє отримати фасонну заготовку, геометрія якої максимально наближена до номінальних розмірів готової деталі. Це забезпечує дві ключові виробничі переваги:

1. Мінімізація та раціональний розподіл припусків, тобто об'єм металу, що видаляється при подальшій механічній обробці, є мінімальним і рівномірно розподіленим. Це безпосередньо знижує собівартість (за рахунок економії матеріалу) та скорочує машинний час обробки.

2. Зниження трудомісткості, оскільки замість виконання енергоємних та тривалих чорнових операцій (наприклад, виточування глибоких внутрішніх порожнин з цільного прокату), більшість поверхонь вимагають лише чистових або напівчистових проходів.

Таким чином, використання відливки є виправданим, оскільки воно знижує матеріаломісткість та трудомісткість виготовлення деталі.

Таблиця 1.2 – Базовий технологічний процес обробки стакану підшипника п'яти

№ операції	Найменування операції та її зміст	Обладнання	T _{шт} , хв
005	Токарно-гвинторізна Обробити внутрішні поверхні	16K20	3,054
010	Токарно-гвинторізна Обробити зовнішні поверхні	16K20	2,685
015	Токарно-гвинторізна Точити дві канавки	16K20	1,985
020	Вертикально-свердлильна Свердлити 4 отвори під різь М8	2Н135	1,972
025	Вертикально-свердлильна Зенкувати фаски в 4 отворах	2Н135	0,861
030	Вертикально-свердлильна Нарізати різь М8 в 4 отворах	2Н135	2,888
035	Вертикально-свердлильна Свердлити отвір Ø 9 мм	2Н135	0,795

Додержуються принципи єдності і постійності баз. В якості технологічної бази на більшості операцій використано вісь деталі.

При проектуванні нового технологічного процесу, планується замінити токарні верстати на двошпиндельний верстат Monforts, а універсально свердлильні верстати замінити на вертикально-свердлильний верстат з ЧПК [5-8].

1.3 Вибір методів обробки поверхонь деталі

Проведемо вибір маршруту обробки найбільш точної поверхні – внутрішня циліндрична $\varnothing 80\text{Js}7\pm 0,015$, деталі стакан підшипника п'яти.

Розраховуємо загальне уточнення:

$$\varepsilon_{\text{заг}} = \frac{\delta_3}{\delta_0} = \frac{1,2}{0,03} = 40. \quad (1.1)$$

В даному випадку можливі два варіанти маршрутів обробки.

Перший маршрут:

1. Розточування чорнове.
2. Розточування чистове.
3. Розточування тонке.

Другий маршрут:

1. Зенкерування чорнове.
2. Зенкерування напівчистове.
3. Зенкерування чистове.
4. Розверчування.

По кожному проміжному методу обробки із таблиць економічної точності вибираємо допуски на обробку і розраховуємо частинні уточнення по першому маршруту [11]:

- розточування чорнове:

$$\varepsilon_1 = \frac{1,2}{0,22} = 5,455;$$

- розточування чистове:

$$\varepsilon_2 = \frac{0,22}{0,087} = 2,53;$$

- розточування тонке:

$$\varepsilon_3 = \frac{0,087}{0,03} = 2,9;$$

Частинне уточнення для другого маршруту обробки:

- зенкерування чорнове:

$$\varepsilon_1 = \frac{1.2}{0.35} = 3.43;$$

- зенкерування напівчистове:

$$\varepsilon_2 = \frac{0.35}{0.14} = 2.5;$$

- зенкерування напівчистове:

$$\varepsilon_3 = \frac{0.14}{0.054} = 2.593;$$

- розверчування:

$$\varepsilon_4 = \frac{0.054}{0.03} = 1.8.$$

Достатність і економічну доцільність вибору маршруту обробки перевіряємо за умовою фактичного уточнення:

$$\varepsilon_{\text{заг}} \leq \varepsilon_{\phi} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 \cdot \varepsilon_4; \quad (1.2)$$

Перший маршрут. $\varepsilon_{\phi 1} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 = 5.455 \cdot 2.53 \cdot 2.9 = 40.02 > \varepsilon_{\text{заг}} = 40.$

Другий маршрут. $\varepsilon_{\phi 2} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 \cdot \varepsilon_4 = 3.43 \cdot 2.5 \cdot 2.593 \cdot 1.8 = 40.02 > \varepsilon_{\text{заг}} = 40.$

Більш прийнятним є маршрут по першому варіанту.

Вибір маршрутів обробки інших поверхонь наведено в таблиці 1.3. Номери поверхонь приведені на рисунку 1.1.

Таблиця 1.3 – Зведена таблиця технологічних маршрутів обробки поверхонь

№ пов	Допуск на поверхню δ_d , мм	Допуск на заготовку δ_z , мм	Загальне уточнення, E_z	Шорсткість поверхні, мкм	Можливі варіанти маршрутів обробки		Допуск на методи обробки	Уточнення по кожному переходу
					№	Зміст маршруту		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Стакан підшипника п'яти 0603.72.001								
1, 2	0,3	1,2	4,0	6,3	1	Точіння одноразове	0,3	4,0
3	0,35	-	-	6,3	1	Точіння канавки	0,35	-
4	0,054	0,8	14,8	3,2	1	Точіння чорнове	0,35	2,29
						Точіння напівчистове	0,14	2,5
						Точіння чистове	0,054	2,593
5	0,03	1,2	40	2,5	1	Розточування чорнове	0,22	5,455
						Розточування чистове	0,087	2,53
						Розточування тонке	0,03	2,9
					2	Зенкерування чорнове	0,35	3,43
						Зенкерування напівчистове	0,14	2,5
						Зенкерування чистове	0,054	2,593
						Розверчування	0,03	1,8
6	0,35	-	-	6,3	1	Точіння канавки	0,35	-
7	0,11	0,8	7,27	6,3	1	Розточування одноразове	0,11	7,27
8	0,2	-	-	6,3	1	Точіння канавки	0,2	-
9	0,1	-	-	6,3	1	Свердління отвору	0,15	-
						Нарізання різі	0,1	1,5
10	0,09	-	-	6,3	1	Свердління отвору	0,09	-

1.4 Розробка маршруту виготовлення деталі

Маршрут обробки стакана підшипника п'яти 0603.72.001:

005 Токарна з ЧПК

Двошпіндельний токарний оброблюючий центр з ЧПК Monforts DNC 500

1. Встановити деталь;
2. Точити торець деталі;
3. Точити зовнішню поверхню $\varnothing 112,5$ начорно;
4. Точити зовнішню поверхню $\varnothing 110,5$ начисто;
5. Точити канавку;
6. Точити зовнішню поверхню $\varnothing 110$ тонко;
7. Перевстановити деталь;
8. Точити торець;
9. Розточити отвір $\varnothing 82,5$ начорно;
10. Розточити отвір $\varnothing 80,5$ напівчисто;
11. Розточити отвір $\varnothing 46$ мм;
12. Розточити отвір $\varnothing 80$ начисто;
13. Точити канавку;
14. Точити дві канавки;
15. Зняти деталь.

010 Свердлильна з ЧПК

Вертикально-свердлильний оброблюючий центр Rapidrill 500

1. Встановити деталь;
2. Свердлити 4 отвори $\varnothing 6,8$ мм;
3. Нарізати різь М8 в 4-х отворах;
4. Повернути стіл;
5. Свердлити отвір $\varnothing 9$ мм;
6. Зняти деталь.

020 Слюсарна

Верстак слюсарний

1. Спиляти завусенці.

030 Контрольна

1. Контролювати розміри.

Розробимо структуру та зміст операцій технологічного процесу для стакану підшипника п'яти 0603.72.001 і занесемо дані до таблиці 1.4 [10, 11].

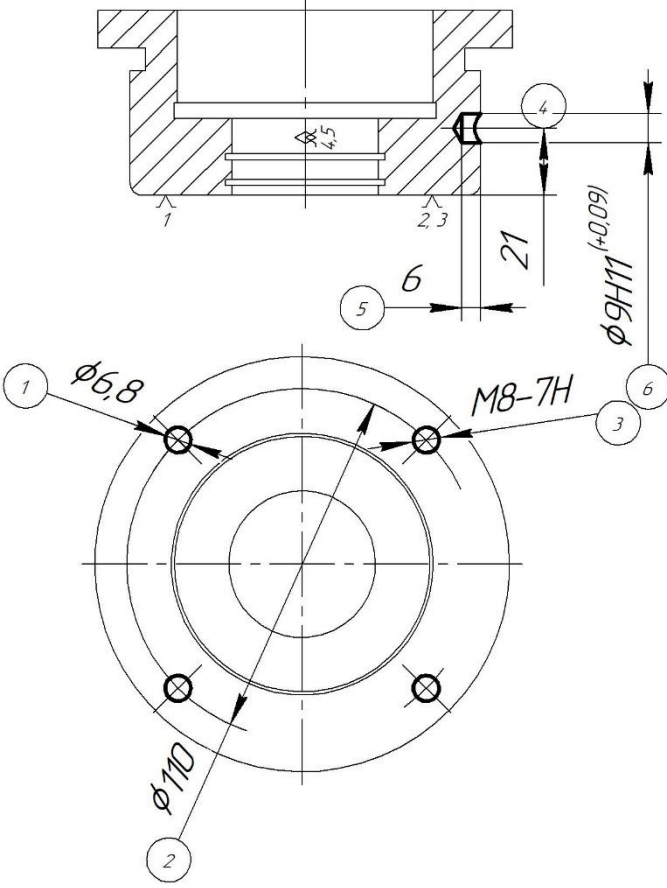
Таблиця 1.4 – Маршрут обробки стакану підшипника п'яти

№ опер	Обладнання	Операційний ескіз	Зміст операції
1	2	3	4
005 Токарна з ЧПК	Токарний з ЧПК SL-20 фірми HAAS		1. Встановити деталь. 2. Точити торець, витримавши розмір 1. 3. Точити шийку начорно, витримавши розміри 2, 6. 4. Точити шийку напівчисто, витримавши розміри 3, 6. 5. Точити канавку, витримавши розміри 4, 5, 6. 6. Точити шийку начисто, витримавши розмір 4.

Продовження таблиці 1.4

1	2	3	4
005 Токарна з ЧПК	Токарний з ЧПК SL-20 фірми HAAS		7. Перевстановити деталь. 8. Точити торець, витримавши розмір 9. 9. Розточити отвір начорно, витримавши розміри 10, 14. 10. Розточити отвір напівчисто, витримавши розміри 11, 14. 11. Розточити отвір, витримавши розмір 13. 12. Розточити отвір начисто, витримавши розміри 12, 14. 13. Точити канавку, витримавши розміри 14, 15, 20. 14. Точити дві канавки, витримавши розміри 16, 17, 18, 19. 15. Знати деталь.

Продовження таблиці 1.4

1	2	3	4
010 Свердлильна з ЧПК	Свердильний з ЧПК Rapidrill 500		1. Встановити деталь. 2. Свердлити чотири отвори, витримавши розміри 1, 2. 3. Нарізати різь в чотирьох отворах, витримавши розміри 2, 3. 4. Повернути стіл. 5. Свердлити отвір, витримавши розміри 4, 5, 6. 6. Знати деталь.

2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1 Контрольно-вимірювальні пристрої у сучасному виробництві

2.1.1 Призначення контрольно-вимірювальних пристроїв

Метрологічне забезпечення та контроль параметрів є невід'ємними компонентами сучасного високотехнологічного виробництва. Успіх промислових підприємств у конкурентному середовищі напряму залежить від якості продукції, ефективності виробничих процесів та ступеня їх автоматизації. Фундаментом для досягнення цих цілей слугують контрольно-вимірювальні пристрої (КВП), які еволюціонують разом із загальним прогресом у науці та техніці.

У контексті сучасної промисловості, зокрема в рамках концепцій "Індустрія 4.0" та ощадливого виробництва, роль контрольно-вимірювальних пристроїв кардинально розширилася. Вони перестали бути лише інструментом пасивного пост-операційного контролю якості (тобто виявлення браку).

Основні функції КВП у сучасному виробництві:

1. Активне управління якістю, це варіант, коли сучасні КВП інтегруються безпосередньо у виробничі лінії та технологічне обладнання (наприклад, у верстати з ЧПК або роботизовані комплекси). Вони забезпечують зворотний зв'язок у реальному часі, дозволяючи системі керування миттєво коригувати параметри процесу (наприклад, положення інструменту) для запобігання виходу за межі допусків.

2. Автоматизація контролю, коли КВП є "органами чуття" автоматизованих систем. Вони дозволяють перевести суб'єктивний та трудомісткий ручний контроль в об'єктивний та високошвидкісний автоматичний режим. Це особливо критично для масового та великосерійного виробництва.

3. Забезпечення простежуваності, а саме цифрові КВП що фіксують точні виміряні значення для кожної деталі, створюючи масиви даних. Ця інформація є

критично важливою для сертифікації продукції (особливо в аерокосмічній, медичній та автомобільній галузях), а також для аналізу причин виникнення дефектів.

4. Оптимізація процесів та аналізу даних, зібраних з КВП, дозволяє інженерам виявляти "вузькі місця", нестабільність обладнання та приховані тенденції у технологічному процесі, що є основою для його безперервного вдосконалення.

Таким чином, призначення сучасних КВП трансформувалося від простої констатації факту (придатна деталь чи брак) до превентивного управління процесом для гарантованого отримання якісної продукції з першого разу.

2.1.2 Контрольні пристрої індикаторного типу

Окремий, але надзвичайно поширений клас контрольних пристроїв – це пристрої індикаторного типу. Їх ключова особливість полягає в тому, що вони, як правило, призначені не для абсолютного вимірювання розміру, а для вимірювання відхилення фактичного розміру або форми від заданого (еталонного).

Найбільш класичним представником є індикатор годинникового типу (ІГТ).

Принцип дії таких пристроїв найчастіше механічний (хоча існують і цифрові, і важільно-пружинні аналоги): мале лінійне переміщення вимірювального стержня через систему зубчастих коліс (мультиплікатор) перетворюється у значне кутове переміщення стрілки на круглій шкалі.

Сфери застосування індикаторних пристроїв:

1. Контроль геометричних допусків. Такі пристрої є незамінними для перевірки відхилень форми та розташування поверхонь, таких як:

- биття (радіальне та торцеве);
- паралельність та перпендикулярність поверхонь;
- площинність.

2. Відносні вимірювання. Часто індикатор встановлюється на нуль за еталонною мірою (наприклад, кінцевою мірою довжини або калібром), після чого він показує відхилення ("плюс" або "мінус") для деталей, що перевіряються.

3. Використання у складі приладів. Індикатори є вимірювальною головкою для багатьох складніших приладів, таких як скоби, нутроміри та товщиноміри.

Незважаючи на стрімкий розвиток оптики та лазерних технологій, механічні індикатори зберігають свою популярність завдяки надійності, простоті використання, відсутності потреби в джерелі живлення та високій чутливості до малих переміщень.

2.1.3 Сучасний стан розвитку метрології

Метрологія як наука про вимірювання наразі переживає глибоку трансформацію, зумовлену кількома ключовими факторами.

1. Перевизначення основних одиниць SI:

Найбільш фундаментальною подією стало "квантове" перевизначення чотирьох із семи основних одиниць SI (кілограм, ампер, кельвін, моль) у 2019 році. Тепер усі основні одиниці базуються не на фізичних артефактах (як платино-іридієвий еталон кілограма), а на фундаментальних фізичних константах (як-от стала Планка h або заряд електрона e). Це рішення має колосальне значення: воно забезпечує стабільність еталонів у часі та їх доступність для відтворення у будь-якій точці світу, а також відкриває шлях до підвищення точності вимірювань на порядки.

2. Цифрова трансформація (Метрологія 4.0):

Відбувається перехід від аналогових та пасивних вимірювань до "розумних".
Ключові тренди:

а) "Цифрові двійники". Створення повних віртуальних моделей не лише виробу, але й самого процесу вимірювання.

б) Вбудована метрологія. Вимірювальні системи (лазерні трекери, оптичні сканери, датчики на інструменті) інтегруються безпосередньо в робочий простір обладнання, дозволяючи проводити вимірювання безпосередньо в процесі обробки.

в) Координатна метрологія. Масове застосування координатно-вимірювальних машин (КВМ) та оптичних 3D-сканерів, які дозволяють отримати повну цифрову модель геометрії об'єкта, а не лише окремі розміри.

3. Розвиток безконтактних методів:

Для контролю складних поверхонь, гнучких або крихких деталей активно розвиваються методи лазерного сканування, інтерферометрії, комп'ютерної томографії та фотограмметрії. Вони забезпечують високу швидкість та щільність збору даних.

4. Нанометрологія:

Потреби мікроелектроніки та біотехнологій стимулюють розвиток методів вимірювання на нанометровому рівні (атомно-силова мікроскопія, скануюча електронна мікроскопія).

Отже сучасна метрологія та контрольні-вимірювальні пристрої є фундаментом для забезпечення якості та ефективності промислового виробництва. Відбувається стійкий перехід від пасивного контролю до активного управління процесами на основі даних у реальному часі. У той час як класичні пристрої, подібні до індикаторів, зберігають свою важливість для базових завдань, загальний вектор розвитку метрології спрямований на цифровізацію, інтеграцію у виробничі системи та підвищення точності за рахунок фундаментальних фізичних принципів.

2.2 Розробка конструкції контрольного пристрою

Розробимо контрольний пристрій та представимо його в графічній частині роботи [25, 26]. Він використовується для контролю торцевого биття торцю стакану 0603.72.001 відносно вісі деталі, що не повинно перевищувати 0,1 мм.

Виходячи з того що відхилення задано від вісі, то деталь має базуватись саме по цій поверхні, щоб виключити похибку базування. Для матеріалізації вісі деталі обираємо внутрішню циліндричну поверхню $\varnothing 80 \pm 0,015$ мм яку і використаємо в

якості установочної поверхні. В якості установочного елемента використаємо конічну оправку.

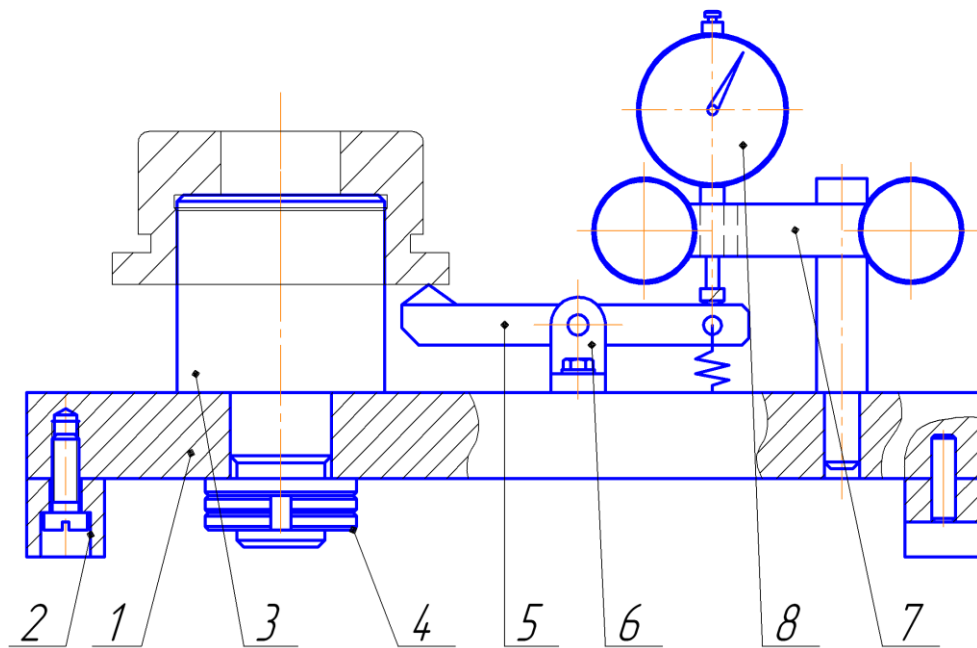


Рисунок 2.1 – Схема контрольного пристрою:

1 – плита; 2 – опора; 3 – оправка конічна; 4 – гайка; 5 – щуп; 6 – кронштейн;
7 – стійка; 8 – індикатор; 9 – пружина.

Контроль будемо проводити індикатором часового типу ИЧ10 по ГОСТ577-68 з ціною поділки 0,01 мм.

На плиті поз. 1 за допомогою гайки поз. 4 закріплено конічну оправку поз. 3 з конусністю 1,5-2°, на яку встановлюється контрольована деталь. Індикатор поз. 8 кріпиться на стійці поз. 7, яка по посадці з натягом кріпиться до плити поз. 1. Взаємозв'язок між ніжкою індикатора і контрольованою деталлю відбувається через щуп поз. 5, що закріплений на кронштейнах поз. 6. Щуп поз. 5 піджимається до контрольованої деталі за допомогою пружини поз. 12.

Деталь базується на оправку поз. 3, показання індикатора виставляються на нуль. Потім робочий перевіряє деталь навколо власної осі не менше одного оберта. Відхилення індикатора від нуля і буде значення торцевого биття.

Контрольний пристрій встановлюється на столі контролера за допомогою опор поз. 2.

3 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1 Вступ

Актуальність теми

Якість поверхонь деталей машин є одним із найважливіших експлуатаційних показників, що безпосередньо визначає їх довговічність, зносостійкість, корозійну стійкість, втомну міцність та контактну жорсткість. У сучасному машинобудуванні, де вимоги до надійності та ресурсу вузлів і механізмів постійно зростають, забезпечення заданих параметрів шорсткості обробленої поверхні набуває першочергового значення.

Формування мікрогеометрії поверхні відбувається безпосередньо в процесі механічної обробки, і ключовими технологічними факторами, якими може керувати інженер-технолог, є режими різання: швидкість різання, подача та глибина різання. Неправильний вибір цих параметрів не лише призводить до невідповідності деталі технічним вимогам (браку), але й може вимагати введення додаткових, дорогих та трудомістких фінішних операцій, таких як шліфування, полірування чи притирання.

У зв'язку з появою нових конструкційних матеріалів (високоміцних сплавів, композитів) та широким впровадженням сучасного різального інструменту (з новітніми покриттями та зносостійких матеріалів), існуючі залежності та рекомендації потребують уточнення та перевірки. Встановлення чітких, науково обґрунтованих взаємозв'язків між режимами різання та шорсткістю поверхні дозволяє оптимізувати технологічний процес, підвищити його продуктивність та економічну ефективність.

Таким чином, дослідження впливу режимів різання на шорсткість оброблюваної поверхні з метою прогнозування та керування якістю є актуальною науково-технічною задачею, що має важливе значення для розвитку сучасних виробничих технологій.

Мета і завдання дослідження

Метою даної кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності процесу механічної обробки та якості оброблюваних поверхонь шляхом встановлення закономірностей впливу режимів різання на параметри шорсткості.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналітичний огляд науково-технічної літератури за темою дослідження; проаналізувати сучасні уявлення про механізми формування шорсткості поверхні при обробці різанням.
2. Виявити основні технологічні фактори, що впливають на мікрогеометрію обробленої поверхні, та обґрунтувати вибір параметрів, що будуть досліджуватись.
3. Розробити методику досліджень впливу швидкості різання, подачі та глибини різання на параметри шорсткості R_a та R_z .
4. Виконати статистичну обробку даних та встановити емпіричні залежності (побудувати математичну модель), що адекватно описують зв'язок між режимами різання та параметрами шорсткості.
5. Розробити практичні рекомендації щодо вибору раціональних режимів різання, які забезпечують досягнення заданої шорсткості поверхні з максимальною продуктивністю.

Наукова новизна

Виявлено керовані фактори процесу різання під час точіння. Показано, що крім загальноприйнятих параметрів, таких як: подача вздовж осі заготовки, радіус вершини і головний і допоміжний кути в плані істотний вплив має напрямок сумарного вектора подачі.

При точенні поверхні з радіусною утворюючою маємо змінне значення частоти обертання шпинделя кожної точки профілю в залежності від його діаметра. Це може бути додатковим резервом підвищення продуктивності у разі використання верстатів з ЧПУ, що дозволяють змінювати частоту обертання шпинделя при зміні поздовжньої координати.

Встановлено, що при обробці фасонних поверхонь подачу слід розглядати як

векторну суму поздовжньої і поперечної подачі, що особливо актуально при точенні на верстатах з ЧПУ.

Показано, що головний і допоміжний кути в плані для забезпечення нормального протікання процесу різання повинні бути на $5...7^\circ$ більше кута наклепу оброблюваної поверхні.

Практична цінність

Практична цінність отриманих результатів полягає у розробці конкретних технологічних рекомендацій (у вигляді номограм, таблиць або інженерних методик розрахунку) для інженерів-технологів машинобудівних підприємств.

Використання цих рекомендацій дозволить:

Обґрунтовано призначати оптимальні режими різання для забезпечення необхідних параметрів шорсткості поверхні безпосередньо на лезовій операції.

Скоротити час та витрати на відпрацювання технологічних процесів шляхом виключення методу "спроб і помилок".

Підвищити продуктивність механічної обробки та знизити собівартість виготовлення деталей за рахунок скорочення або повного виключення необхідності у подальших фінішних операціях.

3.2 Елементи різання і розміри шару, що зрізається при поздовжньому точенні

Принципова кінематична схема при поздовжньому точенні визначається поєднанням двох рухів: рівномірного обертального руху деталі та рівномірного поступального руху різця вздовж осі деталі. Схема поздовжнього точення зображено на рисунку 3.1.

Деталь обертається навколо своєї осі з частотою n обертів за хвилину, здійснюючи рух різання. Швидкість різання чисельно дорівнює окружній швидкості

обертання точки деталі, розташованої на поверхні, що обробляється діаметром D і визначається за формулою:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, \text{ м/хв} \quad (3.1)$$

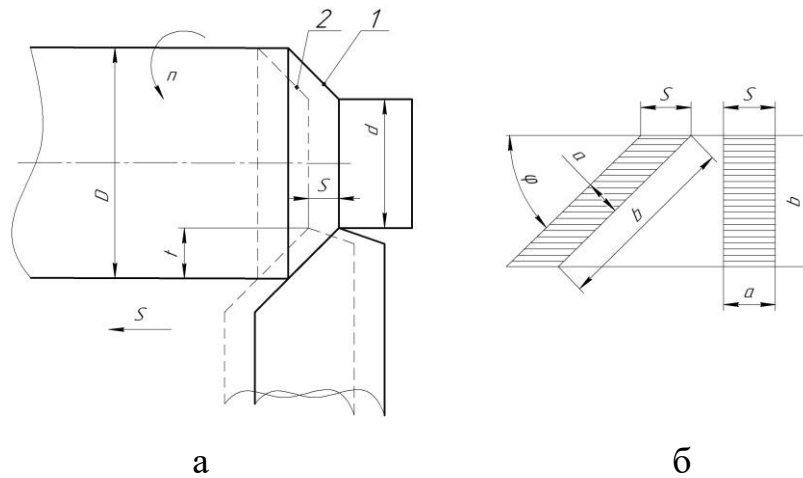


Рисунок 3.1 – Розміри шару, що зрізається при поздовжньому точенні

Різець переміщається вздовж осі деталі зі швидкістю S мм/хв, здійснюючи рух подачі. Швидкість $S_{хв}$ одержала назву хвилинної подачі різця. Шлях, що проходить різцем уздовж осі деталі за один оборот, називають подачею на оборот і визначають за формулою:

$$S = \frac{S_{хв}}{n}, \text{ мм/об.} \quad (3.2)$$

В результаті того, що зазначені рухи відбуваються одночасно, з обробленої поверхні деталі видаляється шар матеріалу розміром який називають глибиною різання. Під глибиною різання розуміють розмір шару, що видаляється з обробленої поверхні за один прохід інструменту, виміряний нормалі до напрямку руху подачі. Наведене формулювання глибини різання є загальним. Вона справедлива як поздовжнього точення, але й будь-якого методу обробки металів різанням, у якому глибина різання існує як поняття. При поздовжньому точенні (рис. 3.1, а) глибину різання визначають за формулою:

$$t = \frac{D - d}{2}, \text{ мм.} \quad (3.3)$$

Траєкторією робочого руху будь-якої точки головного леза різця є гвинтова лінія з гвинтовим параметром $\frac{S}{2 \cdot \pi}$. Поверхня різання являє собою конволютну гвинтову поверхню, якщо різець має кут $\lambda \neq 0$ і архімедову гвинтову поверхню при куті $\lambda = 0$.

Якщо деталь має фасонні поверхні, то схема її точення виглядає, як показано на рисунку 3.2.

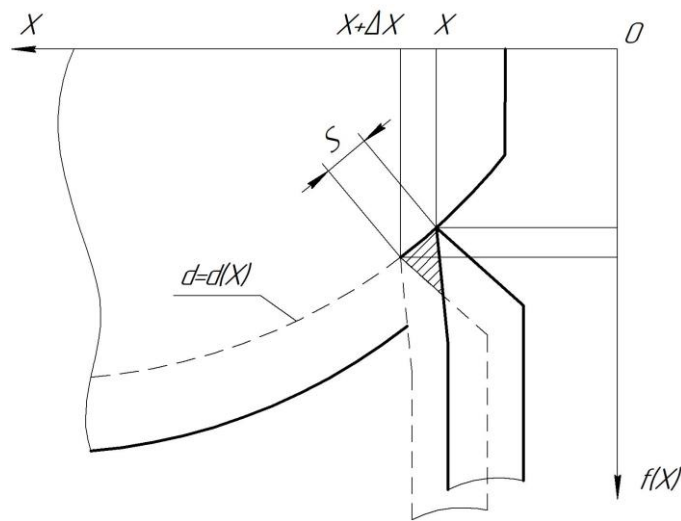


Рисунок 3.2 – Форми перерізу шару фасонної поверхні, що зрізається

На рисунку 3.2 введені наступні позначення:

$d = d(x)$ – зовнішній діаметр обробки (мм);

$t = t(x)$ – товщина припуску, що знімається (мм);

L – довжина ділянки, що обробляється (мм);

x – поточна координата різця по осі x (в даному випадку приймаємо $x \in [0, L]$);

V – швидкість різання (м/с) на ділянці обробки, що аналізується, може змінюватися в діапазоні $[V_{\max}, V_{\min}]$;

n – частота обертання шпинделя верстата (об/хв) з урахуванням заданих значень параметрів t та d визначається наступним чином:

$$n(x) = \frac{60 \cdot 1000 V(x)}{\pi [d(x) + t(x)]}, \quad (3.4)$$

S – поздовжня подача інструменту, мм/

При точенні поверхні з радіусною твірною (рис. 3.3) використання формули (3.4) дає змінне значення частоти обертання шпинделя для кожної точки профілю в залежності від його діаметра. Це може бути додатковим резервом підвищення продуктивності у разі використання верстатів з ЧПУ, що дозволяють змінювати частоту обертання шпинделя при зміні поздовжньої координати.

Тож при точенні поверхні з радіусною твірною (рис. 3.3) маємо:

$$S = 2R_\rho \arccos \left[\frac{(R_\rho + r)^2 + (R_\rho + R_{zp})^2 - r^2}{2(R_\rho + r)(R_\rho + R_{zp})} \right], \quad (3.5)$$

де R_ρ – радіус кривизни фасонної утворюючої поверхні оброблюваної деталі в поточній точці її торкання з ріжучою кромкою інструменту (значення R_ρ знаходиться в інтервалі від (А) до (В) і деяким чином вибирається з цього інтервалу його значень);

r – радіуси кривизни ріжучої кромки інструмента;

R_{zp} – допуск на точність формоутворення фасонної поверхні деталі.

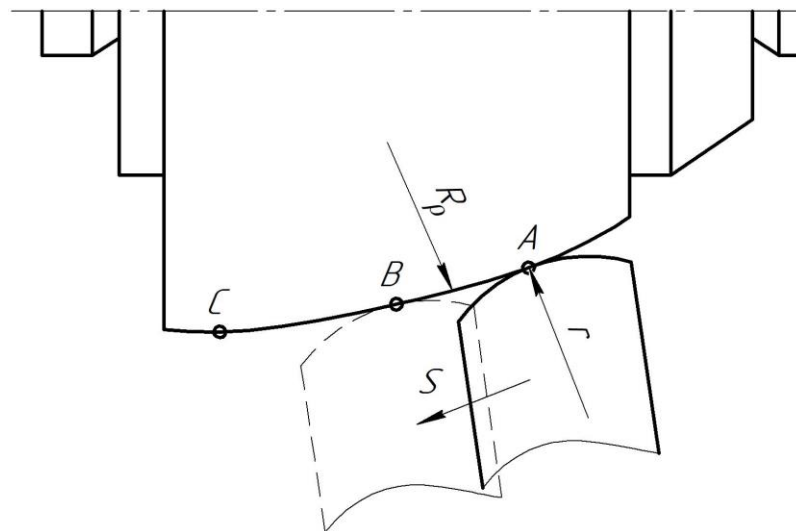


Рисунок 3.3 – Схема точіння фасонних поверхонь обертання

Нехай деталь зробить оборот. За цей час різець переміститься вздовж її осі на відстань S і поверхня різання з положення 1 переміститься в положення 2. Шар матеріалу, розташований між послідовними положеннями 1 і 2 поверхні різання, буде зрізаний і перетворений на стружку. Розсічемо шар матеріалу, зрізаний з поверхні різання, площиною, що проходить через вісь деталі. У перерізі отримаємо приблизно паралелограм з основою S , висотою t і сторонами, нахиленими до осі деталі під кутом φ . Отриманий паралелограм називають площею перерізу шару, що зрізається, а його розміри S і t – технологічними розмірами зрізуваного шару. Шар матеріалу, що зрізається з поверхні різання, за будь-якого методу обробки характеризують його фізичними розмірами: товщиною і шириною. На підставі наведених формулювань при кутах $\lambda < 30$ товщиною шару, що зрізається, при поздовжньому точенні можна вважати розмір a , а шириною – розмір b (див. рис. 3.1, б). Фізичні та технологічні розміри шару, що зрізається, пов'язані наступними співвідношеннями:

$$a = S \cdot \sin \varphi, \quad (3.6)$$

$$b = \frac{t}{\sin \varphi}. \quad (3.7)$$

Як видно з наведених формул і рис. 3.1 б, при одних і тих же технологічних розмірах форма і фізичні розміри шару, що зрізається в залежності від величини кута φ можуть бути різними. При збільшенні головного кута в плані різця відношення $\frac{b}{a}$ зменшується, і шари, що зрізається а стає товстішим і вужче. Таким чином, фізичні розміри дають краще уявлення про форму шару, що зрізається, ніж технологічні. Крім цього, при деяких методах обробки глибина різання як технологічний розмір шару, що зрізається, не існує і не може, тому визначати розміри шару. Поняття ж товщини і ширини шару, що зрізається, мають місце при будь-яких видах обробки.

При куті нахилу головного леза, рівному нулю, робоча довжина l головного леза дорівнює ширині шару, що зрізається. Якщо кут $\lambda \neq 0$, то робочу довжину головного леза можна визначити за рис. 2.4. При кутах λ , що не перевищують $\pm 10^\circ$, робоча довжина леза з достатньою точністю визначається залежністю:

$$l = \frac{t}{\sin \varphi \cdot \cos \lambda}. \quad (3.8)$$

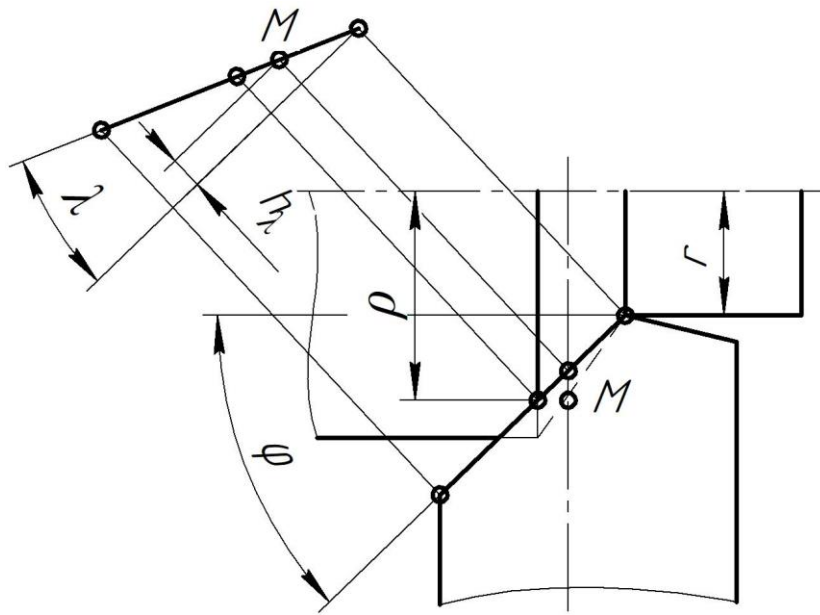


Рисунок 3.4 – Схема для визначення розміру h_λ

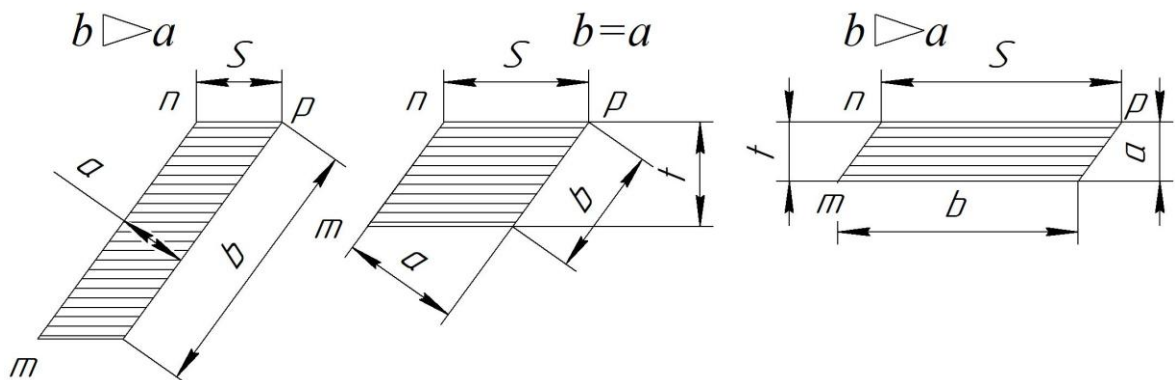


Рисунок 3.5 – Форми перерізу шару, що зрізається

Залежно від співвідношення t і S при поздовжньому точенні можливі три форми перерізу шару, що зрізається (рис. 3.5). Якщо ширина шару, що зрізається, дорівнює його товщині, то такий шар називається рівнобоким (рис. 3.5, б). Рівнобокий шар буде утворений, коли

$$s \cdot \sin \varphi = \frac{t}{\sin \varphi}, \quad (3.9)$$

тобто при

$$\frac{t}{s} = \sin^2 \varphi. \quad (3.10)$$

Якщо $\frac{t}{s} > \sin^2 \varphi$, то шар, що зрізається, називають прямим (рис. 3.5, а), а якщо $\frac{t}{s} < \sin^2 \varphi$, то зворотним (рис. 3.5, в). Якщо при зрізанні рівнобоких шарів передній кут розташований у площині, перпендикулярній лінії mn , то ця лінія є головним лезом різця і здійснює основну роботу різання. Якщо ж передній кут розташований у площині, перпендикулярній лінії nr , то ця лінія стає головним лезом різця, а лінія mn – допоміжним лезом.

При зрізанні зворотних шарів лінія nr завжди є головною лезом, а лінія mn – допоміжною. У цьому випадку формули (3.6) і (3.7) для визначення товщини і ширини шару, що зрізається, несправедливі, так як товщина зрізуваного шару стає рівною глибині різання ($a = t$), а ширина зрізуваного шару – подачі ($b = s$). Різання з рівнобокими та зворотними шарами зустрічається рідко і відповідає чистовому точенню широкими різцями з великими подачами.

Час проведення певної операції з однієї заготовкою $T_{шт}$ складається з наступних часів:

$$T_{шт} = T_o + T_{дон} + T_{обс} + T_{відп}. \quad (3.11)$$

де $T_{шт}$ – штучний час, хв

T_o – основний (технологічний час), хв

$T_{дон}$ – допоміжний час, хв

$T_{обс}$ – час обслуговування робочого місця, хв

$T_{відп}$ – час перерв на відпочинок та особисті потреби, хв.

Машинний час – час, протягом якого відбувається процес зняття стружки без безпосередньої участі робітника (наприклад, час на точення валика на токарному верстаті при включеній механічній подачі); надалі цей час позначатимемо через T_m .
Машинний час за один прохід визначається залежністю:

$$T_m = \frac{L}{n \cdot S}, \text{ хв} \quad (3.12)$$

де L – шлях інструменту у напрямку подачі, мм;

n – частота обертання шпинделя, об/хв;

S – подача, мм/об.

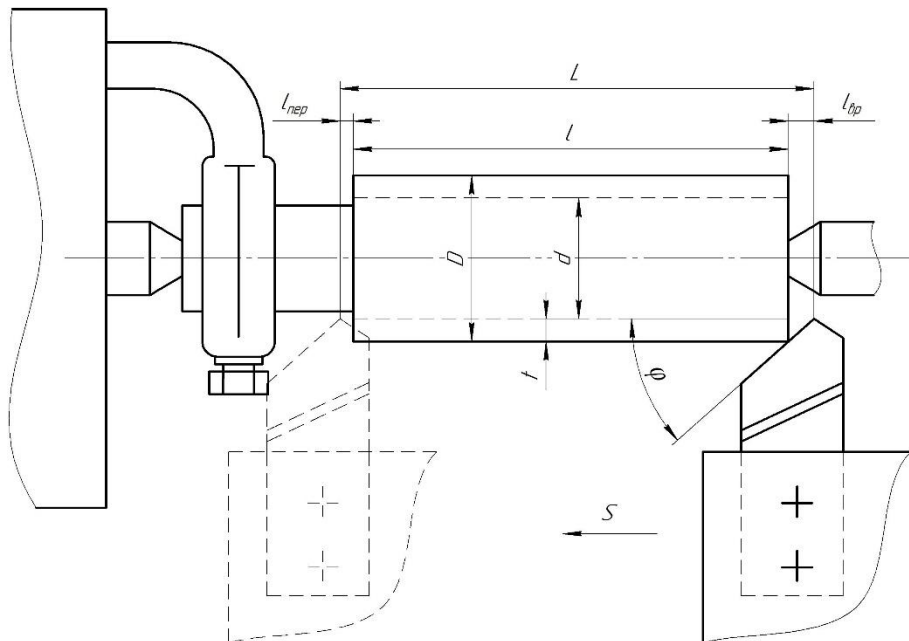


Рисунок 3.6 – Шлях, що проходить різець в напрямку подачі при поздовжньому точінні

У свою чергу згідно з рисунком 3.6:

$$L = l + l_{\text{вр}} + l_{\text{пер}}, \text{ мм} \quad (3.13)$$

де l – розмір оброблюваної поверхні в напрямку подачі, мм;

$l_{\text{вр}}$ – величина врізання, мм;

$l_{\text{пер}}$ – величина перебігу ріжучого інструменту, мм.

При поперечному точінні вала (рис. 3.7, а):

$$L = \frac{D}{2} + l_{\text{вр}} + l_{\text{пер}}, \text{ мм.} \quad (3.14)$$

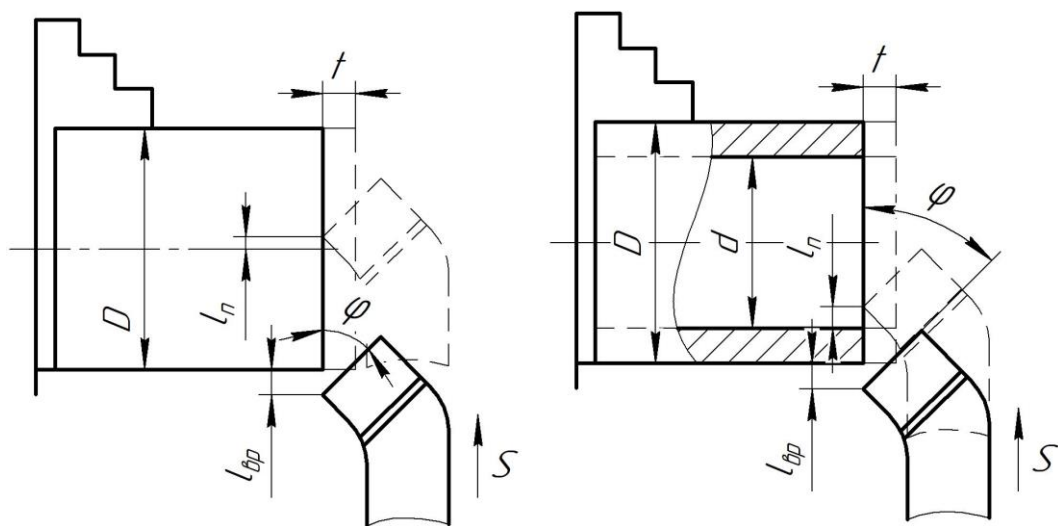


Рисунок 3.7 – Шлях, що проходить різець в напрямку подачі при поперечному точінні

При поперечному точінні втулки (рис. 3.7, б):

$$L = \frac{D-d}{2} + l_{\text{вр}} + l_{\text{пер}}, \text{ мм.} \quad (3.15)$$

Якщо при обробці заготовки доводиться робити кілька проходів, з умовою, що всі вони відбуваються при однаковій частоті обертання та подачі, то машинний час визначається залежністю:

$$T_M = \frac{L}{n \cdot S} \cdot i, \text{ хв.} \quad (3.16)$$

де i – число проходів.

Кількість проходів залежить від припуску на обробку, і якщо припустити, що кожен прохід відбувається з однаковою глибиною різання (останній прохід, точніше перехід, проводиться з меншою глибиною, ніж попередні), то

$$i = \frac{h}{t}. \quad (3.17)$$

де h – припуск на обробку;

t – глибина різання.

Підставивши на формулу (3.16) вираз (3.17), отримаємо:

$$T_M = \frac{L \cdot h}{n \cdot S \cdot t}, \text{ хв.} \quad (3.18)$$

Зменшення машинного часу – важливий чинник у підвищенні продуктивності праці. Машинний час T_M можна скоротити шляхом зменшення L і h або збільшення t , S , $n(V)$. Величина L залежить від розміру обробленої поверхні (розміру готової деталі) та при одноінструментній обробці шлях L скорочується при зменшенні величини врізування та виходу різального інструменту. При багатоінструментній обробці з - використанням, наприклад, одночасно двох різців шлях інструменту $L/2$.

Чим менший припуск на обробку h , тобто чим ближче форма і розміри заготовки до форми і розмірів деталі, тим менше металу буде переведено в стружку,

більш сприятливі умови для зрізання припуску за один прохід, менше буде витрачено часу на обробку, вища продуктивність і нижча собівартість готової деталі.

3.3 Вплив якості обробки поверхонь, на експлуатаційні властивості деталей машин

Серед найважливіших завдань сучасного машинобудування підвищення якості продукції займає одне з перших місць. Експлуатаційні показники кожної деталі, що утворюють механізми та вузли машин, залежать не тільки від фізико-механічних властивостей матеріалу, а й від рівня розробленості та досконалості технологічного процесу, за яким вони виготовлені. Показники якості поверхонь деталей визначаються геометричними характеристиками обробленої поверхні (точність із готування) та фізико-механічними властивостями поверхневого шару (рис. 3.8).

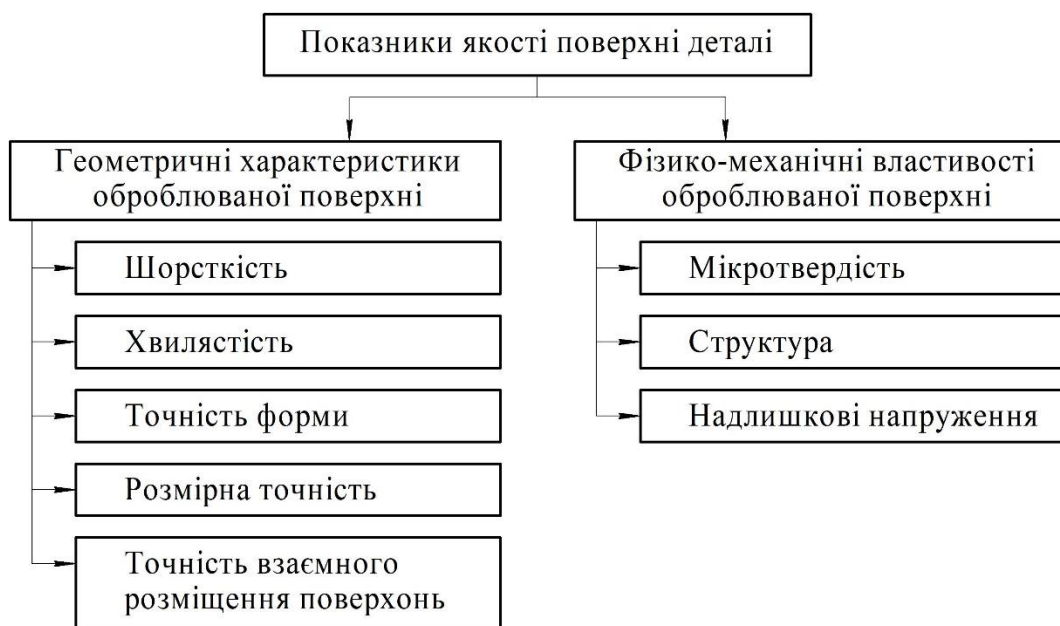


Рисунок 3.8 – Структура показників якості поверхонь деталі

Усі наведені на рисунку 3.8 показники якості виготовленої деталі впливають на її експлуатаційні характеристики, проте, у справжнє при токарній обробці

найчастіше нормуються шорсткість, розмірна точність і точність форми поздовжнього перерізу обробленої поверхні. Тому надалі розглядатимуться саме вони.

У галузі технології машинобудування встановлено, що для збільшення - зносостійкості поверхонь пари, що труться, поверхні повинні мати шорсткість певної величини. Збільшення або зменшення висоти мікронерівностей поверхонь, що труться, призводить до зниження зносостійкості і до прискореного зносу деталей, що труться [13-15].

Параметри шорсткості істотно впливають на величину опору втомному руйнуванню. Межа витривалості збільшується в міру зменшення висоти мікронерівностей, а також при збігу слідів обробки з напрямом дії зовнішньої напруги [14]. Межа втомної міцності жароміцних і титанових сплавів знижується зі збільшенням шорсткості. Це зниження втомної міцності становить для зразків з шорсткістю поверхні R_z , що дорівнює 10,5 і 0,63 мкм, відповідно 13,3. 10,3 і 6% порівняно з опором втоми зразків з шорсткістю поверхні R_z , що становить 0,05 мкм.

Встановлено [14], що параметри шорсткості надають істотний вплив на корозійну стійкість деталей, оскільки зменшення висоти мікронерівностей збільшує корозійну стійкість поверхневого шару.

Низька точність виготовлення деталей збільшує трудомісткість складання та суттєво знижує експлуатаційні властивості машин. Встановлено, що шорсткість, хвилястість, точність розмірів, точність форм і розташування поверхонь, впливають на якість сполучень, міцність з'єднань з натягом, контактну жорсткість, гідроцільність з'єднань та інші експлуатаційні характеристики вузлів машин. Так, наприклад, наявність хвилястості в 5 ... 10 разів зменшує опорну площу поверхонь, що труться і, як наслідок, знижує їх зносостійкість. Хвилястість доріжок підшипників кочення збільшує рівень вібрацій. До передчасного виходу з ладу, внаслідок зносу, призводять і збільшені допуски на зазори в деталях, що сполучаються [13].

3.4 Вплив режимів різання на показники, що характеризують шорсткість обробленої поверхні

Значний вплив технологічних умов обробки на якість поверхневого шару та точність виготовлення деталі є очевидним фактом. Іншими словами, параметри якості обробленої поверхні значною мірою визначаються режимом різання, геометрією ріжучого інструменту, фізико-механічними властивостями оброблюваних та інструментальних матеріалів, а також іншими параметрами процесу різання. Проблемі встановлення аналітичних залежностей між окремими - показниками якості поверхонь і технологічними параметрами процесу обробки присвячено велику кількість робіт [3, 4, 6]. В результаті цих досліджень були отримані різні аналітичні залежності та рівняння, що враховують вплив тих чи інших технологічних параметрів процесу різання на основні показники якості обробленої поверхні.

Механізм утворення мікронерівностей при лезвій обробці конструкційних матеріалів і, зокрема, жароміцних і нержавіючих сталей і сплавів, підпорядковується загальним закономірностям, фізичний сенс яких полягає в тому, що форма мікронерівностей в першому наближенні визначається профілем і траєкторією руху формотворчої частини ріжучого леза. На отриманий профіль накладаються спотворення, що вносяться пластичними деформаціями в зоні різання, тертям і задирами по задній грані інструменту, а також вібраціями. Однак при різанні жароміцних сталей і сплавів є й особливості, що впливають на процес утворення шорсткості поверхні, до яких відноситься, наприклад, наявність більш менш стабільного наросту, що утворюється при різанні, зі слабо вираженим явищем зриву, що сприятливо позначається на шорсткості одержуваної поверхні.

Стосовно розрахунку величини шорсткості поверхні є різні залежності, як теоретичні, розроблені на основі геометричних побудов та аналітичних викладок, так і емпіричні, встановлені шляхом кореляційного аналізу експериментальних даних.

Якість обробленої поверхні визначається шорсткістю по верхності та станом матеріалу поверхневого шару. Шорсткість обробленої поверхні характеризується висотою і формою мікронерівностей. Стан матеріалу поверхневого шару характеризується його зміцненням (наклепом), мікроструктурою, величиною і знаком залишкових напруг і глибиною їх залягання.

При вивченні шорсткості поверхні мікронерівності з методичної точки зору зручно ділити на розрахункові нерівності та дійсні нерівності. Під розрахунковими нерівностями розуміють такі: висота та форма яких можуть бути визначені геометрично при наступних припущеннях:

- 1) матеріал, що обробляється, вважається абсолютно недеформованим;
- 2) технологічна система – абсолютно жорстка;
- 3) леза інструменту є геометричною лінією. Справжні нерівності або просто нерівності це мікронерівності, які виникли на обробленій поверхні після проходу ріжучого інструменту. Висота нерівностей аналітичному розрахунку не піддається. Її можна виміряти приладами, які називаються профілометрами та профілактографами. Профілометри дають візуальний відлік висоти нерівностей, а профілографи у певному масштабі викреслюють мікропрофіль поверхні.

Реальні нерівності за формою та висотою відрізняються від розрахункових. На рисунку 3.9 зображено типова філограма обробленої поверхні при точінні.

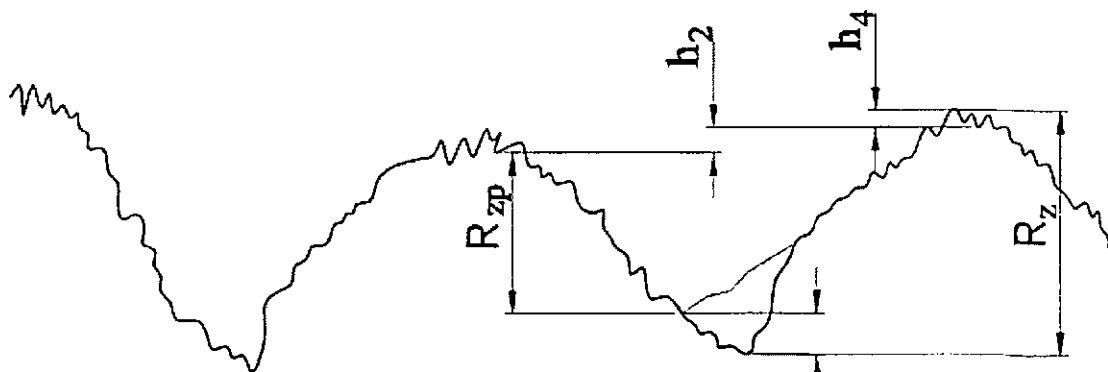


Рисунок 3.9 – Реальний профіль обробленої поверхні

Тож отримуємо:

$$R_Z = R_{Zp} + \Delta R_Z; \quad (3.18)$$

$$R_Z = h_2 + h_3 + h_4;$$

де R_Z – висота мікронерівностей по трьом точках, мкм;

ΔR_Z – збільшення дійсної висоти мікронерівностей профілю обробленої поверхні R_Z в порівнянні з розрахунковою R_{Zp} , мкм;

h_2, h_3, h_4 – складові профілю шорсткості, відповідно до коливання інструменту щодо оброблюваної поверхні, пластичним деформаціям в зоні контакту інструменту та заготовки, шорсткості робочих поверхонь інструменту;

R_{Zp} – теоретична (розрахункова) висота мікронерівності профілю обробленої поверхні, що визначається за аналітичними виразами, отриманими з геометричних міркувань з урахуванням профілю формотворчої частини ріжучого інструменту і траєкторії його руху щодо оброблюваної заготовки, мкм.

3.4.1 Вплив режимів різання на шорсткість обробленої поверхні при подовжньому точінні

Процес формування шорсткості при механічній обробці представлявся як мікронерівності, що залишаються на обробленій поверхні радіусною вершиною різця (рис. 3.10), а, для опису формованої шорсткості використовується рівняння:

$$R_{Zodo} = \frac{S_{\max}^2}{8r}. \quad (3.19)$$

На рисунку 3.11 зображено розрахунковий мікропрофіль поверхні, обробленої при точенні різцем без перехідного леза.

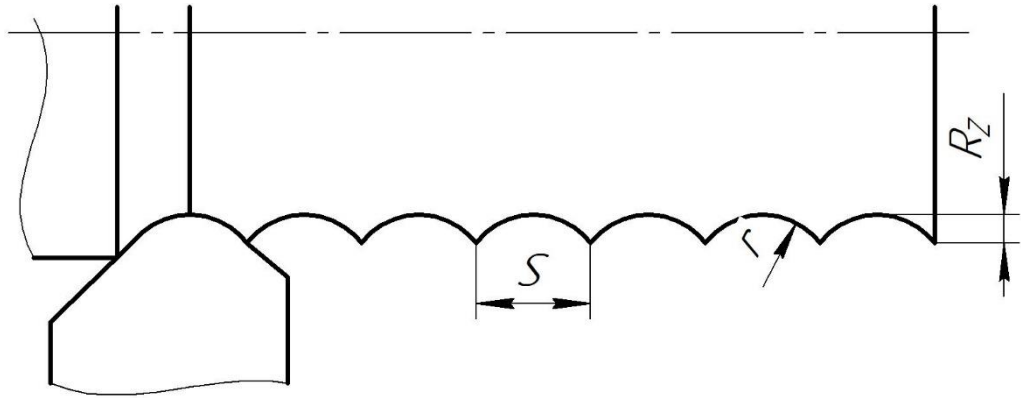


Рисунок 3.10 – Схема для розрахунку R_z

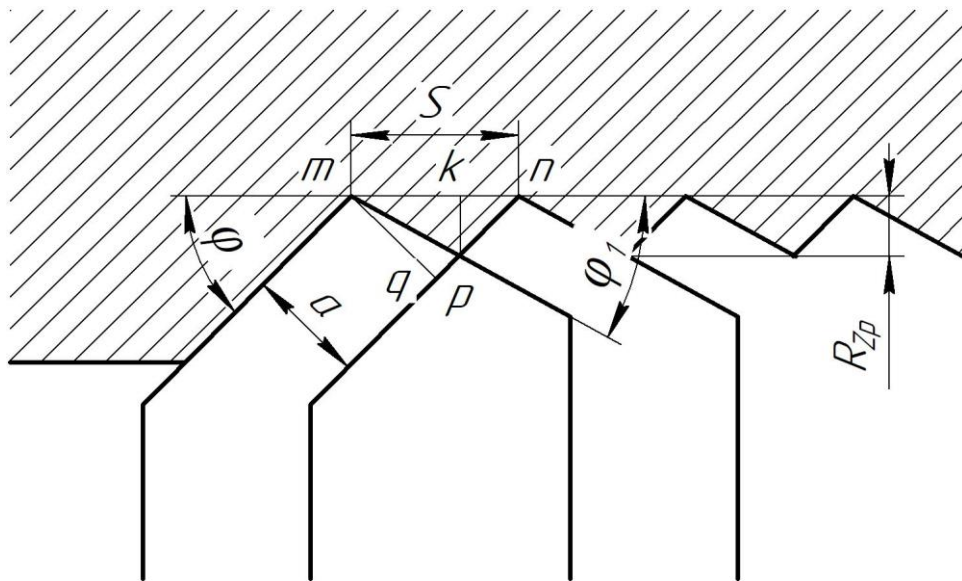


Рисунок 3.11 – Розрахунковий мікропрофіль поверхні, що оброблена
поздовжнім точінням

Для простоти взято різець без перехідного леза. При точенні висота розрахункових нерівностей R_{zp} дорівнює висоті pk трикутника mnp :

$$R_{zp} = \overline{mp} \cdot \sin \varphi_1,$$

$$\overline{mp} = \frac{\overline{mp}}{\sin \angle mpq} = \frac{a}{\sin(\varphi + \varphi_1)} = \frac{\overline{mp} \cdot \sin \varphi}{\sin(\varphi + \varphi_1)}, \quad (3.20)$$

$$\overline{mp} = S; \quad (3.21)$$

де φ – головний кут в плані;

φ_1 – допоміжний кут в плані.

Таким чином:

$$R_{zp} = \frac{S \cdot \sin \varphi \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)}. \quad (3.22)$$

Формулу (3.22) можна використовувати для розрахунку R_{zp} при розточуванні, свердлінні, зенкеруванні, струганні та фрезеруванні торцевими фрезами.

Якщо різець має кругове перехідне лезо, то залежно від відносини між величинами подачі на оборот S , кутів у плані φ і φ_1 та радіуса r перехідного леза висота розрахункових нерівностей визначається за однією з формул:

При $\varphi \geq \varphi_1$ і $S \geq r(\sin \varphi_1 + \sin \varphi) + r(\cos \varphi_1 - \cos \varphi) \operatorname{ctg} \varphi_1$, чи $\varphi < \varphi_1$ і $S \geq r(\sin \varphi_1 + \sin \varphi) + r(\cos \varphi_1 - \cos \varphi) \operatorname{ctg} \varphi_1$ (рис. 3.12).

$$\overline{mp} = S - r \left(\operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} + \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right), \quad (3.23)$$

$$R_{zp} = \frac{\sin \varphi \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)} \cdot \left[S - r \left(\operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} + \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) \right]. \quad (3.24)$$

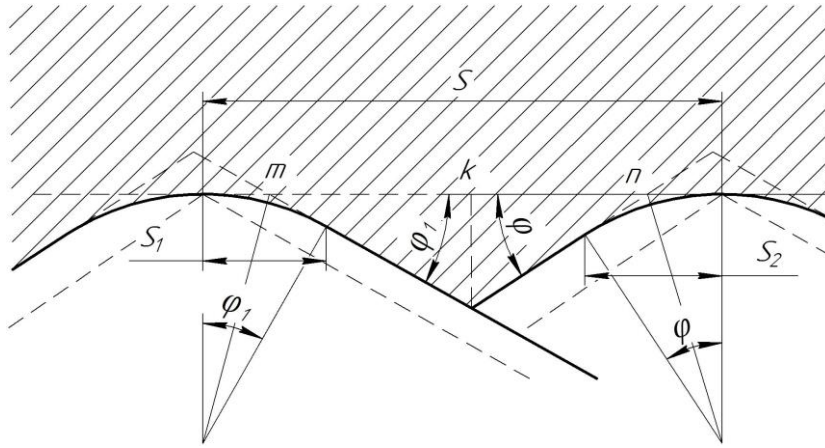


Рисунок 3.12 – Розрахунковий мікропрофіль поверхні, що оброблена
поздовжнім точінням

При $S \triangleleft r(\sin \varphi_1 + \sin \varphi)$ (рис. 3.13),

$$R_{zp} = \overline{mh} = r - \overline{oh}. \quad (3.25)$$

$$R_{zp} = r - \overline{oh} = r - \sqrt{r^2 - \frac{S^2}{4}}. \quad (3.26)$$

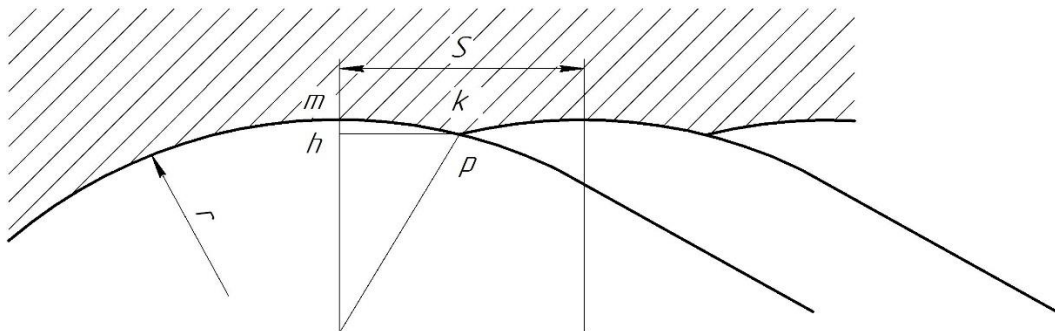


Рисунок 3.13 – Розрахунковий мікропрофіль поверхні, що оброблена
поздовжнім точінням

При $\varphi \triangleleft \varphi_1$ і $2r \sin \varphi \triangleleft S \triangleleft r(\sin \varphi_1 + \sin \varphi) + r(\cos \varphi_1 - \cos \varphi) \operatorname{ctg} \varphi_1$, (рис. 3.14).

$$R_{zp} = \overline{pn} \sin \varphi. \quad (3.27)$$

$$\overline{pn} = \overline{o'p_1} + \overline{p_1n} - \overline{o'p} = r \operatorname{ctg} \varphi + r \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} - \overline{o'p}. \quad (3.28)$$

$$\overline{o_1p}^2 = \overline{o'p}^2 + \overline{o'o_1}^2 - 2\overline{o'p} \cdot \overline{o'o_1} \cdot \cos \varphi. \quad (3.29)$$

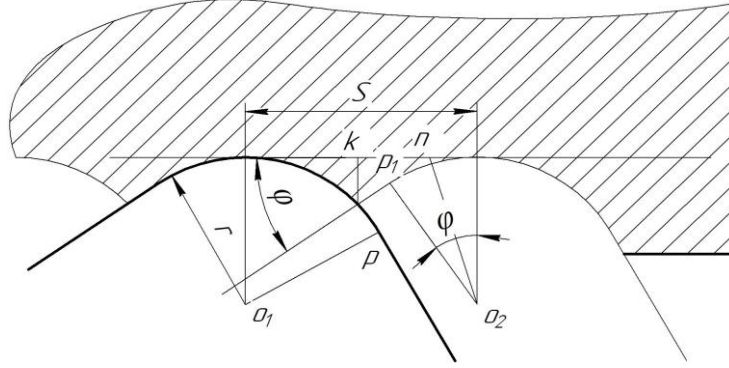


Рисунок 3.14 – Розрахунковий мікропрофіль поверхні, що оброблена
ПОВЗДОВЖНІМ ТОЧІННЯМ

Оскільки

$$\overline{o'o_1} = \overline{o'o_2} - \overline{o_1o_2} = \frac{r}{\sin \varphi} - S. \quad (3.30)$$

$$\overline{o'p}^2 - 2\overline{o'p} \left(\frac{r}{\sin \varphi} - S \right) \cos \varphi + \left(\frac{r}{\sin \varphi} - S \right)^2 - r^2 = 0. \quad (3.31)$$

Звідки

$$\overline{o'p} = r \cdot \operatorname{ctg} \varphi - S \cdot \cos \varphi + \sqrt{S \cdot \sin \varphi (2r - \sin \varphi)}. \quad (3.32)$$

Тоді

$$R_{pz} = \left[r \cdot \operatorname{ctg} \varphi + r \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} - r \cdot \operatorname{ctg} \varphi + S \cdot \cos \varphi - \sqrt{S \cdot \sin \varphi (2r - \sin \varphi)} \right] \sin \varphi. \quad (3.33)$$

$$R_{pz} = r(1 - \cos \varphi) + \frac{S}{2} \sin 2\varphi - \sin \varphi \sqrt{S \cdot \sin \varphi (2r - \sin \varphi)}. \quad (3.34)$$

При $\varphi > \varphi_1$ і $2r \sin \varphi_1 < S < r(\sin \varphi_1 + \sin \varphi) + r(\cos \varphi_1 - \cos \varphi) \operatorname{ctg} \varphi_1$, (рис. 3.15).

$$R_{pz} = r(1 - \cos \varphi_1) + \frac{S}{2} \sin 2\varphi_1 - \sin \varphi_1 \sqrt{S \cdot \sin \varphi_1 (2r - \sin \varphi_1)}. \quad (3.35)$$

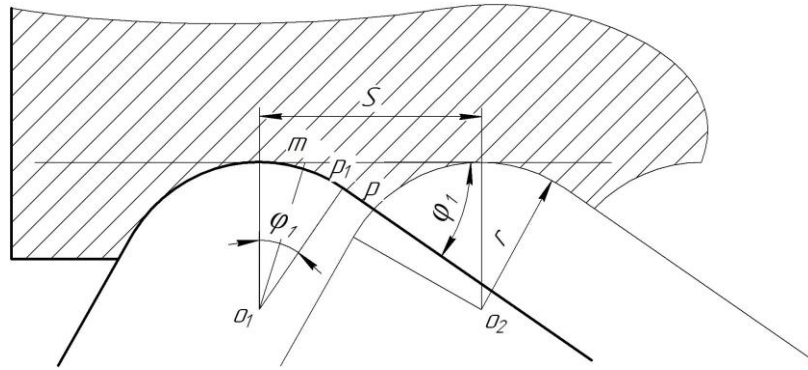


Рисунок 3.15 – Розрахунковий мікропрофіль поверхні, що оброблена поздовжнім точінням

З вищенаведеного матеріалу викладок видно, що в залежності від поєднання величини подачі та кутів у плані ріжучої пластини, а також кута нахилу розрахункова величина шорсткості при поздовжньому точенні є однозначною величиною і визначається за залежностями (3.22), (3.24), (3.26), (3.34), (3.35).

Схема нахиленого точіння показана на рис. 3.16. З трикутника pmn можна знайти висоту розрахункових мікронерівностей:

$$R_{pz} = \overline{mp} \cdot \sin(\varphi_1 + \omega). \quad (3.36)$$

$$\overline{mp} = \frac{\overline{mq}}{\sin \angle mpq} = \frac{a}{\sin(\varphi + \varphi_1)} = \frac{\overline{mn} \cdot \sin(\varphi - \omega)}{\sin(\varphi + \varphi_1)}. \quad (3.37)$$

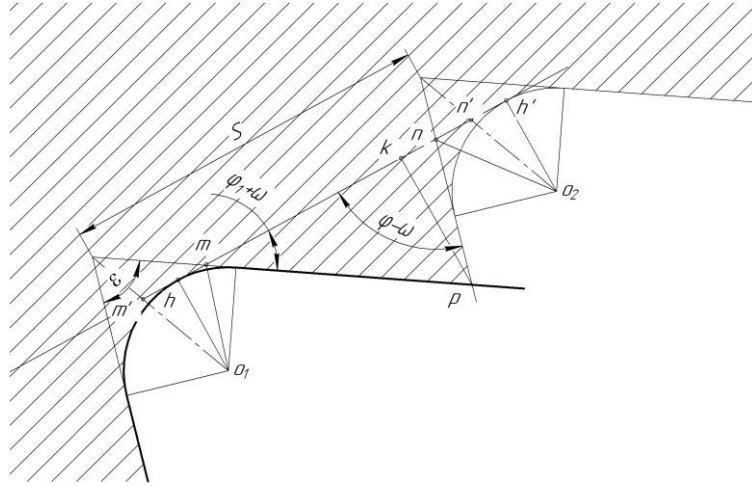


Рисунок 3.17 – Розрахунковий мікропрофіль поверхні, що оброблена при нахиленому точінні

$$\overline{mn} = S - \overline{mm'} - \overline{nn'}, \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned} \overline{mm'} &= \overline{hm} + \overline{hm'} = \overline{ho_1} \cdot \operatorname{tg} \angle ho_1 m + \overline{ho_1} \cdot \operatorname{ctg} \angle hm' o_1 = \\ &= r \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_1 + \omega}{2} + r \cdot \operatorname{ctg} \left(\frac{\varepsilon}{2} + \varphi_1 - \omega \right), \end{aligned} \quad (3.41)$$

$$\overline{nn'} = \overline{nh'} + \overline{h'n'} = r \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi - \omega}{2} - r \cdot \operatorname{ctg} \left(\frac{\varepsilon}{2} + \varphi_1 + \omega \right), \quad (3.42)$$

$$\overline{mn} = S - r \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_1 + \omega}{2} - r \cdot \operatorname{ctg} \left(\frac{\varepsilon}{2} + \varphi_1 - \omega \right) - r \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi - \omega}{2} + r \cdot \operatorname{ctg} \left(\frac{\varepsilon}{2} + \varphi_1 + \omega \right), \quad (3.43)$$

$$\overline{mn} = S - r \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_1 + \omega}{2} - r \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi - \omega}{2}, \quad (3.44)$$

Тоді

$$R_{pz} = \frac{\sin(\varphi - \omega) \sin(\varphi_1 + \omega)}{\sin(\varphi + \varphi_1)} \left[S - r \left(\operatorname{tg} \frac{\varphi_1 + \omega}{2} + \operatorname{tg} \frac{\varphi - \omega}{2} \right) \right]. \quad (3.45)$$

При $\varphi \triangleright \varphi_1 + 2\omega$ і $S \triangleleft 2r \sin(\varphi_1 + \omega)$, чи $\varphi \triangleleft \varphi_1 + 2\omega$ і $S \triangleleft 2r \sin(\varphi - \omega)$ (рис. 3.18).

$$R_{pz} = r - \overline{oh} = r - \sqrt{r^2 - \frac{S^2}{4}}. \quad (3.46)$$

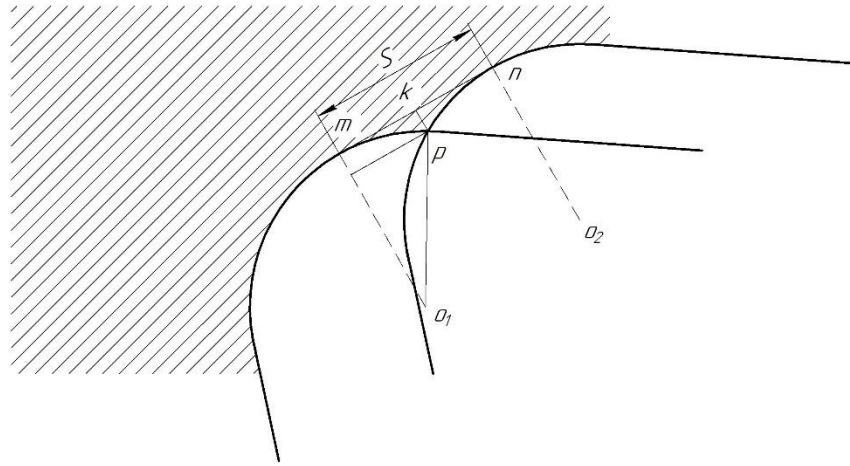


Рисунок 3.18 – Розрахунковий мікропрофіль поверхні, що оброблена при нахиленому точінні

При $\varphi \triangleleft \varphi_1 + 2\omega$ і

$$2r \sin(\varphi - \omega) \triangleleft S \triangleleft r \sin(\varphi_1 + \omega) + r \sin(\varphi - \omega) + r [\cos(\varphi - \omega) - \cos(\varphi_1 + \omega)] \operatorname{ctg}(\varphi - \omega).$$

$$R_{pz} = r \left[1 - \cos(\varphi - \omega) + \frac{S}{2} \sin 2(\varphi - \omega) - \sin(\varphi - \omega) \sqrt{S \cdot \sin(\varphi - \omega) [2r - \sin(\varphi - \omega)]} \right] \quad (3.47)$$

При $\varphi \triangleright \varphi_1 + 2\omega$ і

$$2r \sin(\varphi_1 + \omega) \triangleleft S \triangleleft r \sin(\varphi_1 + \omega) + r \sin(\varphi - \omega) + r [\cos(\varphi_1 + \omega) - \cos(\varphi - \omega)] \operatorname{ctg}(\varphi_1 + \omega).$$

$$R_{pz} = r \left[1 - \cos(\varphi_1 + \omega) + \frac{S}{2} \sin 2(\varphi_1 + \omega) - \sin(\varphi_1 + \omega) \sqrt{S \cdot \sin(\varphi_1 + \omega) [2r - \sin(\varphi_1 + \omega)]} \right]$$

З вищенаведеного видно, що в залежності від поєднання величини подачі і кутів у плані ріжучої пластини, а також її кута нахилу на розрахункова величина шорсткості при похилому точенні є величиною однозначною і визначається залежностями (3.39), (3.45), (3.47), (3.48).

При точенні фасонної поверхні деталі, що проходить через контактну нормаль у напрямку подачі S профіль поверхні $f(x)$ стосується відповідного плоского нормального перерізу вихідної інструментальної поверхні в деякій їхній спільній точці К (рис. 3.19).

На прямолінійних ділянках профілю перерізу поверхні $f(x)$ висота залишкових гребінців дорівнює:

$$R_{pz} = r - \sqrt{r^2 - \frac{S^2}{4}}. \quad (3.49)$$

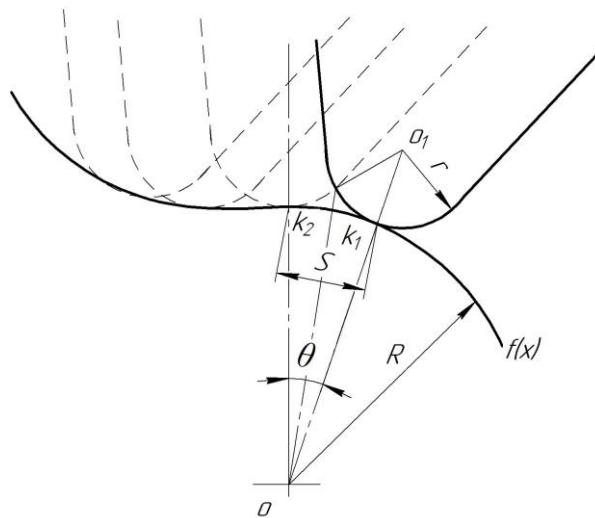


Рисунок 3.19 – Схема утворення шорсткості при фасонному точінні

Тут R_p є радіус кривизни траєкторії руху розташованої в площині кресленика рис. 3.19 точки ріжучої кромки, яка формує поверхню $f(x)$ у відповідному плоскому перерізі.

Дані залежності враховують велику кількість параметрів процесу різання, проте вони не враховують впливу глибини різання, фізико-механічних властивостей

оброблюваного та інструментального матеріалів, інших параметрів процесу обробки і, у ряді випадків, мають досить великі розбіжності з результатами експериментальних досліджень [32].

Проведений аналіз найбільш помітних аналітичних залежностей для розрахунку шорсткості обробленої поверхні показав, що основними технологічними факторами, що впливають на формування мікронерівностей обробленої поверхні, є подача та швидкість різання; геометричними - радіус при вершині різця та кути в плані.

При точенні фасонних поверхонь принципова кінематична схема визначається поєднанням двох рухів: рівномірного обертального руху деталі та рівномірного поступального руху різця вздовж профілю деталі.

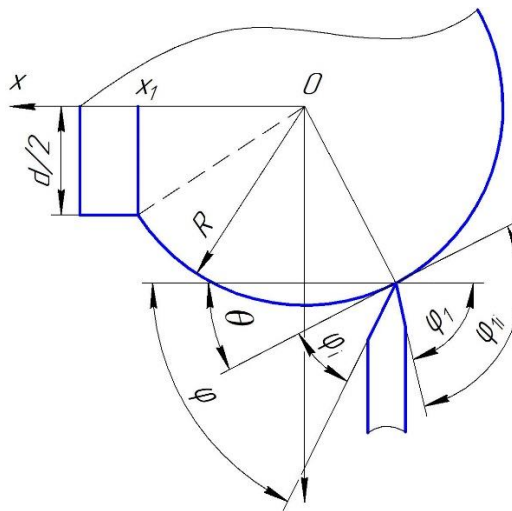


Рисунок 3.20 – Точіння сфери

Якщо деталь має форму сфери (рис. 2.20), то в процесі різання миттєві значення кутів інструменту в плані стають змінними і такими, що підпорядковуються наступним залежностям:

$$\varphi_i = \varphi - \theta > 0 \text{ і } \varphi_{1i} = \varphi_1 - \theta > 0,$$

де φ_i - миттєвий головний кут у плані;

φ - статистичний головний кут у плані;

φ_1 - допоміжний кут у плані;

θ - кут між дотичною в кожній точці оброблюваного профіля і віссю центрів верстату.

Коли $x = -R$, то $\theta = 90^\circ$ і $\varphi > 90^\circ$. Якщо $x = x_1$, то $\operatorname{tg} \theta = \frac{2x_1}{d}$, і $\varphi_1 > \operatorname{arctg} \frac{2x_1}{d}$.

Головний кут у плані і радіус при вершині є параметрами, що забезпечують геометричну умову можливості обробки фасонної поверхні даним різцем. Найбільш відповідні значення кутів визначаються виходячи з профілю деталі, що обробляється.

Між ріжучою пластиною та профілем, що обробляється, необхідно мати гарантований кутовий зазор щонайменше 2° (рис. 3.21).

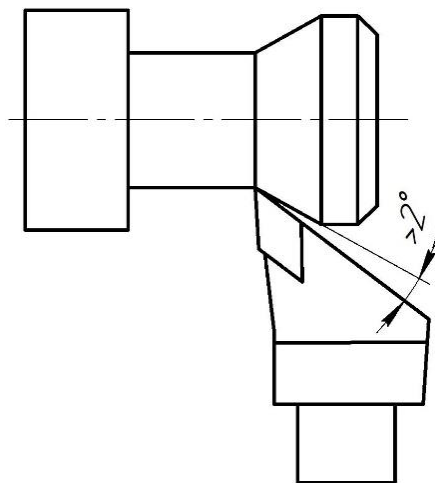


Рисунок 3.21 – Схема зовнішнього поздовжнього точіння

Однак, для досягнення задовільної якості поверхні та стійкості інструменту, деякі літературні джерела рекомендують забезпечувати кут 7° [3, 7].

У разі виготовлення деталі довільної форми контуру можна враховувати миттєві значення улов у плані інструменту: миттєвого головного кута у плані $\varphi_i = \varphi - \theta$ і миттєвого допоміжного кута в плані $\varphi_{1i} = \varphi_1 + \theta$.

Тоді

$$R_z = \frac{C_R \cdot t^{x_R} \cdot S^{y_R} \cdot (\varphi - \theta)^{z_R} \cdot (\varphi_1 + \theta)^{z_R}}{r^{q_R}}. \quad (3.50)$$

Допускаєма висота шорсткості оброблюваної поверхні

$$R_z = \frac{C_R \cdot t^{x_R} \cdot S^{y_R} \cdot (\varphi - \theta)^{z_R} \cdot (\varphi_1 + \theta)^{z_R}}{r^{q_R}} \leq R_{z\partial\partial\partial}. \quad (3.51)$$

Для вибору конкретної пластини можна скористатися довідковими даними, що наприклад наведені [17].

3.5 Висновки по розділу

1. Виявлено керовані фактори процесу різання під час точіння. Показано, що крім загальноприйнятих параметрів, таких як: подача вздовж осі заготовки, радіус вершини і головний і допоміжний кути в плані істотний вплив має напрямок сумарного вектора подачі.

2. При точенні поверхні з радіусною утворюючою маємо змінне значення частоти обертання шпинделя кожної точки профілю в залежності від його діаметра. Це може бути додатковим резервом підвищення продуктивності у разі використання верстатів з ЧПУ, що дозволяють змінювати частоту обертання шпинделя при зміні поздовжньої координати.

3. При обробці фасонних поверхонь подачу слід розглядати як векторну суму поздовжньої і поперечної подачі, що особливо актуально при точенні на верстатах з ЧПУ.

4. Показано, що головний і допоміжний кути в плані для забезпечення нормального протікання процесу різання повинні бути на $5...7^\circ$ більше кута наклепу оброблюваної поверхні.

5. Виведені аналітичні залежності які можна використовувати при точенні, а також при точенні складної поверхні деталі при різних поєднаннях радіусу інструменту, подачі, кутів у плані та кутів нахилу дотичної до оброблюваної поверхні щодо її осі.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Розрахунок планової цехової собівартості

При виконанні економічної частини користуємося джерелами [22-24].

$$C_{\text{цех}} = M_o + Z_{op} + B_{\text{соц}} + Z_{zo} + P_o + P_{\text{цех}}, \quad (4.1)$$

де M_o – витрати на основні матеріали.

$$M_o = a_o \cdot \Pi_m \cdot K_{mp} - a_e \cdot \Pi_e, \quad (4.2)$$

де a_o, a_e – відповідно маса деталі, відходів;

Π_m, Π_e – відповідно ціна матеріалу, відходів;

K_{mp} – коефіцієнт, враховуючий транспортні витрати.

$$M_o^c = 2,6 \cdot 7,43 \cdot 1,05 - 0,6 \cdot 0,48 = 19,99 \text{ грн.}$$

Заробітна плата основна та додаткова:

$$Z_{od} = \sum_1^m l_{zod} \cdot t_{um} \cdot \left(1 + \frac{\alpha}{100}\right) \quad (4.3)$$

де α - процент додаткової заробітної плати (10%).

$$Z_{od}^c = 1,54 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 1,69 \text{ грн.}$$

Відрахування на соціальне страхування:

$$B_{соц}^c = 1,69 \cdot 0,3854 = 0,65 \text{ грн.}$$

Витрати на спецоснащення:

$$З_{со}^c = \frac{0,5}{60} \cdot (4,173 + 2,406) = 0,05 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання і експлуатацію обладнання:

$$P_o = \frac{З_o \cdot \alpha_o}{100}, \quad (4.4)$$

де α_o – процент витрат на утримання і експлуатацію обладнання (99 %).

$$P_o^c = \frac{1,54 \cdot 99}{100} = 1,52 \text{ грн.}$$

Цехові витрати:

$$P_{цех} = \frac{З_o \cdot \alpha_{цех}}{100}, \quad (4.5)$$

де $\alpha_{цех}$ – цехові витрати (67,8 %).

$$P_{цех}^c = \frac{1,54 \cdot 67,8}{100} = 1,044 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.1 – Калькуляція собівартості виробів і собівартості річного випуску деталі

Стаття витрат	Стакан підшипника п'яти	
	На одиницю, грн	На річний випуск, грн
1. Основні матеріали	19,99	23988
2. Основна зарплата	1,54	1848
3. Додаткова зарплата	0,15	180
4. Відрахування до соціальних фондів	0,65	780
5. Витрати на спец. оснащення	0,05	60
6. Витрати на утримання та експлуатацію оснащення	1,52	1824
7. Цехові витрати	1,044	1253
Всього	24,94	29933

4.2 Аналіз варіантів технологічних процесів

Сім операцій базового технологічного процесу замінено на дві операції в проектному техпроцесі. Інформацію по цьому питанню наводимо в табл. 4.2.

Порівняння ведеться на базі технологічної собівартості за принципом відхилень:

$$C_{tex} = a \cdot N_z + b, \quad (4.6)$$

a – змінні витрати;

b – постійні витрати.

Таблиця 4.2 – Характеристика змін при обробці деталі стакан підшипника п'яти

Номер опер.	базовий варіант		номер опер.	проектний варіант	
	Модель обладнання	$t_{ум}$, хв.		Модель обладнання	$t_{ум}$, хв.
005	16K20	3,054	005	ЧПК Monfrts DNC 500	4,173
010	16K20	2,685	010	ЧПК Rapidrill 500	2,406
015	16K20	1,985			
020	2H135	1,972			
025	2H135	0,861			
030	2H135	2,888			
035	2H135	0,795			
	Σ	14,24		Σ	6,58

$$a = M_o + 3_{одз} + C_{ел} + C_{рем} + C_{дм} + C_{ур} + C_{ом} + C_{еп}. \quad (4.7)$$

Оскільки витрати на основні матеріали не змінюються, тож M_o не розраховуються.

Основна та додаткова заробітна плата з відрахуваннями:

$$3_{одз} = \frac{l_{ум}}{60} \cdot l_{год} \cdot k_{zn} \quad (4.8)$$

k_{zn} - коефіцієнт додаткової заробітної плати (1,67)

$$3_{одз}^{баз} = \left[\frac{12,379}{60} (3,054 + 2,685 + 1,985 + 1,972 + 0,861 + 2,888 + 0,795) \right] \cdot 1,1 = 3,23 \text{ грн.}$$

$$3_{одз}^{пр} = \left[\frac{14,037}{60} (4,173 + 2,406) \right] \cdot 1,1 = 1,69 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.3 – Характеристика обладнання

N з\п	Модель обладнання	габаритні розміри, м×м	потужність двигунів, кВт	Ремонтна складність, УРО	Баланс. вартість грн.
1	16K20	2,5X1,19	10	11	109250
2	2H135	1,24x0,81	2,2	8	27500
3	ЧПК Monfrts DNC 500	5,13x2,4	30	33	1190000
4	Rapidrill 500	1,1x2,18	6,2	30	356000

Витрати на силову енергію

$$C_{ел} = \frac{N_{\epsilon} \cdot K_{oi} \cdot K_n \cdot K_r}{\eta_o \cdot \eta_m} \cdot \frac{t_{um}}{60} \cdot C_{ел}, \quad (4.9)$$

N_{ϵ} - потужність встановлених двигунів;

$C_{ел}$ - ціна силової електроенергії (4,32 грн. /кВт)

$$C_{ел005}^{баз} = \frac{10 \cdot 0,7 \cdot 0,7 \cdot 0,3}{0,9 \cdot 0,95} \cdot \frac{3,054}{60} \cdot 4,32 = 0,378 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт

$$C_{рем} = \frac{W \cdot R \cdot K_e \cdot K_{ел} \cdot t_{um}}{T_{pc} \cdot 60}, \quad (4.10)$$

W - витрати на 1 одиницю ремонтної складності; R - ремонтна складність;

T_{pc} - тривалість ремонтного циклу.

$$C_{рем005}^{баз} = \frac{364 \cdot 11 \cdot 1,3 \cdot 1,2 \cdot 3,054}{20400 \cdot 60} = 0,016 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.4 – Розрахунок витрат на електроенергію силову

номер опер.	базовий варіант			номер опер.	проектний варіант		
	$N_{\text{в}},$ кВт	$t_{\text{ум}},$ хв.	$C_{\text{ел}},$ грн.		$N_{\text{в}},$ кВт	$t_{\text{ум}},$ хв.	$C_{\text{ел}},$ грн.
005	10	3,054	0,378	005	30	4,173	1,55
010	10	2,685	0,332	010	6,2	2,406	1,847
015	10	1,985	0,246				
020	2,2	1,972	0,054				
025	2,2	0,861	0,023				
030	2,2	2,888	0,078				
035	2,2	0,795	0,022				
Σ			1,133	Σ			3,397

Таблиця 4.5 – Розрахунок витрат на ремонт

номер опер.	базовий варіант				номер опер.	проектний варіант			
	R	W	$t_{\text{ум}},$ хв.	$C_{\text{рем}}$		R	W	$t_{\text{ум}},$ хв.	$C_{\text{рем}}$
005	11	364	3,054	0,016	005	33	806	4,173	0,14
010	11	364	2,685	0,014	010	30	806	2,406	0,074
015	11	364	1,985	0,01					
020	8	364	1,972	0,007					
025	8	364	0,861	0,003					
030	8	364	2,888	0,007					
035	8	364	0,795	0,003					
Σ				0,06	Σ				0,214

Витрати на допоміжні матеріали

$$C_{\text{дн}} = \frac{M_{\text{св}} \cdot R \cdot t_{\text{ум}}}{60} \cdot K_n \quad (4.11)$$

K_n – коефіцієнт типу виробництва;

M_{ce} – годинні витрати на допоміжні матеріали.

$$C_{on}^{баз} = \frac{0,09 \cdot 1}{60} [(11 \cdot (3,054 + 2,685 + 1,985) + 8(1,972 + 0,861 + 2,888 + 0,795) \cdot 0,85)] = 0,17$$

$$C_{on}^{np} = \frac{0,09 \cdot 1}{60} [(33 \cdot 4,173) + (30 \cdot 2,406)] \cdot 0,85 = 0,27 \text{ грн.}$$

Експлуатація приміщення:

$$B_n = \frac{S_o \cdot B_{nl} \cdot t_{um}}{F_{дрм} \cdot 60 \cdot \eta_{zn}} \quad (4.12)$$

S_o – загальна площа, яку займає верстат;

B_{nl} – вартість (річна) експлуатації 1 м² приміщення.

$$B_{n010}^{баз} = \frac{4,41 \cdot 3 \cdot 6,1 \cdot 3,054}{3890 \cdot 60 \cdot 0,85} = 0,0012 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.6 – Розрахунок витрат на експлуатацію приміщення

номер опер.	базовий варіант			номер опер.	проектний варіант		
	S_y	t_{um}	B_n		S_y	t_{um}	B_n
005	4,41	3,054	0,0012	005	7,45	4,173	0,003
010	4,41	2,685	0,001	010	2,4	2,406	0,0005
015	4,41	1,985	0,001				
020	1,004	1,972	0,0002				
025	1,004	0,861	0,0001				
030	1,004	2,888	0,0003				
035	1,004	0,795	0,0001				

Σ			0,0039	Σ			0,0035
---	--	--	--------	---	--	--	--------

Амортизація універсального обладнання

$$C_{аму} = \frac{\Phi_{бал} \cdot H_a \cdot t_{ум}}{F_{дрм} \cdot 60 \cdot \eta_n \cdot 100}, \quad (4.13)$$

H_a – річна норма амортизації;

$\Phi_{бал}$ – балансова вартість універсального обладнання.

$$C_{ам005}^{баз} = \frac{109250 \cdot 15 \cdot 3,054}{3890 \cdot 60 \cdot 0,85 \cdot 100} = 0,252 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.7 – Розрахунок амортизації універсального обладнання

номер опер.	базовий варіант			номер опер.	проектний варіант		
	$\Phi_{бал}$, грн.	$t_{ум}$, хв.	$C_{ам}$, грн.		$\Phi_{бал}$, грн.	$t_{ум}$, хв.	$C_{ам}$, грн.
005	109250	3,054	0,252	005	1190000	4,173	3,75
010	109250	2,685	0,22	010	356000	2,406	0,65
015	109250	1,985	0,163				
020	27500	1,972	0,041				
025	27500	0,861	0,018				
030	27500	2,888	0,06				
035	27500	0,795	0,017				
Σ			0,771	Σ			4,4

Постійні витрати:

$$b = Z_{нал} + C_{ен} + C_{амст}, \quad (4.14)$$

Витрати на налагодження обладнання:

$$Z_{нал} = \frac{t_{нз}}{60} \cdot l_{год}^{нал} \cdot A \cdot K_{зн}, \quad (4.15)$$

$l_{год}^{нал}$ - годинна тарифна ставка налагоджувача.

$$Z_{нал}^{баз} = \frac{(14+14+14+16+16+16+16) \cdot 14,037}{60} \cdot 12 \cdot 1,48 = 265,92 \text{ грн}$$

$$Z_{нал}^{np} = \frac{(22+20) \cdot 14,037}{60} \cdot 12 \cdot 1,48 = 174,51 \text{ грн.}$$

Витрати на спеціальне оснащення. В проектному варіанті спеціальним оснащенням є керуючі програми для верстатів з ЧПК.

$$C_{сн} = 0,6 \cdot S_n, \quad (4.16)$$

S_n – первісна вартість спеціального оснащення.

Вартість програми:

$$S_n^{прогр} = T_{прогр} \cdot l_{год}^{np} \cdot K_{зн}, \quad (4.17)$$

$T_{прогр}$ – трудомісткість розробки програми;

$l_{год}^{np}$ - годинна ставка програміста;

$K_{зн}$ – коефіцієнт додаткової зарплати.

$$S_n^{np} = 19,27 \cdot 15,56 \cdot 1,48 = 443,76 \text{ грн.}$$

$$C_{ен}^{np} = 0,6 \cdot 443,76 = 266,26 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.8 – Розрахунок трудомісткості керуючої програми

номер опер.	Кількість поверхонь	Кількість розмірів	Трудомісткість розробки, н/год.				
			операц. карти	керуючої програми	карти налагод- жування інструмен	карти кодування	Σ
005	9	20	5,39	2,8	0,8		8,99
010	5	6	6,68	2,8	0,8		10,28
Σ							19,27

Таблиця 4.9 – Розрахунок технологічної собівартості

N з/п	Статті витрат	Витрати, грн.	
		базовий варіант	проектний варіант
I. Змінні витрати			
1	Заробітна плата	3,23	1,69
2	Силова енергія	0,252	0,38
3	Ремонт обладнання	0,06	0,214
4	Допоміжні матеріали	0,17	0,27
5	Амортизація універсального обладнання	0,771	4,4
6	Експлуатація приміщення	0,0039	0,0035
Σ		4,487	6,96
II. Постійні витрати			
1	Налагоджування обладнання	265,92	174,51
2	Спеціальне оснащення	-	266,26
Σ		265,92	440,77
Технологічна собівартість		5650,32	8792,77

$$C_{тех}^{\bar{a}z} = 4,487 \cdot 1200 + 265,92 = 5650,32 \text{ грн.}$$

$$C_{тех}^{np} = 6,696 \cdot 1200 + 440,77 = 8792,77 \text{ грн.}$$

Розрахунок критичної програми

$$N_{кр} = \frac{b^{np} - b^{\bar{a}z}}{a^{\bar{a}z} - a^{np}}, \quad (4.18)$$

$$N_{кр} = \frac{440,77 - 265,92}{4,487 - 6,96} = -71 \text{ шт.}$$

$$C_{кр} = a_{np} \cdot N_{кр} + b_{np}, \quad (4.19)$$

$$C_{кр} = 6,96 \cdot (-71) + 440,77 = -53,39 \text{ грн.}$$

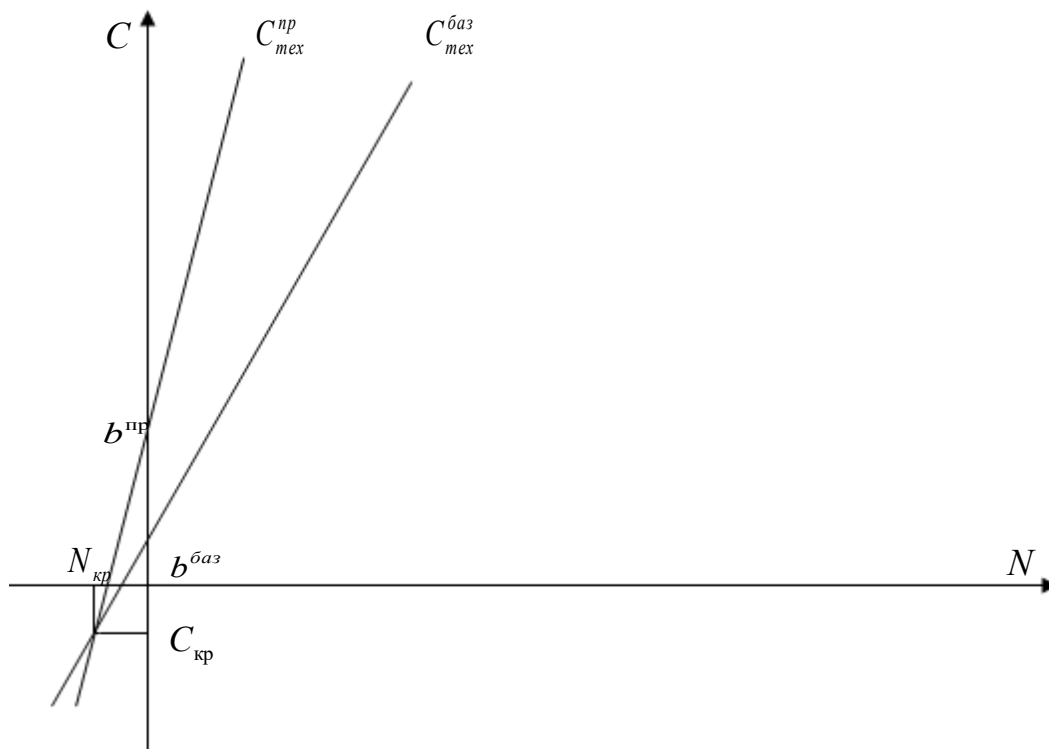


Рисунок 4.1 – Графік порівняння технологічної собівартості виготовлення деталі стакан підшипника п'яти за варіантами

Річний економічний ефект:

$$E_{річн} = (C_{тех}^{\bar{a}z} + E \cdot K^{\bar{a}z} \cdot \eta^{\bar{a}z}) - (C_{тех}^{np} + E \cdot K^{np} \cdot \eta^{np}), \quad (4.20)$$

$K^{\bar{a}z}, K^{np}$ – капіталовкладення по варіантах;

E – нормативний коефіцієнт окупності капіталовкладень;

$\eta^{\bar{a}z}, \eta^{np}$ - коефіцієнт завантаження обладнання;

$$K = K_{б\gamma\delta} + K_{обл} + K_{осн}, \quad (4.21)$$

$$K_{б\gamma\delta}^{\bar{a}z} = 7 \cdot 20 \cdot 8 \cdot 850 = 952000 \text{ грн.}$$

$$K_{б\gamma\delta}^{np} = 2 \cdot 20 \cdot 8 \cdot 850 = 272000 \text{ грн.}$$

$$K_{обл}^{\bar{a}z} = 109250 \cdot 3 + 27500 \cdot 4 = 437750 \text{ грн.}$$

$$K_{обл}^{np} = 1190000 + 356000 = 1546000 \text{ грн.}$$

$$K_{осн}^{\bar{a}z} = 0,07 \cdot 437750 = 30643 \text{ грн.}$$

$$K_{осн}^{np} = 0,07 \cdot 1546000 = 108220 \text{ грн.}$$

$$\eta^{\bar{a}z} = 0,016; \eta^{np} = 0,016$$

$$K^{\bar{a}z} = 952000 + 437750 + 30643 = 1420393 \text{ грн.}$$

$$K^{np} = 272000 + 1546000 + 108220 = 1926220 \text{ грн.}$$

$$E_{річн} = (C_{тех}^{\bar{a}z} + E \cdot K^{\bar{a}z} \cdot \eta^{\bar{a}z}) - (C_{тех}^{np} + E \cdot K^{np} \cdot \eta^{np}), \quad (4.22)$$

$$E_{річн} = (5650,32 + 0,16 \cdot 1420393 \cdot 0,016) - (8792,77 + 0,16 \cdot 1926220 \cdot 0,016) = -4437 \text{ грн.}$$

ВИСНОВКИ

1. Розроблено технологію обробки стакан підшипника п'яти 0603.72.001 та спроектовано контрольний пристрій індикаторного типу, який буде використовуватися для контролю торцевого биття торцю деталі.

2. Виявлено керовані фактори процесу різання під час точіння. Показано, що крім загальноприйнятих параметрів, таких як: подача вздовж осі заготовки, радіус вершини і головний і допоміжний кути в плані істотний вплив має напрямок сумарного вектора подачі.

3. Показано, що при обробці фасонних поверхонь подачу слід розглядати як векторну суму поздовжньої і поперечної подачі, що особливо актуально при точенні на верстатах з ЧПУ.

4. Встановлено, що при точенні поверхні з радіусною утворюючою маємо змінне значення частоти обертання шпинделя кожної точки профілю в залежності від його діаметра. Це може бути додатковим резервом підвищення продуктивності у разі використання верстатів з ЧПУ, що дозволяють змінювати частоту обертання шпинделя при зміні поздовжньої координати.

5. Показано, що головний і допоміжний кути в плані для забезпечення нормального протікання процесу різання повинні бути на $5...7^\circ$ більше кута наклепу оброблюваної поверхні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Павленко І. І., Мажара В. А., Скібінський О. І. Методичні рекомендації до кваліфікаційної роботи. – 2021.
2. Мажара, В. А., Гречка, А. І., Свяцький, В. В., Щербина, К. К., Мірзак, В. Я., Селєхова, В. М., ... & Шмельов, В. М. (2024). Кваліфікаційна робота за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти. Спец. 131 «Прикладна механіка».
3. Добрянський, С. С. Технологічні основи машинобудування [Електронний ресурс] : підручник для студентів спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» / С. С. Добрянський, Ю. М. Малафєєв ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 379 с.
4. Боженко Л. І. Технологія машинобудування. Проектування технологічного спорядження : посібник. Львів : Світ, 2001. 296 с.
5. Крижанівський, В. А., Кузнєцов, Ю. М., Валявський, І. А., & Склярів, Р. А. (2004). Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ/Під ред. ЮМ Кузнєцова. Кіровоград: ІМЕКС.
6. Pavlenko I. I. Robotic technological complexes: monograph / I. I. Pavlenko, V. A. Mazhara; under the editorship I. I. Pavlenko. – Kropyvnytskyi: KOD, 2019. – 382 p.
7. Mazhara, V., Shcherbyna, K., Maniakin, S., & Filonenko, V. (2023). Efficiency of using turning machining centers. Global science: prospects and innovations : proceedings of IV international scientific and practical conference, Liverpool, 1-3 December, 2023. – Liverpool, United Kingdom : Cognum Publishing House, 2023. – P. 216-221.
8. Сафронова Н. В., Мажара В. А. До ефективності використання сучасних токарних обробних центрів. – 2011.
9. Гевко Б.М., Дичковський М.Г., Матвійчук А.В. Технологічна оснастка. Контрольні пристрої : навч. посіб. Київ : «Кондор», 2008. 220 с.

- 10.Мажара, В. А., & Годунко, М. О. (2018). Основи гнучкого автоматизованого виробництва. Методичні вказівки до виконання самостійної роботи студентами спеціальності “Прикладна механіка”. Кропивницький. ЦНТУ. 2018. – 32 с.
- 11.Скібінський О. І., Селехова В. М. Технологія машинобудуванн. Самостійні роботи. – 2023.
- 12.Павленко І.І. Захватні пристрої роботів / І.І. Павленко, М.О. Годунко // Захватні пристрої роботів: монографія. – Кропивницький: «КОД», 2020. – 386 с.
- 13.Мажара В. Дослідження впливу тертя в шарнірах захватного пристрою на силу затиску // Наука–виробництву. – 2025. – С. 115.
- 14.Черновол М.І. Надійність сільськогосподарської техніки. Кіровоград: Код, 2010. 320 с.
- 15.Плечко О. В., Мажара В. А. Вплив тертя на сили затиску в захватних пристроях промислових роботів // Наука–виробництву, 2013. – 2013. – С. 97.
- 16.Годунко М.О. Основи 3D моделювання і робототехніки: Навч. посіб. для проведення практичних занять / М.О. Годунко, А.І. Гречка. – К. : 7БЦ, 2024. – 42 с.
- 17.Основний каталог. Металорізальний інструмент Sandvik Coromant. АВ Sandvik Coromant, 2009, 1233 с.
- 18.Мажара, В. А., Артюхов, А. М., & Тененика, С. А. (2024). Проектування затискних пристроїв та оснащення. Самостійна робота.
- 19.Павленко, І. І., & Мажара, В. А. (2017). Технологічне оснащення. Методичні вказівки виконання курсового проекту студентами спеціальності “Прикладна механіка”. – Кропивницький: ЦНТУ, 2017. – 36 с.
- 20.Мажара, В. А., Щербина, К. К., Артюхов, А. М., Тененика, С. А., & Шестаков, І. С. (2024). Система автоматизованого проектування технологічного оснащення. // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. –

- Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – Вип. 54. – С. 12-23.
- 21.Павленко І.І. Структура промислових роботів. Кіровоград: КІСМ, 1998. – 98с.
- 22.Журило І.В., Семикіна М.В. Дипломне проектування з економіки підприємства: особливості, методика та основні етапи: навчально-методичний посібник. 3-тє вид., переробл. і доповн. Кропивницький: ЦНТУ, 2016. 80 с.
- 23.Sybirtsev, V., Mazhara, V., & Moskalenko, V. (2020). Analysis of discriminant models in forecasting bankruptcy of enterprises. Bulletin of the Cherkasy Bohdan Khmelnytsky National University. Economic Sciences, (2).
- 24.MAZHARA V., MOSKALENKO V. Principal component analysis in the forecasting bankruptcy of enterprises // Bulletin of the Cherkasy Bohdan Khmelnytsky National University. Economic Sciences. – 2019. – №. 3.
- 25.Мажара В. А. Контрольно-вимірювальні пристрої. Методичні вказівки до виконання самостійної роботи студентами денної та заочної форми навчання напрямку “Інженерна механіка” з профілюванням за спеціальністю “Технологія машинобудування” //Кіровоград: КНТУ. – 2010.
- 26.Мажара В. А., Артюхов А. М., Тененика С. А. Проектування затискних пристроїв та оснащення. Самостійна робота. – 2024.
- 27.Shcherbyna, K., Hrechka, A., Mazhara, V., & Diachenko, T. (2020). Kinematics of cutting process while honing holes with a hone with variable geometry of sticks.
- 28.Мажара, В. А., Годунко, М. О., Кислун, О. А., & Ковальчук, Є. В. (2014). Визначення кутів повороту ведучих ланок адаптивного захватного пристрою.
- 29.Годунко, М. О., Кислун, О. А., Мажара, В. А., Щербина, В. К., Кравченко, Р. А., & Ключкін, В. В. (2023). Розробка методики силового розрахунку вертикально орієнтованого захватного пристрою.
30. Pidgaetskyi M.M., Shcherbyna K.K., Mazhara V.A., Dyachenko T.V. Dynamic analysis of the traditional final link of the honing head. All-state

- interdepartmental scientific and technical collection. Design, production and operation of agricultural machines. Kirovohrad: KNTU, 2019. Issue 49. P.194-200.
- 31.Щербина К., Заїка А., Заїка С., Мажара В., Скібінський Я. Управління точністю нарізання черв'ячних коліс збірними черв'ячними фрезами з поділенням на дві частини профілем інструментальної рейки // Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки. - Хмельницький: ХНУ, 2025. - №2 (349). - С.364-370.
- 32.Лисенко О. В. Динамічна модель технологічної оброблювальної системи точіння з урахуванням компенсуючого пристрою //Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2011. – №. 24 (2). – С. 131-136.
- 33.Skibinskyi, O. I. A Novel Design of Cutting Tool for Efficient Finishing of G-Rotors / O. I. Skibinskyi, A. O. Hnatiuk // Advances in Gear Theory and Gear Cutting Tool Design / [editors : S. P. Radzevich, M. Storchak]. – Cham, Switzerland: Springer, 2022. – P. 181-203.
- 34.Кириченко А.М. Українська мова як мова науки (у контексті концептуальної картини світу) / А.М. Кириченко, З.В.. Стежко // Наука та наукознавство. – Київ, 2024. – Вип. 4 (126). – С. 40-50.
- 35.Щербина К., Мажара В., Торчілов Д., Заїка А., Масляніков В. Дослідження повздожньої сталості пружно-гвинтового хону з гвинтовими канавками // Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки. - Хмельницький: ХНУ, 2025. - №2 (349). - С.493-499.
- 36.Mazhara, V., & Shcherbyna, K. Exploring the possibilities of using an adaptive gripping device.